

Component analysis of a fully implemented sectional WPC-beam with tribologic value as sliding rail utilized in a overhead conveyor system / Bauteilanalyse eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC für ein Hängefördersystem

Dr.-Ing. Sven Eichhorn (sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de)

Dipl.-Ing. Christine Schubert (christine.schubert@mb.tu-chemnitz.de)

Technische Universität Chemnitz, Institute of Materials Handling, Conveying and Plastics Engineering, Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering / Technische Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Fördertechnik

1. Introduction/ Einleitung

The sectional beam is the essential detail of an overhead conveyor. The construction element is stressed by time-varying mechanical and tribological loads. Here, we discuss the influence of the manufacturing process on the mechanical properties and the serviceability of the extruded profile in a selected application. The development of existing formulas and processing parameters are shown with the objective to expand the material application from WPC-decking to use in mechanical engineering.

Das Tragprofil ist das zentrale Element in einem Hängefördersystem. Das Bauteil wird durch zeitlich veränderliche mechanische und tribologische Lasten beansprucht. Nachfolgend wird der Einfluss des Herstellungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften und die Gebrauchsfähigkeit eines extrudierten Trag- und Gleitprofils aus WPC im gewählten Anwendungsfall vorgestellt. Die notwendige Weiterentwicklung bestehender Rezepturen und Verarbeitungsverfahren wird aufgezeigt, um den Anwendungsbereich des Werkstoffes WPC vom Bereich Terrassendielen auf den Maschinenbau zu erweitern.

2. Objective and starting point / Zielstellung und Ausgangspunkt

The overall objective is the development of a so-called Green Logistics Plant (GLP, cp. [1], p. 2), which entails implementing a combination of technical, economic and environmental benefits in construction and components of technical logistics (intralogistics). This enables the advantageous replacement of metallic materials (e.g. aluminium) with renewable materials (e.g. WPC). For the chosen application the tribological advantages of WPC (cp. [2] and [3]) were combined with the constructional requirements of an overhead conveyor system. Fig 1 gives a summary of the development, which is described in [3]. It starts with the aluminium profile, goes to a hybrid profile made from aluminium and WPC and ends with the fully implemented sectional WPC-beam. In consequence the cost of the WPC-beam can be reduced to 20-25% of the manufacturing costs of the aluminium profile.

Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung der sogenannten Green Logistics Plant (GLP, vgl. [1], S. 2). Dabei wird eine Kombination aus technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen in Bauweisen und Bauteilen der technischen Logistik (Intralogistik) umgesetzt. Dadurch können metallische Werkstoffe (z. B. Aluminium) mit erneuerbaren Werkstoffen (z. B. WPC) vorteilhaft ersetzt werden. Für die ausgewählte Anwendung wurden bekannte tribologische Vorteile von WPC (vgl. [2] und [3]) mit den konstruktiven Anforderungen einer tragenden Struktur in einem Hängefördersystem kombiniert. Abb. 1 fasste die in [3] detaillierter beschriebene Entwicklung vom Aluminium Profil, über ein Hybridprofil aus Aluminium und WPC zum kompletten WPC-Profil zusammen. Im Ergebnis ist eine Reduzierung der Herstellungskosten des WPC-Profiles auf ca. 20-25 % des Aluminiumprofils realisierbar.

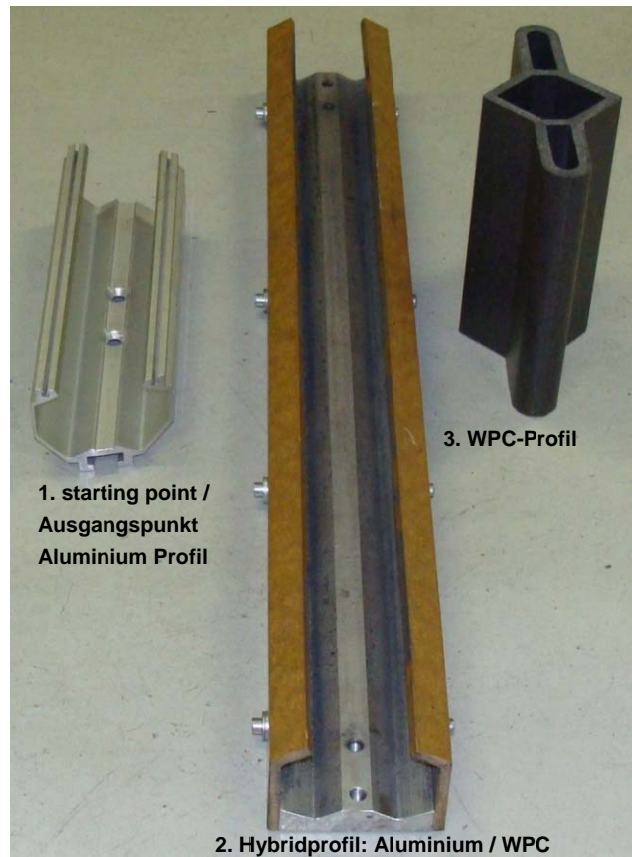


Fig. 1 / Abb. 1: Steps in the development of the fully implemented sectional WPC-beam / Entwicklungsschritte des kompletten WPC-Profiles [4]

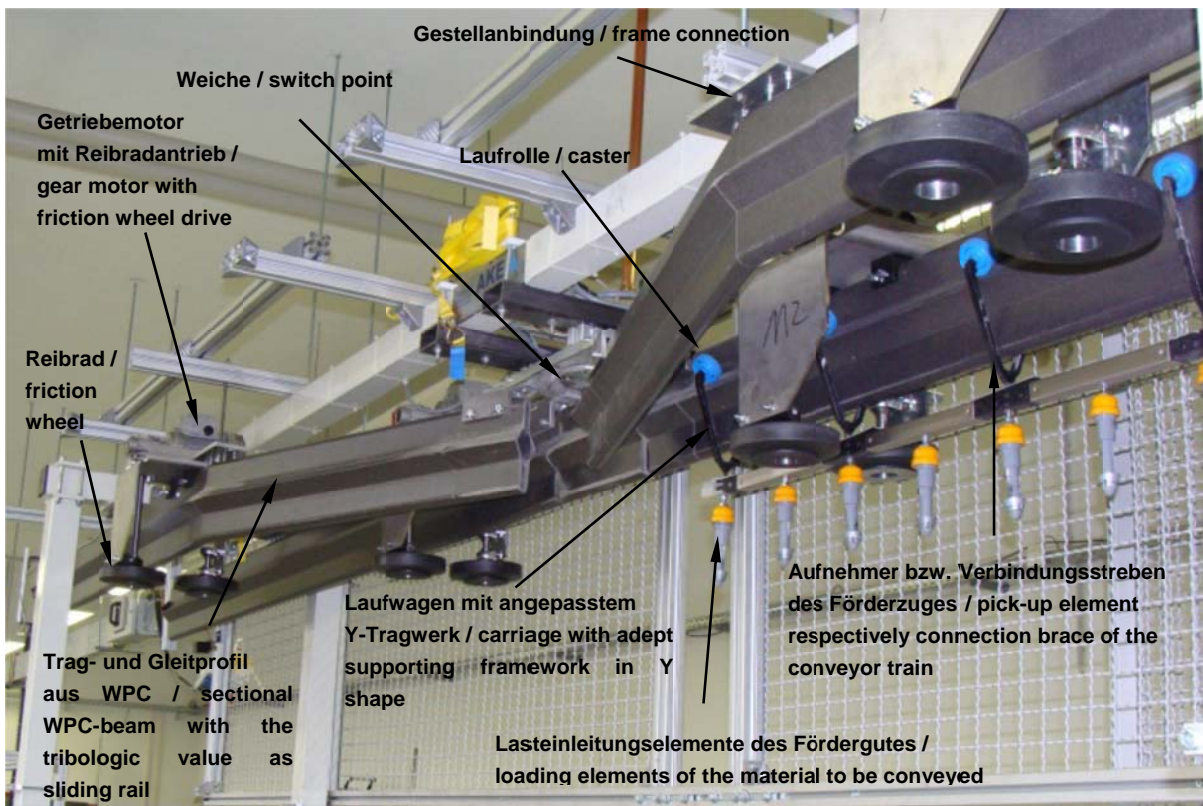


Fig. 2 / Abb. 2 Overhead conveyor system based on the fully implemented sectional WPC-beam with the tribologic value as a sliding rail (first sampling, profile 1) / Hängefördersystem mit kompletten WPC-Profilquerschnitt (erste Bemusterung, Profil 1) [4]

Fig. 2 shows the test track of the overhead conveyor system with a K-layout, which is implemented in the laboratory of the TU Chemnitz. The test track is used for testing the technical functionality, serviceability and long term usability from the conveyor system under practical conditions. The conveying system works as follows: The material to be conveyed is fixed to the conveyor train with special loading elements. The conveyor train consists of several connection braces. Its connection to the sectional WPC-beam is made by the carriage with supporting y-shaped framework. The carriage consists of one supporting y-shaped framework and two casters. The fully implemented sectional WPC-beam is fixed to the frame with a WPC-compatible frame connection. The load is transmitted by two casters per carriage from the conveyor train over the modified supporting y-shaped framework to the sectional WPC-beam. A friction wheel drive powers the conveyor train over the action point friction wheel - connection brace. This kind of conveyor system can be used in different zones of intra-logistics. Target zones of the conveying system with the fully implemented sectional WPC-beam are the textile- and automotive industries.

The sectional WPC-beam with tribologic value as a sliding rail was sampled twice under industrial conditions by the NOVO-TECH GmbH & Co. KG, Aschersleben. Both samples were extruded by an ENTEX planetary roller extruder from the company Rust & Mitschke GmbH.

The composite material consists of 70 mass% softwood, 16 mass% PE-HD and 14 mass% additives (coupling agents, lubrication agents, dyes...). Both profiles are different in wood particle size and processing parameters. For the first sampling (profile 1) the same parameters and wood particle size used for manufacturing decking board were used. As a result of this, profile 1 shows poor dimensional accuracy and an unacceptable shape deviation, which is further described in [4]. In spite of these mistakes it was possible to make the conveyor system operate under laboratory conditions with a few adjustments (cp. Fig 2).

