

Diploma Thesis

# **Bond Behavior of CFRP Rods in UHPC**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## **Verbundverhalten von CFK-Stäben in UHPC**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer  
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Florian Suppanz, BSc**

Matr.Nr.: 00928746

unter der Anleitung von

Univ.Prof. BSc Dipl.-Ing. Dr.techn. **Benjamin Kromoser**

Institut für Tragkonstruktionen  
Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, im Juli 2019

---

## Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser BSc für die Unterstützung und Begleitung dieser Diplomarbeit.

An der TU Wien möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Herbert Pardatscher, Dipl.-Ing. Philipp Preinstorfer und Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer für die Mithilfe und Anleitung bei der Herstellung der Versuchskörper bedanken.

Ebenso gilt mein Dank an der BOKU Wien Herrn Dipl.-Ing. Matthias Braun BSc, Dipl.-Ing. Mathias Hammerl BSc, Dipl.-Ing. Emanuel Strieder BSc, Dipl.-Ing. Oliver Zeman, Duro Petricevic, Yusuf Özalp, Frau Bakk.techn. Dipl.-Ing. Lisa-Maria Czernuschka und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Marco Marcon für die Mithilfe und Unterstützung bei der Organisation und Durchführung der Versuche ebendort.

## Kurzfassung

Ultrahochfester Beton (Ultra High Performance Concrete - UHPC) mit Bewehrung aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) könnte bei bestimmten Anwendungen Vorteile gegenüber dem derzeit eingesetzten Stahlbeton aufweisen, befindet sich derzeit allerdings noch im Forschungsstadium. Insbesondere die hohe Zugfestigkeit und Korrosionsresistenz von CFK-Bewehrung verspricht bei einem Einsatz als Betonbewehrung potenzielle Materialersparnisse und Verbesserungen der Dauerhaftigkeit der Betonbauteile. In dieser Arbeit wird anfangs ein kurzer Überblick über die Herstellung und Eigenschaften dieser beiden Materialien und die möglichen Vorteile ihrer Kombination präsentiert.

CFK-Bewehrungsstäbe werden in Varianten mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit hergestellt und bieten in ihrem Verbundverhalten verschiedene Vor- und Nachteile bezüglich ihrer Verbundfestigkeit und -steifigkeit sowie ihrer Versagensmodi. Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit Stäben mit einer eingefrästen Wendel.

Das Verbundverhalten von CFK-Stäben in Beton ist sowohl für schlaff bewehrte als auch für mit CFK-Stäben vorgespannte Bauteile von Interesse, und möglichst gute Verbundeigenschaften sind für diese Anwendungen wünschenswert. Daher beschäftigt sich in dieser Arbeit auch ein Abschnitt mit der Verbundwirkung von Bewehrungsstäben in Beton und den grundsätzlichen Unterschieden zwischen Stahl- und CFK-Bewehrungsstäben.

Daran anschließend wird eine im FE-Programm ATENA durchgeführte Parameterstudie präsentiert, in der CFK-Stäbe mit unterschiedlichen Oberflächenprofilierungen hinsichtlich ihres Verbundes mit UHPC untersucht wurden.

Abschließend werden in dieser Arbeit zwei Serien von Ausziehversuchen beschrieben, die mit drei selbst hergestellten Stabvarianten und zwei von Herstellern bezogenen CFK-Bewehrungsstabtypen durchgeführt wurden. Die Versuchsergebnisse werden mit den Berechnungsergebnissen aus ATENA 2D und den Ergebnissen früherer Studien verglichen. Alle geprüften Stäbe erreichten einerseits höhere mittlere Verbundfestigkeiten als vorangegangene Versuche an der TU Wien mit den teils gleichen Materialien, andererseits wurden in den Versuchen auch teilweise niedrigere Verbundfestigkeiten erreicht als in ähnlichen Versuchen an anderen Forschungseinrichtungen.

## Abstract

Ultra-high-performance concrete (UHPC) with reinforcement made of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) could have several advantages compared to conventional steel-reinforced normal-strength concrete for certain applications. This combination of materials is still being developed though, and has only been used in relatively few projects. Especially the high tensile strength and corrosion resistance of CFRP reinforcement is of value in concrete and could lead to savings in materials used as well as higher durability of concrete members. A brief overview of the manufacturing process and key properties of these materials and the possible advantages of their combination is presented in the first chapters of this thesis.

CFRP reinforcing rods are manufactured in variants exhibiting various surface geometries and thus have different advantages, disadvantages and other characteristics with respect to their bond behavior. This thesis primarily covers rods with cut helical grooves.