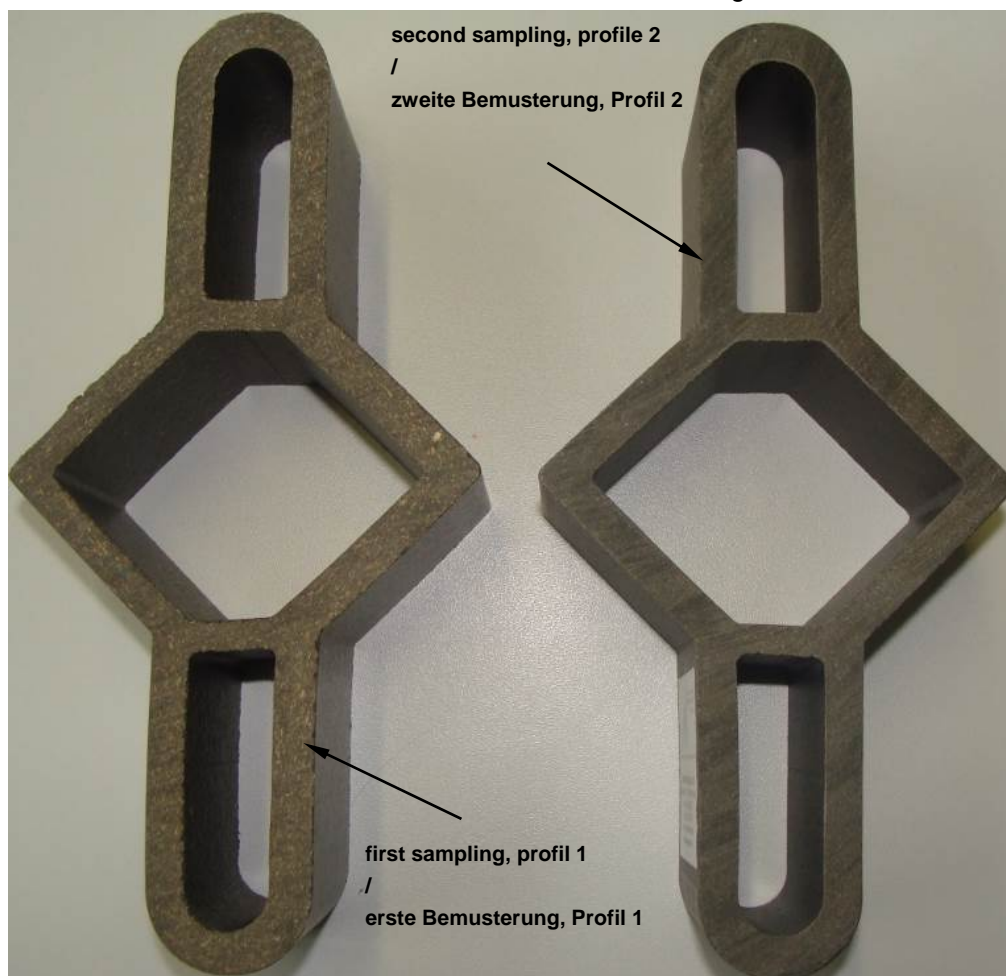
Abb. 2 zeigt die im Labor der TU Chemnitz umgesetzte Versuchsstrecke des Hängefördersystems im K-Layout. Sie dient dem Nachweis der technischen Funktionalität und dem Test der Dauergebrauchsfähigkeit unter praxisnahen Bedingungen. Die Funktionsweise des Hängefördersystems ist wie folgt: Das Fördergut wird durch spezielle Lasteinleitungselemente am Förderzug befestigt. Der Förderzug besteht aus einzelnen Verbindungsstreben. Seine Verbindung zum Trag- und Gleitprofil erfolgt über die einzelnen Laufwagen mit angepasstem Y-Tragwerk. Der Laufwagen besteht aus einem Y-Tragwerk mit zwei Laufrollen. Das Trag- und Gleitprofil wird mittels einer WPC-kompatiblen Gestellanbindung am Gestell befestigt. Zwei Laufrollen pro Laufwagen übertragen die Last des Förderzuges über die Y-Tragwerke auf das Trag- und Gleitprofil. Ein Reibradantrieb treibt den kompletten Förderzug über die Wirkstelle Reibrad-Verbindungsstrebe an. Diese Art des Hängefördersystems kann in vielen Bereichen der Intralogistik zum Einsatz kommen. Angestrebte Einsatzbereiche des Hängefördersystems mit dem Trag- und Gleitprofil aus WPC sind die Textil- und die Automobilindustrie. Das Trag- und Gleitprofil wurde zwei Mal im industriellen Maßstab von der NOVO-TECH GmbH & Co. KG in Aschersleben bemustert. Beide Muster wurden auf einem ENTEX-Planetwalzenextruder der Firma Rust & Mitschke GmbH direkt extrudiert. Abb. 3 zeigt den Querschnitt beider WPC-Profile.

Die WPC-Rezeptur ist zusammengesetzt aus 70 mass% Weichholz, 16 mass% PE-HD und 14 mass% Additive (Haftvermittler, Extrusionshilfen, Farbstoffe...). Beide WPC Profile unterschieden sich hinsichtlich ihrer Holzpartikelgröße und ihren Verfahrensparametern. Für die erste Bemusterung (Profil 1) wurden die Parameter und die Holzpartikelgröße aus der Fertigung von Terrassendielen übernommen.

Im Ergebnis zeigte Profil 1 eine schlechte Maßhaltigkeit und inakzeptable Formabweichungen, welche in [4] näher beschrieben sind. Trotz dieser Fehler war es möglich das Hängefördersystem mit einigen Anpassungen, unter Laborbedingungen in Betrieb zu nehmen

Thereby, the fundamental suitability of WPC was shown in this technical application. With profile 1 (first sampling) it was not possible to reach the required smoothness for the conveyor process and the planned load levels. Furthermore, the proof of serviceability and long term usability was still not possible. As a result of the error analysis the average wood particle size was reduced, the extrusion parameters were varied and the extrusion die and the calibrating unit were changed. Subsequently the sectional WPC-beam with tribologic value as a sliding rail was sampled again (profile 2). According to previous knowledge, the shown points of criticism were considerably reduced. Chapter 3 shows the recent mechanical studies, which among other things were used to analyze these points of criticism.

(vgl. Abb. 2). Damit konnte die grundsätzliche Eignung des Werkstoffes WPC in dieser technischen Anwendung gezeigt werden. Mit Profil 1 (erste Bemusterung) konnten aber weder die für den Förderprozess erforderliche Laufruhe noch die geplanten Lastniveaus erreicht werden. Zudem war der Nachweis der Dauergebrauchsfähigkeit nicht abschließend möglich. Im Ergebnis der Fehleranalyse wurde die mittlere Holzpartikelgröße reduziert, die Extrusionsparameter variiert, das Extrusionswerkzeug bzw. die Kalibrierung verändert und abschließend das Trag- und Gleitprofil erneut bemusterte (Profil 2). Nach bisherigem Kenntnisstand konnten die aufgezeigten Kritikpunkte deutlich reduziert werden. Kapitel 3 zeigt die durchgeführten mechanischen Untersuchungen, welche u. a. zur Analyse der Problemstellen genutzt wurden.



Profil 1 (first sampling)

Profil 2 (second sampling)

Fig. 3 / Abb. 3: Cross section of the extruded sectional WPC-beam, comparison of the first and the second sampling / Profilquerschnitt des extrudierten WPC-Profiles, Vergleich der ersten und zweiten Bemusterung [4]

3. Recent studies: questions, material and methods / Durchgeführte Untersuchungen: Fragestellung, Material und Methoden

The recent studies shall establish two questions:

1. To what extent are the mechanical properties of material testing transferable to construction element tests?
2. How homogenous are the mechanical properties in relation to the cross section?

To answer these questions, material and construction element tests under static load were carried out.

Test 1 – material studies

Rectangular samples (150 mm x 10 mm x local thickness) and semicircular samples of the same length and the dimensions $R_a = 15$ mm, $R_i = 7,5$ mm (positions number 1, 10, cp. Fig. 4) were extracted from both extruded profiles. The semicircular samples were tested in the tension test as shouldered test bars.

Die Untersuchungen sollten zwei Fragen klären.

1. In wie weit sind die mechanischen Kennwerte aus den Materialuntersuchungen auf Bauteiluntersuchungen übertragbar?
2. Wie homogen sind die mechanischen Eigenschaften bezogen auf den Profilquerschnitt?

Zur Beantwortung der Fragestellung wurden mechanische Material- und Bauteiluntersuchungen unter statischer Belastung am extrudierten Trag- und Gleitprofil durchgeführt.

Versuch 1 - Materialuntersuchungen

Aus beiden extrudierten Profilen wurden Rechteckproben (150 mm x 10 mm x lokaler Wanddicke) und gleichlange Halbkreisproben der Abmessungen $R_a = 15$ mm, $R_i = 7,5$ mm (Positionsnummer 1, 10, vgl. Abb. 4) entnommen. Die Halbkreisproben wurden im Zugversuch als Schulterstab geprüft.

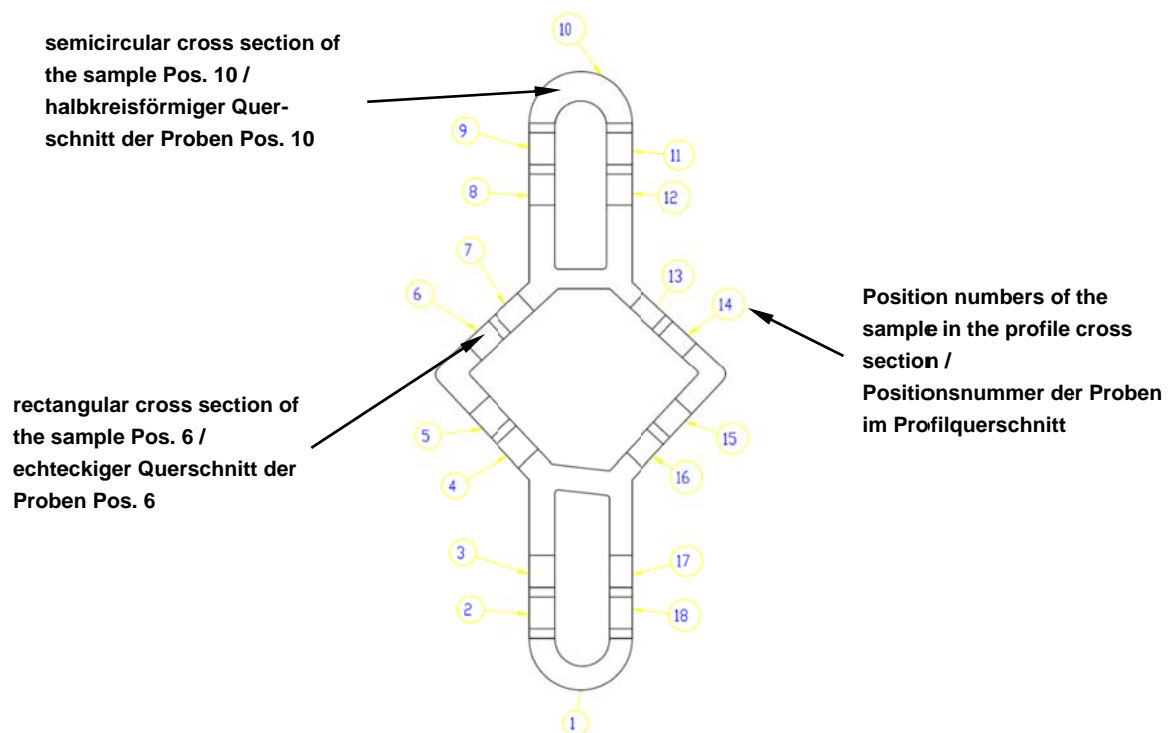


Fig. 4 / Abb. 4: Position numbers of the samples in the cross section for Profil 1 and 2 / Positionsnummern der Proben im Profilquerschnitt für Profil 1 und 2

The orientation of the cross section shown in Fig. 4 complies with the installation position (height side) of the profile. The position references local areas. Each position number complies with one local area of the cross

Die Orientierung des Profilquerschnittes in Abb. 4 entspricht der Einbauposition (hohe Seite) des Profils. Sie dient als Referenz für die Bereichseinteilung. Jede Positionsnummer entspricht einem lokalen Bereich im Profilquerschnitt. Die

section.

The sample was continuously extracted from the profiles in the direction of the extrusion and tested in the three point bending- and tension test. There were seven samples per test and per local area (position number in Fig. 4) tested. Test speed was 60 mm/min. The modulus of elasticity was determined to be the limits of 10% - 40% of the maximum force, based on the force-deformation curve (cp. [6], p. 4). Measuring length during the tension tests was 50 mm. The test setup of the three point bending test conformed to DIN EN ISO 178. The span was 120 mm. The height of the sample varied with the local thickness between 6,6 – 8,3 mm. The modulus of elasticity depends on the shear force influence and is called flexural spare modulus. As for the tension modulus it was determined from the force-deformation curve. There were seven samples tested per test series (cp. position number in Fig. 4).

Test 2 – construction element studies

The fully implemented sectional WPC-beam was tested using a three point bending test with three different spans (cp. [4], p. 15 - 18). The influence of pre stress (cp. [4]) was tested. The plunger was 60 mm wide. The flexural spare modulus was determined as in test 1, but differently from [4]. There were five single samples per test parameter. The test speed was 60 mm/min, based on the speed of the overhead conveyor system.

4. Recent studies: results / Durchgeführte Untersuchungen: Ergebnisse

4.1. Test 1 – material studies / Versuch 1 – Materialuntersuchungen

The material average densities for the WPC were determined for profile 1 (1,19 g/cm³) and for profile 2 (1,23 g/cm³). Average moisture was 2,33 % for all samples from profiles 1 and 2.

Fig. 5 shows a characteristic analysis graphic for the bending- and tension test. The green, red and blue points and lines illustrate the additional analysis. The deformation behavior is nonlinear elastic.

Einzelproben wurden fortlaufend in Extrusionsrichtung aus den Profilen entnommen und im Dreipunktbiege- und Zugversuche geprüft. Es wurden jeweils sieben Einzelmessungen pro Versuch und lokalen Profilbereich (Positionsnummern in Abb. 4) durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 60 mm/min. Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte auf Basis der Kraft-Verformungskurve in den Grenzen von 10% - 40% der maximalen Kraft (vgl. [6], S. 4). Die Messlänge in den Zugversuchen betrug 50 mm. Die Versuchsanordnung der Dreipunktbiegung richtete sich nach DIN EN ISO 178. Die Stützweite betrug 120 mm. Die Probenhöhe variierte mit der lokale Wanddicke der Probe zwischen 6,6 – 8,3 mm. Der ermittelte E-Modul ist abhängig vom Querkrafteinfluss und wird weiterführend als Biege-Ersatz-E-Modul bezeichnet. Er wurde wie der Zug-E-Modul aus der Kraft-Verformungskurve bestimmt. Es wurden jeweils sieben Messungen pro Messreihe (vgl. Positionsnummer, Abb. 4) durchgeführt.

Versuch 2 - Bauteiluntersuchungen

Es wurden Dreipunktbiegeversuche am kompletten Profil bei drei verschiedenen Stützweiten durchgeführt (vgl. [4], S. 15 - 18). Weiterhin wurde der Einfluss einer Vorbeanspruchung (vgl. [4]) untersucht. Der Druckstempel war 60 mm breit. Der Biege-Ersatz-E-Modul wurde wie bei Versuch 1, abweichend zu [4] bestimmt. Es wurden fünf Einzelmessungen pro Parameter durchgeführt. Die Versuchsgeschwindigkeit betrug 60 mm/min, resultierend aus der Fördergeschwindigkeit des Hängefördersystems.

Die Werkstoffdichten des WPC wurden im Mittel für Profil 1 mit 1,19 g/cm³ und für Profil 2 mit 1,23 g/cm³ bestimmt. Die Feuchte betrug im Mittel 2,33% für die Proben aus Profil 1 und 2.

Abb. 5 zeigt einen charakteristischen Auswertungsplot für den Biege- und Zugversuch. Die grün, rot und blau dargestellten Punkte und Linien illustrieren die weitere Auswertung. Das Verformungsverhalten ist nichtlinear elastisch.

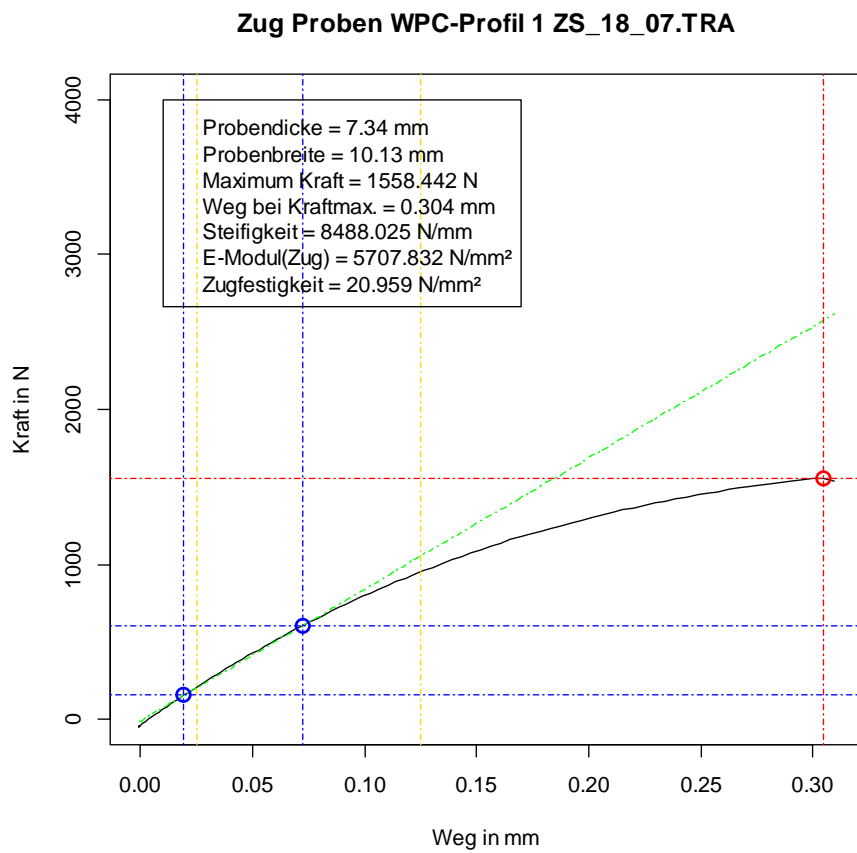
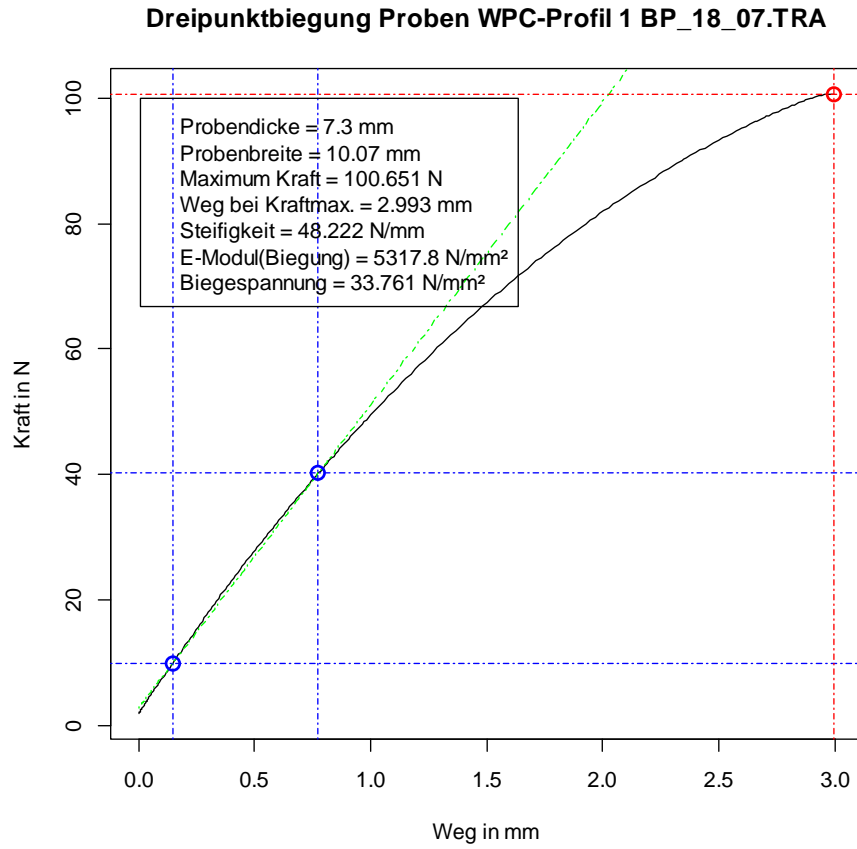


Fig. 5 / Abb. 5: Typical force-deformation curves of the material samples for three-point bending and tension / Typische Kraft-Verformungskurven der Materialproben bei Dreipunktbiegung und Zug

The modulus of elasticity (green line) in Fig. 5 was determined using the blue points. The red point marks the failure and the force maximum. The point of intersection of the green and the red horizontal lines complies with the maximum stress, using the linear model. The strains were determined from the deformation (tension) and the length change of the outer fiber (bending). All analysis plots uses a boxplot with 1,5 IQR, complemented with the mean (+). Fig. 6 shows the results for the modulus of elasticity.

Mit den beiden blauen Punkten in Abb. 5 wurde der E-Modul (grüne Linie) bestimmt. Der rote Punkt markiert das Versagen und das Kraftmaximum. Der Schnittpunkt der grünen und roten horizontalen Linie entspricht der Bruchspannung nach dem linearen Modell. Die Dehnungen wurden aus der Verformung (Zug) und der Längenänderung der Randfaser (Biegung) bestimmt. Alle Auswertungen nutzen Boxplots mit 1,5 IQR, ergänzt mit Mittelwerten (+). Abb. 6 zeigt die Ergebnisse für die E-Moduln.

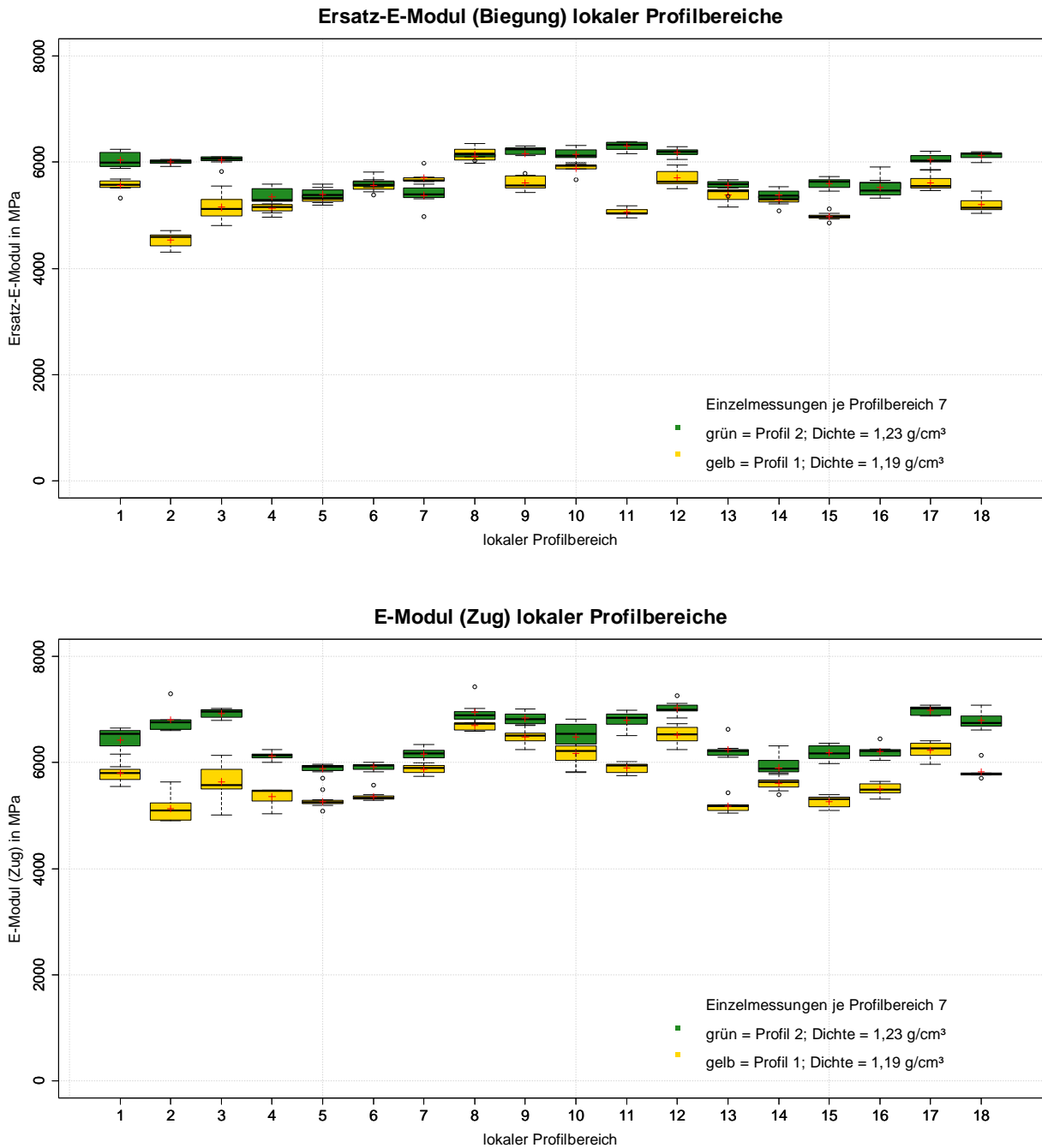


Fig. 6 / Abb. 6: Modulus of elasticity of the material samples for three-point bending and tension / E-Moduln der Materialproben bei Dreipunktbiegung und Zug

Fig. 6 shows that the modulus of elasticity for bending and tension fluctuate over the cross section. The values for profile 2 (green) fluctuate less. The values are generally much greater than the values of profile 1 (yellow). The areas Pos. 1 and 10 of the cross section show values that are above-average. The bending moduli are lower than the tension moduli, because of the shear force influence. Fig. 7 shows the maximum outer fiber strain and elongation.

Abb. 6 zeigt, dass die E-Moduln bei Biegung und Zug über den Profilquerschnitt schwanken. Die Werte von Profil 2 (grün) schwanken weniger. Sie liegen meist deutlich über denen von Profil 1 (gelb). Die Bereiche Pos. 1, 10 des Profilquerschnittes besitzen bei Profil 1 und 2 überdurchschnittlich hohe Werte. Die Biege-Moduln sind durch den Querkrafteinfluss kleiner als die Zug-Moduln. Abb. 7 zeigt die Ergebnisse für die Bruchdehnungen.

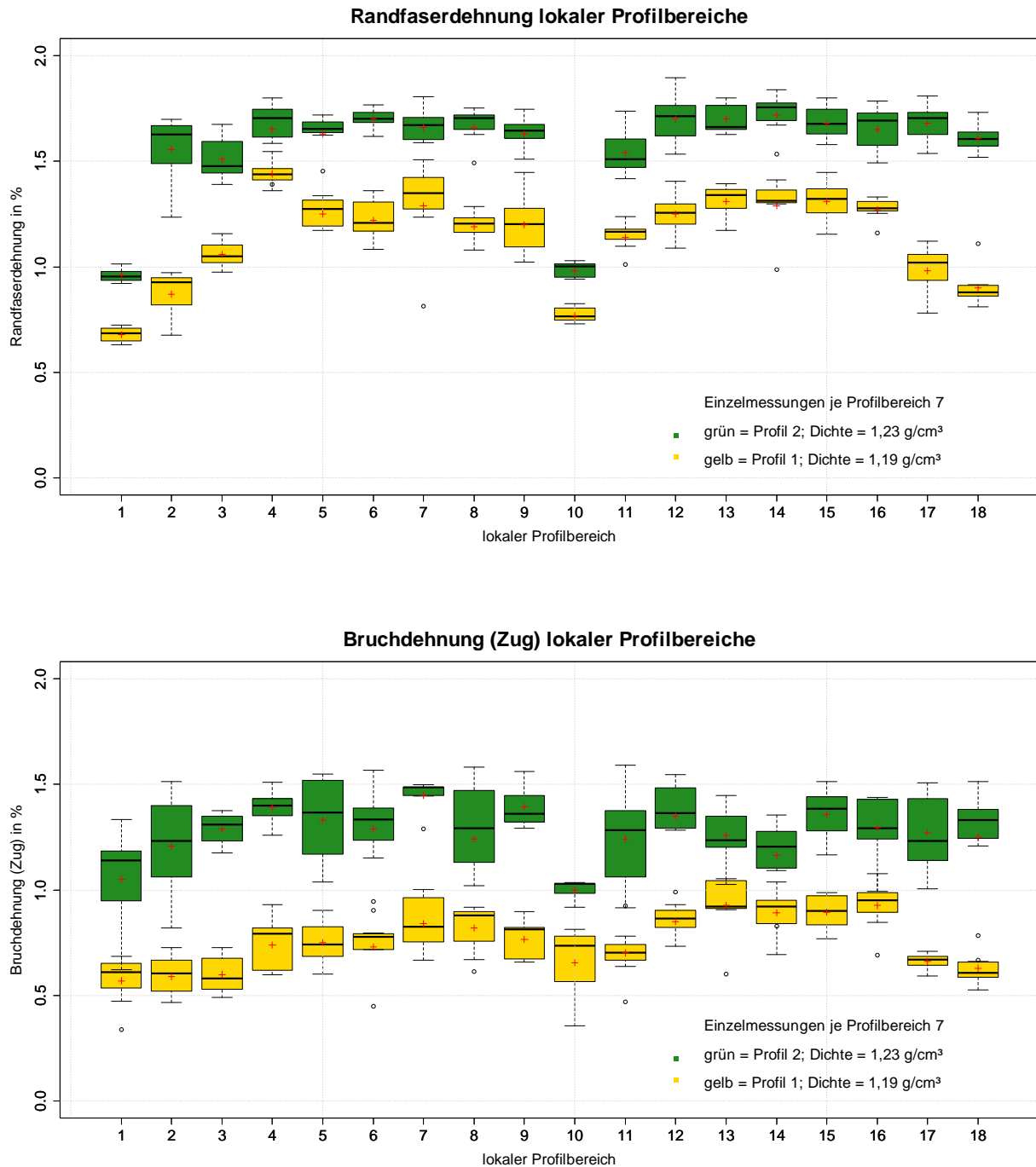


Fig. 7 / Abb. 7: Maximum outer fiber strain and elongation of the material samples for three-point bending and tension / Maximale Randfaser- und Bruchdehnung der Materialproben bei Dreipunktbiegung und Zug

Fig. 7 shows that the critical strains during tension and particularly during bending fluctuate strongly over the cross section. The values from profile 2 (green) fluctuated less. They show greater scattering during bending. The values for profile 2 generally much greater than the values of profile 1 (yellow). The areas Pos. 1 and 10 of the cross section from profiles 1 and 2 have exceptionally low values. The critical strains are determined with a heigher level during bending, because of the shear force influence.

Abb. 7 zeigt, dass die kritischen Dehnungen bei Zug und vor allem bei Biegung über den Profilquerschnitt stark schwanken. Die Werte von Profil 2 (grün) schwanken weniger. Sie besitzen aber größere Streuungen bei Biegung. Die Werte von Profil 2 liegen meist deutlich über denen von Profil 1 (gelb). Die Bereiche Pos. 1, 10 des Profilquerschnittes besitzen bei Profil 1 und 2 überdurchschnittliche niedrige Werte. Die Dehnungen bei Biegung werden durch Querkrafteinflüsse größer.

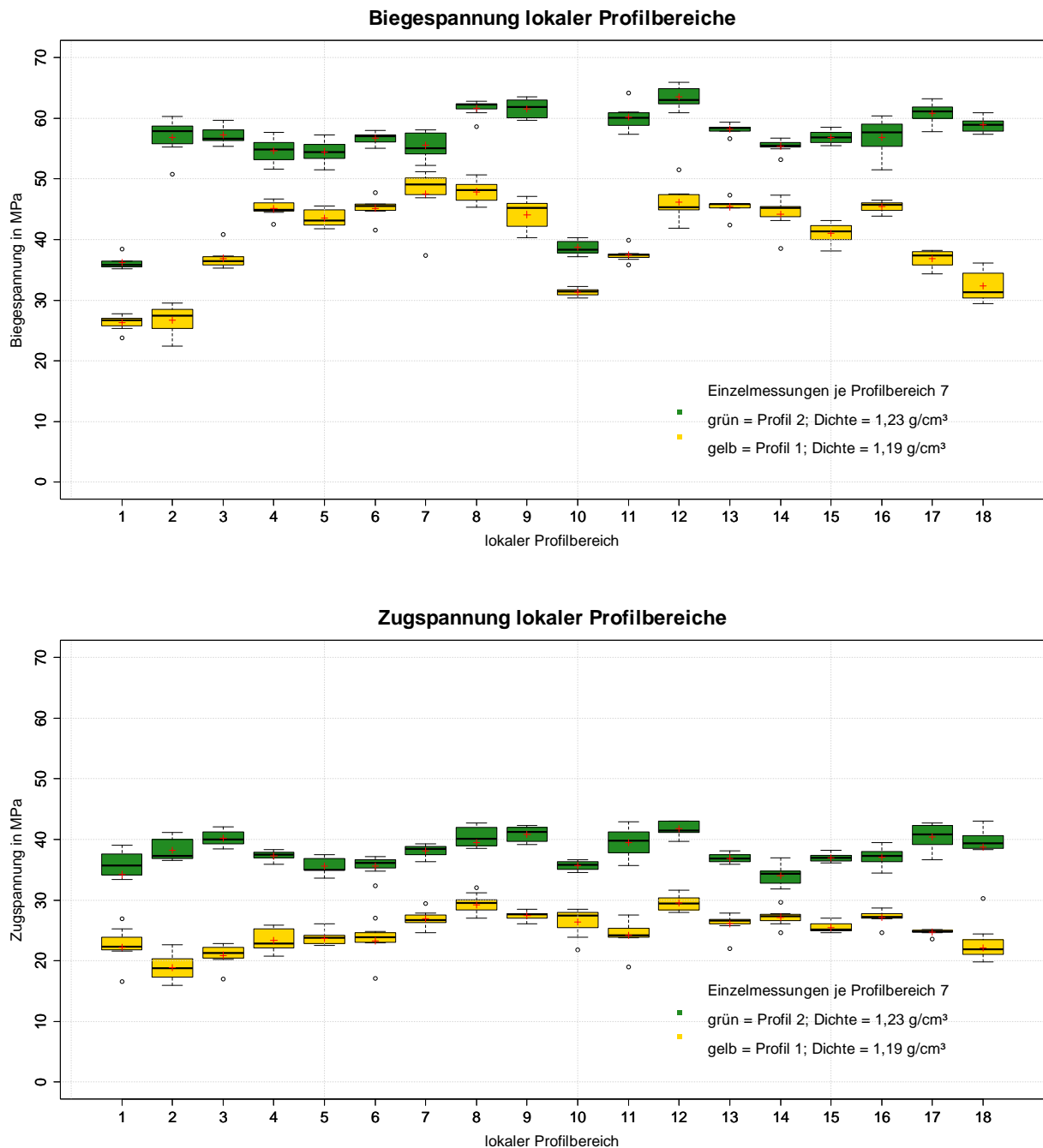


Fig. 8 / Abb. 8: Maximum bending and tension stress of the material samples for three-point bending and tension / Maximale Biege- und Zugspannungen der Materialproben bei Dreipunktbiegung und Zug

Fig. 8 shows the results of the maximum stress. The values fluctuate strongly, particularly during bending. The values from profile 2 (green) fluctuate less. The values from profile 2 are generally greater than the values of profile 1 (yellow). The areas Pos. 1 and 10 (cp. Fig. 4) of the cross section from profiles 1 and 2 have exceptionally low values.

Fig. 9 summarizes the tests of the 18 single areas of the cross section during bending and tension for the elastic modulus, the maximum strain and the breaking stress, in one test group, respectively. The boxplots represent $18 \times 7 = 126$ single tests ($n = 126$) respectively.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse für die Bruchspannungen. Vor allem bei Biegung schwanken diese über den Profilquerschnitt stark. Die Werte von Profil 2 (grün) schwanken weniger. Die Werte von Profil 2 liegen meist deutlich über denen von Profil 1 (gelb). Die Bereiche Pos. 1, 10 (vgl. Abb. 4) des Profilquerschnittes besitzen bei Profil 1 und 2 weit überdurchschnittliche niedrige Werte.

Abb. 9 fasst die Messungen der einzelnen 18 Stellen im Profilquerschnitt für den E-Modul, die kritischen Dehnungen und die Bruchspannungen bei Biegung und Zug jeweils in eine Messreihe zusammen. Die Boxplots repräsentieren jeweils $18 \times 7 = 126$ Einzelversuche ($n = 126$).

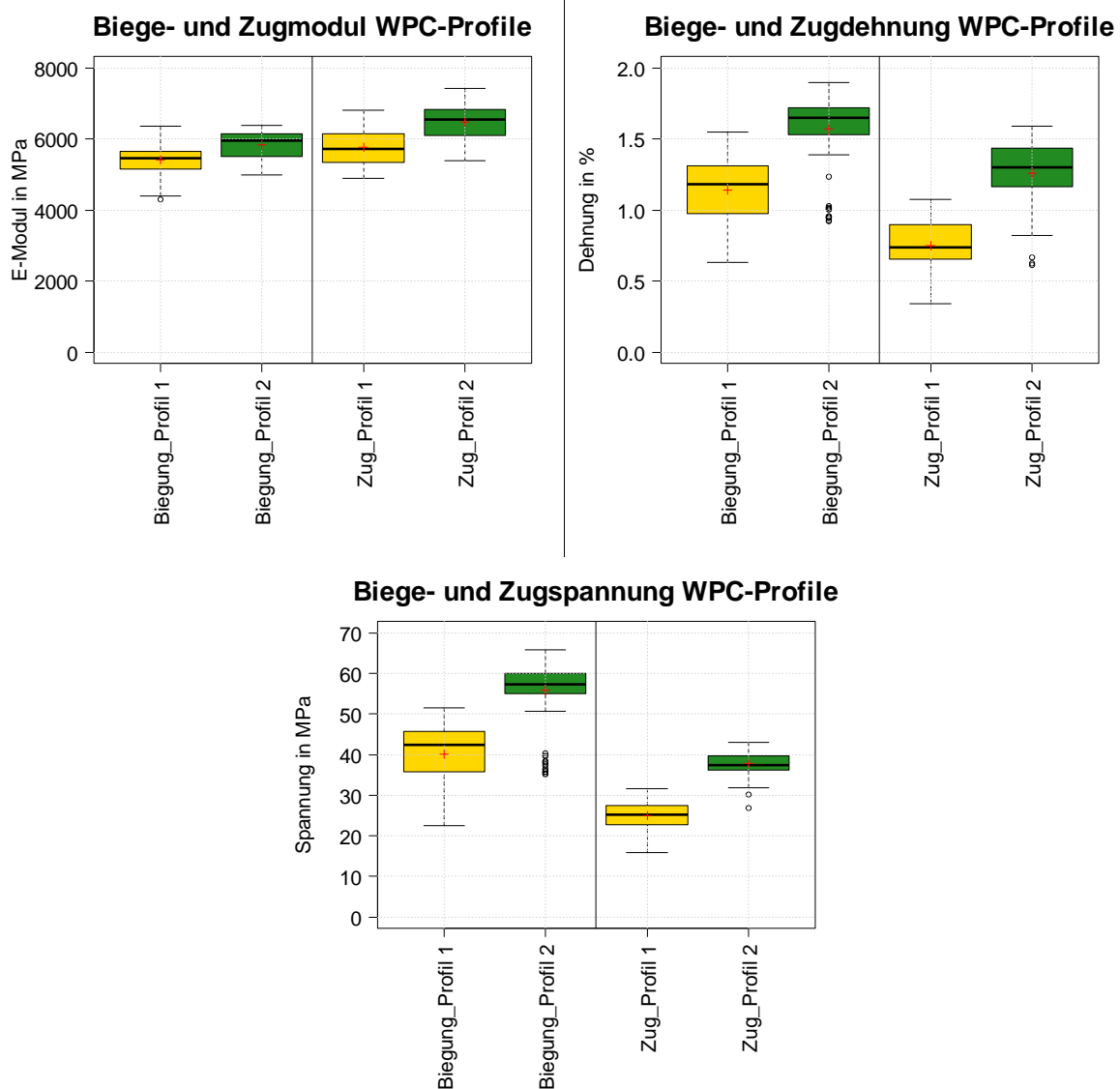


Fig. 9 / Abb. 9: Modulus of elasticity, maximum strain and maximum stress of the material samples for three-point bending and tension / E-Modul, kritische Dehnungen, Bruchspannung der Materialproben bei Dreipunktbiegung und Zug

Fig. 9 shows that between the same borders (vertical blue lines in Fig. 5), as well as under statistical aspects (evaluation concept cp. [5], p. 97-109) there are no differences in the elastic modulus for profiles 1 and 2, bending and tension respectively. There is a tendency for, the values for bending to be lower, because of the shear force influence (shear deformation) during three point bending. The moduli from profile 2 are higher, which is traced back to the modification of the material formulation and the processing parameters. The vertical yellow lines shown in the force - deformation curve of the tension test in Fig. 5 represent the limits out of ISO 527. By using them, the results for the elastic moduli are lower.

The critical strains are equal under statistical aspects for profiles 1 and 2, as well as for bending and tension. The values for Profile 1 tend to be higher values than those for profile 2, which similar to the modulus, can be traced back to the modification of the material formula and the processing parameters. The critical or maximum strain (outer fiber strain) under three point bending is trend to be higher, because the measured deflection consists of unknown parts of bending- and shear deformation (cp. [5], p. 54 - 57). There are no statistical differences for the stresses for profiles 1 and 2, with regard to bending and tension. The statistical decision is more difficult than for the elastic moduli or the maximum strains. The whiskers of the boxplots overlap each other only slightly and without the outlier a decision cannot be made. The values of the stresses for profile 2 are trend to be higher, similar to the modulus and the critical strains, traced back to the modification of the material formula and the processing parameters. The results show, that the stress, calculated conventional of the elastic modulus and the maximum force is inaccurate. More accurate values required a fitted elastic modulus.

Fig. 10 shows the distribution of the critical strain over the cross section of profiles 1 and 2. The averages of the outer fiber strains (bending) from Fig. 7 were used to illustrate this.

These are influenced by shear force. The maximum elongation generally (tension) follows

Abb. 9 zeigt, dass bei vergleichbaren Grenzen (vertikale blaue Linien in Abb. 5) sowie unter statistischen Aspekten (Bewertungskonzept vgl. [5], S. 97 - 109) keine Unterschiede zwischen den E-Moduln von Profil 1 und 2 bzw. denen aus Biegung und Zug bestehen. Tendenziell sind die Moduln aus Biegung geringer, wegen des Schubeinflusses (Schubverformung) bei Dreipunktbiegung. Die Moduln von Profil 2 sind tendenziell höher, was auf die Veränderung der Rezeptur und der Verarbeitungsparameter zurückgeführt wird. Die vertikalen gelben Linien in Abb. 5 bei den Kraft-Verformungskurven des Zugversuches sind die Grenzen aus ISO 527. Bei deren Verwendung resultieren tendenziell niedrigere E-Moduln.

Die kritischen Dehnungen sind unter statistischen Aspekten sowohl für die Profile 1 und 2 als auch für Biegung und Zug gleich. Profil 2 besitzt tendenziell größere kritische Dehnung, was vergleichbar zum E-Modul auf die Veränderung der Rezeptur und der Verarbeitungsparameter zurückgeführt wird. Die kritische Dehnung (Randfaserdehnung) bei Dreipunktbiegung ist tendenziell größer, weil die im Versuch gemessene Durchbiegung aus unbekanntem Anteil der Bieg- und Schubverformung zusammengesetzt ist (vgl. [5], S. 54 - 57). Werden die maximalen Biegespannungen statistisch analysiert existieren zwischen Profile 1 und 2 als auch für Biegung und Zug keine Unterschiede. Die statistische Entscheidung dafür ist aber deutlich schwieriger als bei den E-Moduln und den Dehnungen. Die Whisker der Boxplots überlappen häufig nur leicht und nur durch die Ausreißer ist eine Entscheidung möglich. Profil 2 besitzt auch bei den Spannungen tendenziell größere Werte, was vergleichbar zum E-Modul und den Dehnungen auf die Veränderung der Rezeptur und der Verarbeitungsparameter zurückgeführt wird. Es wird deutlich, dass die konventionell ermittelte Spannung (lineares Model) aus dem Schnittpunkt des E-Moduls mit dem Kraftmaximum ungenau ist. Genauere Werte erfordern einen angepassten E-Modul.

Abb. 10 zeigt die Verteilung der kritischen Dehnungen über den Profilquerschnitt von Profil

the maximum outer fiber strain over the cross section. Based on the critical strain, the fiber-matrix-adhesion inside a fiber-reinforced composite was estimated. Thereby statements about the quality of the material formula and the manufacturing process can be made.

1 und 2. Dafür wurden die Mittelwerte der Randfaserdehnung (Biegung) aus Abb. 7 genutzt. Diese werden durch die Schubbeanspruchung beeinflusst. Die Bruchdehnungen (Zug) besitzen tendenziell den gleichen Verlauf. Anhand der kritischen Dehnung wurde die Faser-Matrix-Haftung des Faserverbundwerkstoffes abgeschätzt. Dadurch sind Aussagen zur Qualität des Herstellungsprozesses und der Rezeptur möglich.

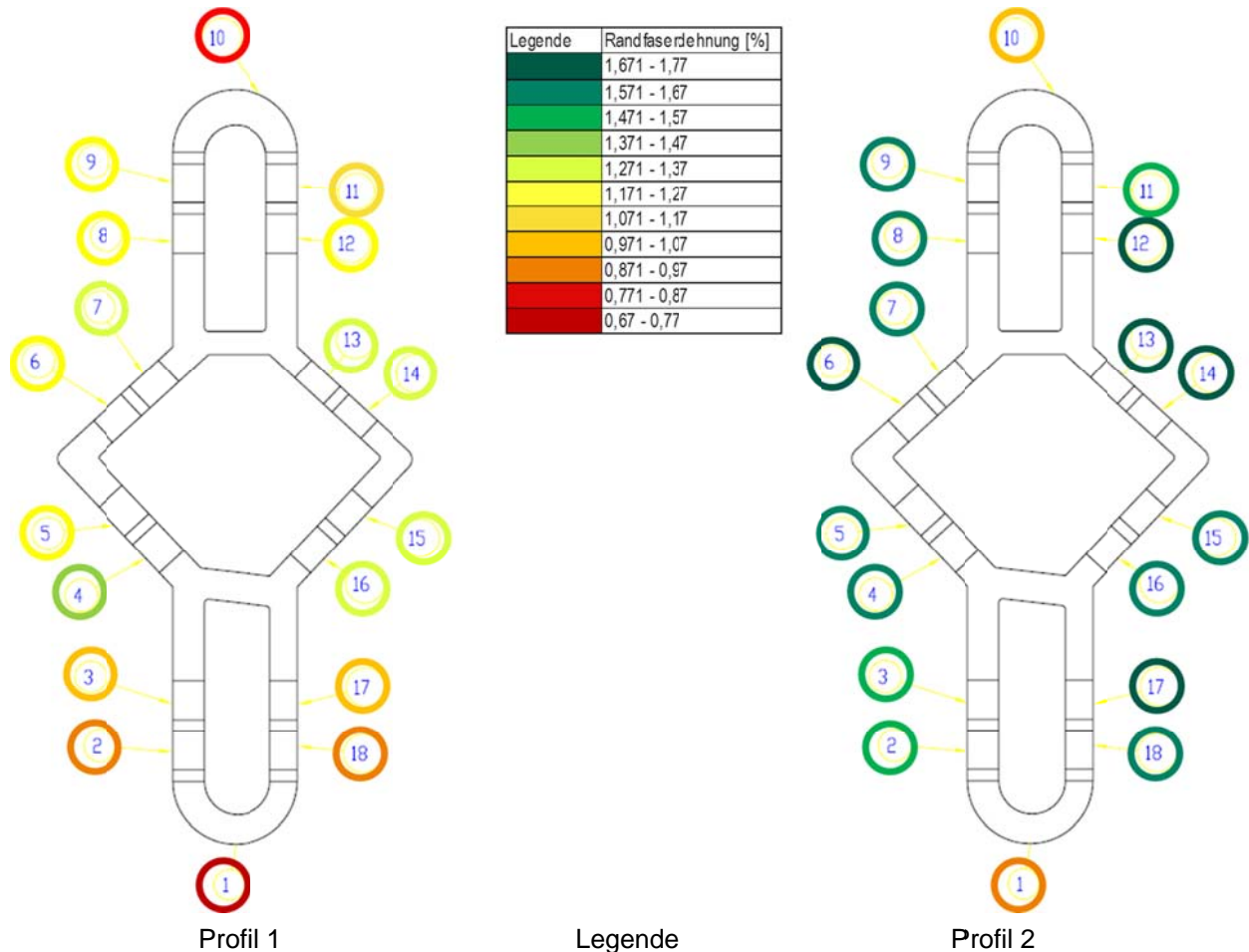


Fig. 10 / Abb. 10: Influence of the processing parameters and the formula to several areas of the cross section / Einfluss der Fertigungsparameter und der Rezeptur auf die einzelnen Bereiche des Profilquerschnittes

Fig. 10 shows, that in both samples, there is a difference within the cross section. The inner areas (4 – 7, 13 - 16) have higher values (approx. factor 2) than the outer areas (1, 10). These areas mark the minimum. Profile 2 minimizes the differences in connection with higher mechanical values, because of a reduction from the average wood fiber length from $0,86 \pm 0,32$ mm to $0,47 \pm 0,18$ mm and changes during the extrusion process (extrusion die, cooling, calibrating unit). It is supposed, that

Abb. 10 zeigt, dass bei beiden Bemusterungen ein Unterschied innerhalb des Profilquerschnittes besteht. Die inneren Bereiche (4 - 7, 13 - 16) haben höhere Werte (ca. Faktor 2) als die äußeren Bereiche (1, 10). Diese kennzeichnen die Minima. Im Profil 2 wurden durch eine Verringerung der mittleren Faserlänge von $0,86 \pm 0,32$ mm auf $0,47 \pm 0,18$ mm und Veränderungen im Extrusionsprozess (Werkzeug, Kühlung, Kalibrierung) die Unterschiede minimiert und die mechanischen Kenn-

the change of the wood fiber content superficially led to heighter mechanical properties in the areas of the profile.

The changes of the extrusion die, the calibrating unit and the cooling, fit with the homogeneous quality all across the cross section.

werte erhöht. Es wird angenommen, dass die Veränderung der Faserlänge vordergründig zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in den Profildbereichen führte. Die Anpassung der Kalibrierung, des Werkzeuges und der Kühlung führten vordergründig zu gleichmäßigeren Eigenschaften im Profilquerschnitt.

4.2. Test 2 – Construction element studies / Versuch 2 - Bauteiluntersuchungen

Tab. 1 shows the details of the test series of all construction element studies. Three different spans were tested (440 mm, 940 mm, 1440 mm) and two heights (92 mm, 190 mm). The height of 190 mm marks the installation position (height side, see Fig. 4 and [4], p. 13) of the sectional WPC-beam with tribologic value as a sliding rail inside the conveyor system. The seven span ratios (span/height) from 2,2 to 15,7 mark the different shear force influences to the mechanical properties. The material studies (bending, test 1) were carried out with a span ratio from $120/8,3 = 14,5$ to $120/6,6 = 18,2$. Test series 3 (A_1440_092) is the transmission point to the material studies, because of a comparable span ratio. For further statements on the serviceability and long term usability tests were carried on pre stressed profiles.

Before the three point bending test, the samples of test series 7 and 8 (C_0440_190, C_0940_190) were pre stressed in the overhead conveyor system (cp. Fig. 2 and [4], p. 18).

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Bauteiluntersuchungen. Es wurden drei unterschiedliche Stützweiten (440 mm, 940 mm, 1440 mm) und zwei Bauteilhöhen (92 mm, 190 mm) getestet. Die Höhe 190 mm kennzeichnet die Einbauposition (hohe Seite, vgl. Abb. 4 und [4], S. 13) des Trag- und Gleitprofils im Hängefördersystem. Die sieben verschiedenen Stützweitenverhältnisse (Stützweite/Höhe) von 2,2 bis 15,7 kennzeichnen den unterschiedlichen Schubeinfluss auf die mechanischen Kennwerte. Die Materialversuche (Biegung, Versuch 1) wurde mit einem Stützweitenverhältnis von $120/8,3 = 14,5$ bis $120/6,6 = 18,2$ durchgeführt. Die Messreihe 3 (A_1440_092) ist aufgrund eines vergleichbaren Stützweitenverhältnisses der Übertragungspunkt zu den Materialversuchen. Für weitere Aussagen zur Dauergebrauchsfähigkeit wurden Versuche mit vorbeanspruchten Profilen durchgeführt. Die Proben der Messreihen 7 und 8 (C_0440_190, C_0940_190) wurden vor dem Dreipunktbiegetest im Hängefördersystem beansprucht (vgl. Abb. 2 und [4], S. 18).

Tab. 1: Details of the test series / Details der Messreihen

test series / Messreihe	span / Stützweite	load case / Lastfall	Profile 1, 2	span/height / Stützweite/Höhe	notation / Bezeichnung
1	440 mm	flat side / flache Seite	Profile 1	$440/92 = 4,8$	A_0440_092
2	940 mm			$940/92 = 10,2$	A_0940_092
3	1440 mm			$1440/92 = 15,7$	A_1440_092
4	440 mm	height side	Profile 1	$440/190 = 2,3$	B_0440_190
5	940 mm	(installation		$940/190 = 4,9$	B_0940_190
6	1440 mm	position, see		$1440/190 = 7,6$	B_1440_190
7	440 mm	Fig. 4, and [4],	Profile 1 (prestressed / vorbeansprucht)	$440/190 = 2,3$	C_0440_190
8	940 mm	p. 15) hohe Seite		$940/190 = 4,9$	C_0940_190
9	440 mm	(Einbauposition vgl. Abb. 4, und [4], S. 15)	Profil 2	$440/190 = 2,3$	D_0440_190

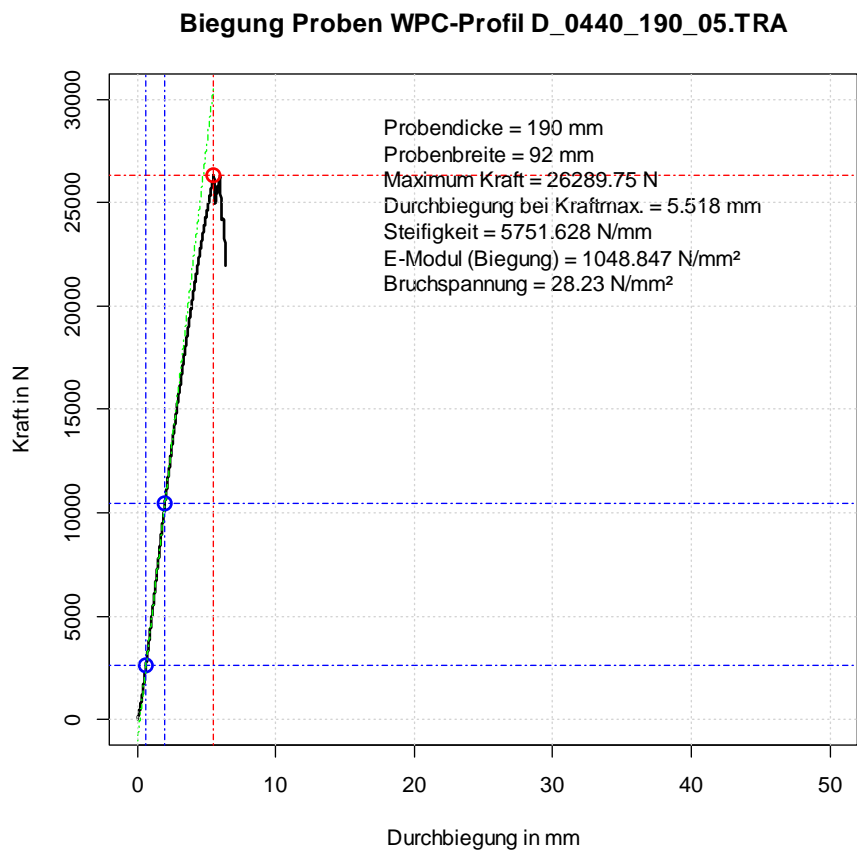
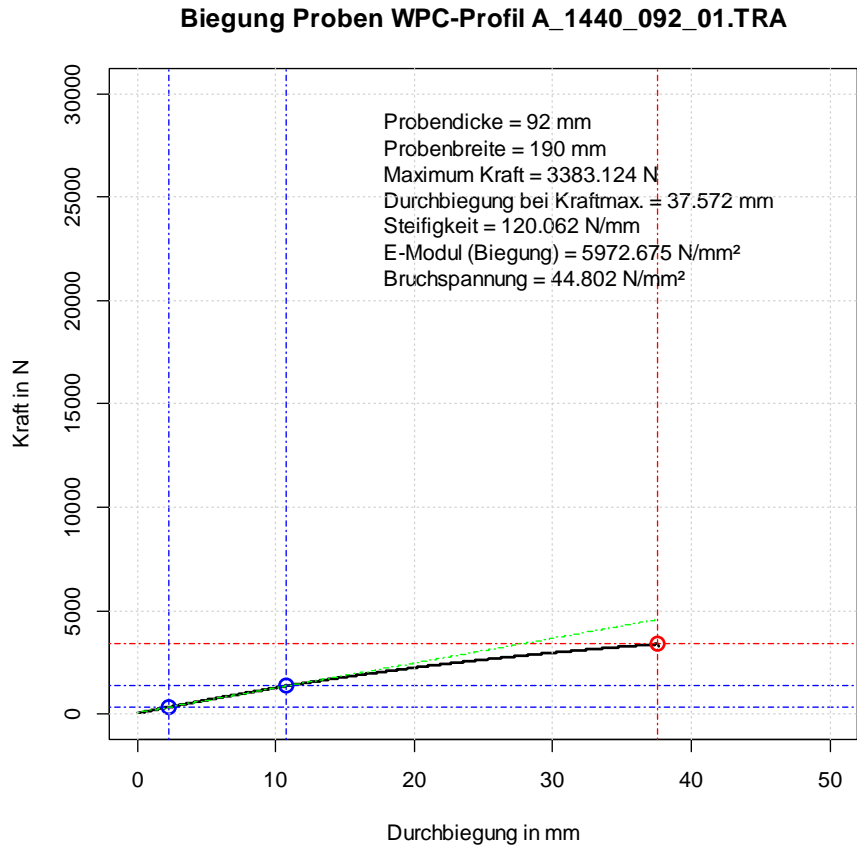


Fig. 11 / Abb. 11: Typical force-deformation curves of the construction element samples for three-point bending / Typische Kraft-Verformungskurven der Bauteilproben bei Dreipunktbiegung

The behavior of the construction element under load is nonlinear elastic till failure. Plastic deformations were not observed. Fig. 11 shows two characteristic analysis graphics for the three point bending test. The analysis was made as in the material tests (test 1). The green, red and blue points and lines illustrate the future analysis. The modulus of elasticity (green line) in Fig. 11 was determined using the blue points. The red point marks the failure and the force maximum. The point of intersection of the green and the red horizontal lines complies with the maximum stress, using the linear model. The maximum strains were determined using the deformation (tension) and out of the length change of the outer fiber (bending). All analysis plots use a boxplot with 1,5 IQR, complemented with the mean (+).

When comparing boxplots it is important to consider that based on the various sample sizes ($n = 126$ material studies vs. $n = 5$ construction element studies) there must be a mistake. This mistake will be subsequently neglected.

Fig. 12 shows the results for the elastic moduli of the material studies (test 1) and the construction element studies (test 2).

Die Bauteile verhalten sich bei Belastung nichtlinear elastisch bis zum Versagen. Plastische Verformungen wurden nicht beobachtet. Abb. 11 zeigt zwei charakteristische Auswertungsplots für den Dreipunktbiegeversuch. Die Auswertung erfolgte wie bei den Materialversuchen (Versuch 1). Die grün, rot und blau dargestellten Punkte und Linien illustrieren die weitere Auswertung.

Mit den beiden blauen Punkten in Abb. 11 wurde der E-Modul (grüne Linie) bestimmt. Der rote Punkt markiert das Versagen und das Kraftmaximum. Der Schnittpunkt der grünen und roten horizontalen Linie entspricht der Bruchspannung nach dem linearen Modell. Die Bruchdehnungen wurden aus der Längenänderung der Randfaser bestimmt. Alle Auswertungen nutzen Boxplots mit 1,5 IQR, ergänzt durch den Mittelwert (+).

Beim Vergleich mittels Boxplots ist zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Stichprobengröße ($n = 126$ Materialuntersuchungen vs. $n = 5$ Bauteiluntersuchungen) ein Fehler existiert. Dieser Fehler wird nachfolgend vernachlässigt.

Abb.12 zeigt die Ergebnisse für die E-Moduln der Materialuntersuchungen (Versuch 1) und der Bauteiluntersuchungen (Versuch 2).

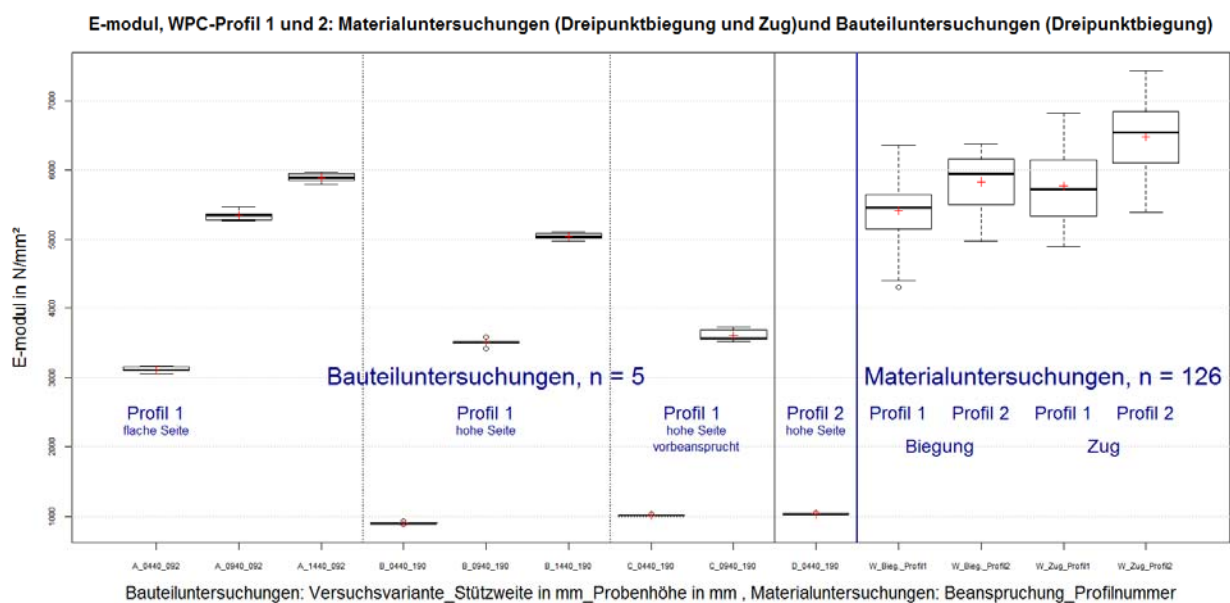


Fig. 12 / Abb. 12: Modulus of elasticity of the construction element tests (three-point bending) and the material tests (three-point bending, tension) / E-Moduln der Bauteiluntersuchungen (Dreipunktbiegung) und der Materialuntersuchungen (Dreipunktbiegung, Zug)

Fig 12 shows that the elastic moduli (flexural spare moduli) of the construction element test fluctuate strongly over the span. The single test series are statistically different (valuation concept cp. [5], p. 97-109). The pre-stress has no influence on the elastic moduli by width span (test series: B_0940_190 vs. C_0940_190). During height shear force influence (test series: B_0440_190 vs. C_0440_190) an influence can be detected. There is no influence between profiles 1 and 2 (test series: B_0440_190 vs. D_0440_190).

The scattering inside the test series of the construction element studies are low in comparison with the material studies. A transfer between construction element studies (test 2) and material studies (test 1) is possible for a span ratio (span/height) heighter than 7 for profile 1 (test series: A_0940_092, A_1440_092, B_1440_190).

Fig. 13 shows the results for the maximum strain of the construction element studies (test 2) and material studies (test 1).

Abb. 12 zeigt, dass die E-Moduln (Biege-Ersatz-E-Moduln) der Bauteiluntersuchungen über die Stützweiten stark schwanken. Die einzelnen Messreihen sind statistisch unterschiedlich (Bewertungskonzept: vgl. [5], S. 97 - 109). Die Vorbeanspruchung hat bei größerer Stützweite (Messreihe: B_0940_190 vs. C_0940_190) keinen Einfluss auf die E-Moduln. Unter starkem Schubeinfluss (Messreihe: B_0440_190 vs. C_0440_190) ist ein Einfluss feststellbar. Zwischen Profil 1 und Profil 2 (Messreihe: B_0440_190 vs. D_0440_190) ist kein Einfluss feststellbar.

Die Streuungen innerhalb der Messgruppen der Bauteiluntersuchungen sind im Vergleich zu den Materialuntersuchungen gering. Eine Übertragung der Kennwerte zwischen den Bauteiluntersuchungen (Versuch 2) und den Materialuntersuchungen (Versuch 1) ist für Stützweitenverhältnisse (Stützweite/Höhe) größer 7, bei Profil 1 (Messreihen: A_0940_092, A_1440_092, B_1440_190) möglich.

Abb. 13 zeigt die Ergebnisse für die Bruchdehnungen der Materialuntersuchungen (Versuch 1) und der Bauteiluntersuchungen (Versuch 2).

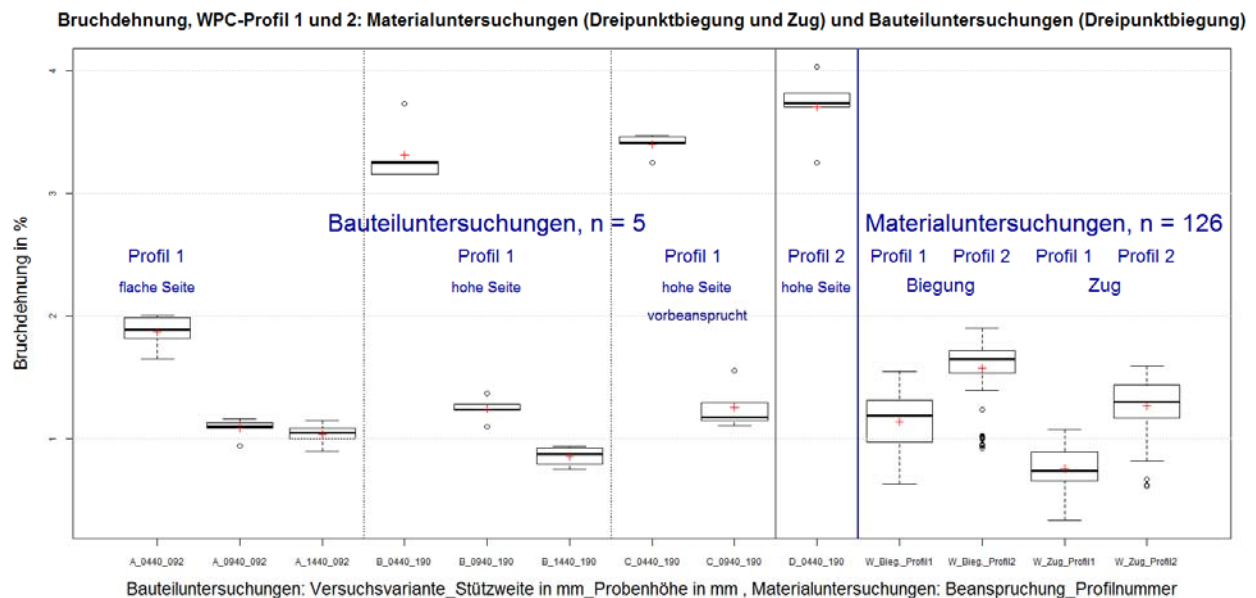


Fig. 13 / Abb. 13: Maximum outer fiber strain or elongation of the construction element tests (three-point bending) and the material tests (three-point bending, tension) / Maximale Randfaser- oder Bruchdehnung der Bauteiluntersuchungen (Dreipunktbiegung) und der Materialuntersuchungen (Dreipunktbiegung, Zug)

Fig. 13 shows, that the maximum strain of the construction element studies are fluctuate strongly over the span ratio. The scattering inside the test series of the construction element studies are low in comparison to the material studies.

For profile 1 there is no statistical difference (evaluation concept cp. [5], p. 97-109) above a span ratio of more than 4,9 (test series: A_0940_092, A_0940_092, B_0940_190, B_1440_190, C_0940_190). Furthermore, at this span ratio, a transfer to the material studies of profile 1 is possible.

The pre-stress according [4] has with a heighter span ratio (test series: B_0940_190 vs. C_0940_190) no influence to the maximum strain.

Under the influence of height shear force (test series: B_0440_190 vs. C_0440_190) no influence is detectable because of the outliers. The shear deformation forges the determined maximum strain of the three test series.

No influence detectable between profile 1 and profile 2, because of the outliers.

Fig. 14 shows the results for the maximum stress of the material studies (test 1) and the construction element studies (test 2).

Abb. 13 zeigt, dass die Bruchdehnungen der Bauteiluntersuchungen über die Stützweiten stark schwanken. Die Streuungen der Bauteiluntersuchungen innerhalb der Messgruppen sind im Vergleich zu den Materialuntersuchungen gering.

Bei Profil 1 ist ab einem Stützweitenverhältnis (Stützweite/Höhe) größer 4,9 (Messreihen: A_0940_092, A_0940_092, B_0940_190, B_1440_190, C_0940_190) kein statistischer Unterschied (Bewertungskonzept: vgl. [5], S. 97 - 109) feststellbar. Zudem ist ab diesem Stützweitenverhältnis eine Übertragung zu den Materialversuchen bei Profil 1 möglich.

Die Vorbeanspruchung nach [4] hat bei größerer Stützweite (Messreihe: B_0940_190 vs. C_0940_190) keinen Einfluss auf die Bruchdehnungen.

Unter starkem Schubeinfluss (Messreihe: B_0440_190 vs. C_0440_190) ist aufgrund der Ausreißer kein Einfluss feststellbar. Die Schubverformung verfälscht bei allen drei Messreihen die ermittelte Randfaserdehnung.

Zwischen Profil 1 und Profil 2 (Messreihe: B_0440_190 vs. D_0440_190) ist aufgrund der Ausreißer kein Einfluss feststellbar.

Abb. 14 zeigt die Ergebnisse für die Bruchspannungen der Materialuntersuchungen (Versuch 1) und der Bauteiluntersuchungen (Versuch 2).

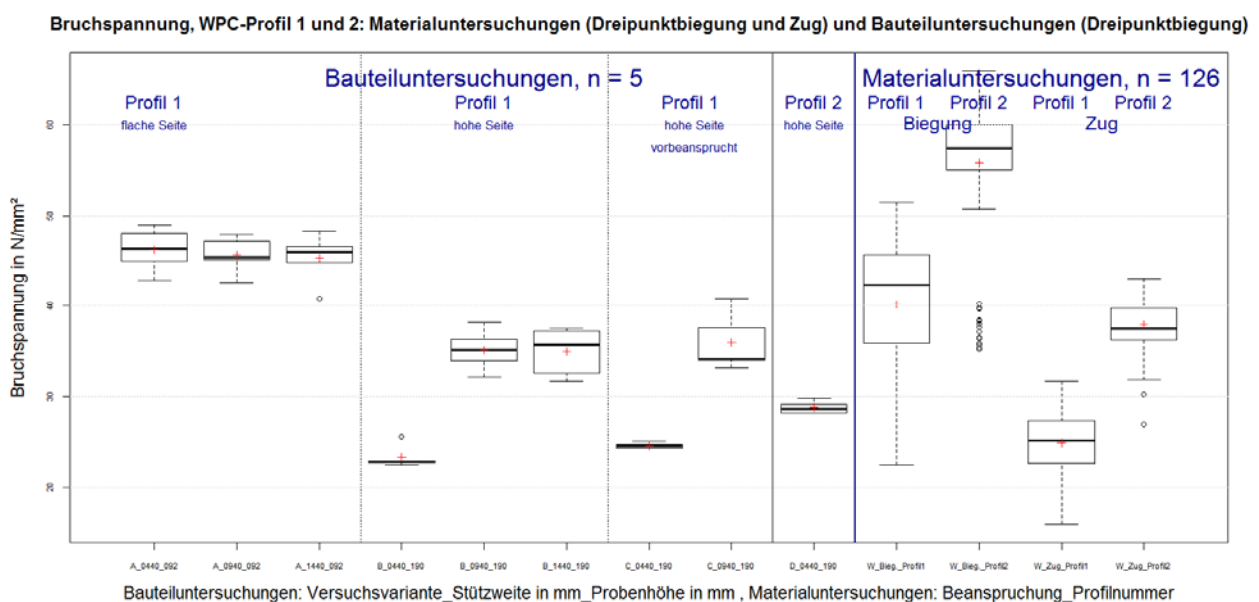


Fig. 14 / Abb. 14: Break stress of the construction element tests (three-point bending) and the material tests (three-point bending, tension) / Bruchspannungen der Bauteiluntersuchungen (Dreipunktbiegung) und der Materialuntersuchungen (Dreipunktbiegung, Zug)

Fig 14 shows that the maximum stress of the construction element studies fluctuate strongly over the span ratio. The scattering of the construction element studies (test 2) are low in comparison with the material studies (test 1). This applies for inside the test series as well as for the whole parameter field. A transfer between construction element- and material studies is possible for profile 1, because of the great scattering of the material studies. This transfer is not possible for profile 2.

For Profile 1 the test series of the „flat side“ (A_0440_092, A_0940_092, A_1440_092) and the „height side“ (B_0940_190, B_1440_190, C_0940_190) are divided into two different groups. Inside these groups, the test series are equal under statistical aspects (evaluation concept cp. [5], p. 97-109). Between the groups there is a clear difference. The cause is previously unknown. It cannot be explained based on the different behavior of the maximum strain (Fig. 13). It is supposed, that the deviation results from the influence of shear force and the mistake when detecting the bending stress (linear model, cp. statement material studies).

The span ratio (span/height) becomes relevant at a factor of 2,9 (test series: B_0440_190, C_0440_190).

The pre-stress (cp. [4]) has no influence on the maximum stress.

The shear deformation falsifies the determined maximum stress of all the test series less than the maximum strain (cp. Fig. 13).

An influence can be detected between profile 1 and profile 2 (test series: B_0440_190 vs. D_0440_190).

5. Conclusion and perspectives / Zusammenfassung und Ausblick

The material studies (test 1) show the big influence of the processing parameters on the material properties of WPC (e. g. maximum strain cp. Fig. 10). There are large fluctuations over the areas of the cross section from the fully implemented sectional WPC-beam.

This point illustrates a fundamental problem for the characterization of WPC material properties.

Abb. 14 zeigt, dass die Bruchspannungen der Bauteiluntersuchungen über die Stützweiten schwanken. Die Streuungen der Bauteiluntersuchungen (Versuch 2) sind im Vergleich zu den Materialuntersuchungen (Versuch 1) gering. Dies gilt innerhalb der Messgruppen als auch für das ganze Parameterfeld. Eine Übertragung der Bauteil- zu den Materialversuchen ist aufgrund der großen Streuungen der Materialversuche bei Profil 1 immer möglich. Bei Profil 2 ist diese Übertragung nicht möglich.

Bei Profil 1 bilden die Messgruppen der „flachen Seite“ (A_0440_092, A_0940_092, A_1440_092) und die der „hohen Seite“ (B_0940_190, B_1440_190, C_0940_190) jeweils verschiedene Gruppen. Innerhalb dieser Gruppen sind die Messreihen gleich (Bewertungskonzept: vgl. [5], S. 97 - 109). Zwischen beiden Gruppen besteht ein deutlicher Unterschied, dessen Ursache bisher noch unbekannt ist. Sie kann aufgrund des abweichenden Verhaltens der Bruchdehnungen (Abb. 13) nicht geklärt werden. Es wird angenommen, dass die Abweichungen aus dem Schubeinfluss und dem Fehler bei der Ermittlung der Biegespannung (lineares Modell, vgl. Erklärung Materialuntersuchungen) resultieren. Das Stützweitenverhältnis (Stützweite/Höhe) wird erst ab einem Faktor von 2,9 (Messreihen: B_0440_190, C_0440_190) relevant.

Die Vorbeanspruchung (vgl. [4]) hat keinen Einfluss auf die Bruchspannungen.

Die Schubverformung verfälscht bei allen Messreihen die ermittelte Bruchspannungen weniger im Vergleich zu den Randfaserdehnungen (vgl. Abb. 13).

Zwischen Profil 1 und Profil 2 (Messreihe: B_0440_190 vs. D_0440_190) ist ein Unterschied feststellbar.

Die Materialuntersuchungen (Versuch 1) zeigen den großen Einfluss der Fertigungsparameter auf die Materialeigenschaften (z. B. Bruchdehnung, vgl. Abb. 10) von WPC. Die Schwankungen innerhalb des Profilquerschnittes des Trag- und Gleitprofils sind groß. Dies illustriert ein grundsätzliches Problem bei der Charakterisierung der Materialeigenschaften

WPC-formulas are often compared, by using samples out of construction elements (e.g. decking).

For the further use of WPC in the field of mechanical engineering the fluctuations of the material properties must be reduced by reproducible and reliable manufacturing processes. Classifying the detected material properties into the state of the art can for example be done by using source [7], p 42 - 45.

The transferability between the material- and the construction element studies is possible, due to of the great scattering in the material studies. Construction element tests are necessary, to use the full capacity of the WPC because of the described scattering. The transferability can be improved, if:

1. the detected values of the outer areas of the cross section (Pos. 1, 10, cp. Fig. 4) are used for the analysis. The smaller the shear force influence, then the values of tests 1 und 2 should approach each other. Without shear force influence the outer areas (Pos. 1 and 10), of the fully implemented sectional WPC-beam, are essential for the maximum outer fiber strain.
2. the shear force influence is characterized and subsequently considered.

The shear force influence under three point bending has an influence on the material- and construction element studies as follows:

1. a decrease of the elastic moduli and of the maximum stresses, detected during the test.
2. an increase of the maximum strain, detected during the test.

A calculation of WPC-construction elements can be made based on the shown studies, if the maximum strain is used. The shear force influence had to be considered. This action has already been shown (cp. [5], S. 134 - 146) for construction elements made from WVC (Wood Veneer Composite). This kind of calculation presupposes dividing the flexural spare modulus into the elastic- and the shear modulus (cp. [5], S. 58 – 59).

Based on the results shown, the conveyor system with the fully implemented sectional WPC-beam with tribologic value as a sliding rail will be further developed.

von WPC. Häufig werden WPC-Rezepturen verglichen, deren Versuchsproben aus Bauteilen (z. B. Terrassendecks) entnommen werden.

Für den zukünftigen Einsatz von WPC im Maschinenbau müssen die Schwankungen der Materialeigenschaften durch reproduzierbare und prozesssichere Herstellungsprozesse minimiert werden. Eine Einordnung der ermittelten Materialkennwerte in den Stand der Technik ist beispielhaft mit Quelle [7], S. 42 - 45 möglich. Die Übertragbarkeit zwischen Material- und Bauteiluntersuchungen ist aufgrund der großen Streuungen in den Materialuntersuchungen gegeben. Um das WPC besser auszunutzen sind aufgrund der beschriebenen Streuungen Bauteilversuche nötig. Die Übertragbarkeit kann verbessert werden, wenn:

1. die Analyse über die ermittelten Kennwerte aus den äußeren Profilbereichen (Pos. 1, 10, vgl. Abb. 4) im Profilquerschnitt erfolgt. Je geringer der Schubeinfluss, desto weiter sollten sich die Kennwerte aus Versuch 1 und 2 annähern. Ohne Schubeinfluss sind die Randbereiche (Pos. 1, 10) des Trag- und Gleitprofils für dessen kritische Randfaserdehnung entscheidend.
2. der Schubeinfluss charakterisiert und nachfolgend beachtet wird.

Der Schubeinfluss bei Dreipunktbiegung hat folgenden Einfluss auf die dargestellten Material- und Bauteiluntersuchungen bei WPC.

1. Eine Verminderung der im Versuch bestimmten E-Moduln und der Bruchspannungen.
2. Eine Erhöhung der im Versuch bestimmten kritischen Dehnungen.

Eine Berechnung von WPC-Bauteilen kann auf Basis der dargestellten Untersuchung über die kritische Dehnung erfolgen. Der Schubeinfluss sollte beachtet werden. Dieses Vorgehen wurde bei Bauteilen aus WVC (Wood Veneer Composite) gezeigt (vgl. [5], S. 134 - 146). Diese Art Berechnung setzt eine Trennung des Biege-Ersatz-E-Moduls in den E- und G- Modul (vgl. [5], S. 58 – 59) voraus.

Aufbauend auf den dargestellten Ergebnissen wird das Hängesystem mit kompletten Trag- und Gleitprofil aus WPC weiterentwickelt.

6. Acknowledgment / Danksagung

The authors would like to thank the Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) for the financial funding of the research project.

We would also like to thank the research partners AKE Systemtechnik GmbH Reinsdorf (overhead conveyor system) and NOVO-TECH GmbH & Co. KG Aschersleben (manufacturing of the fully implemented sectional WPC-beam with the tribologic value as a sliding rail).

Die Verfasser bedanken sich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten. Weiterer Dank gilt den Projektpartnern, der AKE Systemtechnik GmbH Reinsdorf (Hängefördersystem) und der NOVO-TECH GmbH & Co. KG Aschersleben (Herstellung des kompletten Trag- und Gleitprofil aus WPC) für die Zusammenarbeit.

7. References / Quellen

- [1] Eichhorn, S. et al.: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der Intralogistik durch neue Systemkomponenten, Tagungsband "Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabriksysteme - VPP2012 - Vernetzt planen und Produzieren & Symposium Wissenschaft und Praxis", S. 239-248, ISSN 0947-2495, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-99946>
- [2] Eichhorn, S.; Clauß, B., Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC / Characterising studies of WPC behaviour focusing friction and wear 21. Technomer - Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, 12. bis 14. November 2009. - Chemnitz: TU, Hausdruckerei, 2009, Seite 57, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-200901840>
- [3] Eichhorn, S. et al.: Untersuchungen zur Tribologie und zur Dauergebrauchsfähigkeit hochgefüllter WPC für den Einsatz als Maschinenbaukomponente Tagungsband / Investigations to the tribological behavior of heightly filled WPC in functional machine elements, narotech 2012, 9. Internationales Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-95416>
- [4] Eichhorn, S. et al.: Entwicklung eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC (Wood Polymer Composite) für ein Hängefördersystem / Development of a fully implemented sectional WPC-beam with the tribologic value as sliding rail for the use in an overhead conveying system, Tagungsband Technomer 2013, 23. Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, S. 61, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-129718>
- [5] Eichhorn, S.: Berechnungsansatz für Strukturbauteile aus Holzfurnierlagenverbundwerkstoff – WVC / Calculation approach of structures made from Wood Veneer Composite– WVC, Dissertation, TU Chemnitz, Professur Fördertechnik, Onlineveröffentlichung auf dem sächsischen Dokumenten- und Publikationsserver Qucosa, 2013, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-106007>
- [6] DIN EN, 310, August 1993: Holzwerkstoffe Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
- [7] Institut für Polymertechnologien e.V.: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Herstellung von WPC - VuV-WPC, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 22041811, 2013, <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22041811.pdf>