The bond behavior of CFRP rods is of interest for both non-prestressed and prestressed concrete members and good bond properties are desirable for both of these applications. This thesis presents a brief summary of literature on the bond behavior of reinforcing rods in concrete and the differences between steel and CFRP rods.

A parametric study of different numerically modelled groove geometries on CFRP rods with respect to their influence on bond behavior in UHPC is then presented and its results discussed. The calculations for this study were done in the FE-program ATENA 2D and yielded results which agreed with test results obtained later to varying degrees.

Finally, two series of pull-out tests conducted with three chosen variants of grooved rods and two commercially available rod types are presented. The results are compared to the results obtained from the numerical models as well as similar tests carried out in former work at TU Wien. All tested rods achieved higher maximum mean bond stresses on average than those tested before at TU Wien using the same materials in some cases. However, these test specimens also achieved lower peak bond strengths than those used in similar tests conducted elsewhere.

## Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Materialien .....	8
2.1	Ultrahochfester Beton (UHPC) .....	8
2.1.1	Herstellung .....	8
2.1.2	Verhalten auf Druck.....	8
2.1.3	Verhalten auf Zug .....	9
2.1.4	Dauerhaftigkeit.....	9
2.2	Stäbe aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) .....	10
2.2.1	Herstellung .....	11
2.2.2	Mechanische Eigenschaften .....	12
2.2.3	Dauerhaftigkeit.....	14
3	Verbundverhalten von Bewehrungsstäben in Beton .....	15
3.1	Äußerer Verbund.....	15
3.1.1	Adhäsion und Reibung.....	16
3.1.2	Mechanischer Verbund .....	16
3.2	Innerer Verbund .....	17
3.3	Prüfkörper für Ausziehversuche.....	19
3.4	Ergebnisse vorangegangener Verbundversuche.....	20
4	Modellberechnungen in ATENA 2D .....	21
4.1	Modell .....	21
4.2	Variierte Parameter .....	28
4.3	Ergebnisse.....	30
4.4	Kritik .....	40
4.5	Auswahl der Stabgeometrien für die Versuche .....	42
5	Versuche .....	45
5.1	Erste Versuchsreihe – 80 mm und 100 mm Würfel .....	46
5.1.1	Herstellung der Prüfkörper.....	47
5.1.2	Materialeigenschaften .....	50
5.1.3	Versuchsaufbau .....	51
5.1.4	Ergebnisse.....	52
5.2	Zweite Versuchsreihe – 150 mm Würfel.....	64
5.2.1	Herstellung der Prüfkörper.....	64
5.2.2	Materialeigenschaften .....	68

5.2.3	Versuchsaufbau .....	68
5.2.4	Ergebnisse.....	74
6	Vergleich der Ergebnisse .....	90
6.1	Vergleich der ersten und zweiten Versuchsreihe .....	91
6.1.1	Glatte Stäbe.....	91
6.1.2	Stäbe mit $\alpha_W=20^\circ$ , kleinerer Fräsung .....	91
6.1.3	Stäbe mit $\alpha_W=15^\circ$ , kleinerer Fräsung .....	92
6.1.4	Stäbe mit $\alpha_W=15^\circ$ , größerer Fräsung .....	93
6.1.5	Beklebte Stäbe.....	94
6.1.6	C4R-Stäbe .....	95
6.1.7	Schlussfolgerungen.....	96
6.2	Vergleich der Versuchsergebnisse und Berechnungsergebnisse .....	96
6.2.1	Stäbe mit $\alpha_W=20^\circ$ , kleinerer Fräsung .....	96
6.2.2	Stäbe mit $\alpha_W=15^\circ$ , kleinerer Fräsung .....	98
6.2.3	Stäbe mit $\alpha_W=15^\circ$ , größerer Fräsung .....	99
6.2.4	C4R-Stäbe .....	100
6.2.5	Schlussfolgerungen.....	102
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
Anhang A – Ergebnisse der Modellberechnungen für Einzelzähne und Einzelkerben		
Anhang B – Berechnungsergebnisse einzeln		
Anhang C – Versuchsergebnisse der ersten Versuchsreihe einzeln		
Anhang D – Versuchsergebnisse der zweiten Versuchsreihe einzeln		

## Nomenklatur

$A$	Fläche, Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha_T$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[MPa]
$\alpha_W$	Wendelsteigung	[°]
$b_K$	Kerbenbreite	[mm]
$b_{K\parallel}$	Kerbenbreite längs (parallel zur Stabachse)	[mm]
$d$	Durchmesser	[mm]
$E$	E-Modul	[MPa], [GPa]
$\varepsilon$	Verzerrung, Dehnung	[-], [%]
$f$	Festigkeit	[MPa]
$f_R$	Bezogene Rippenfläche, siehe Kapitel 3.1.2	[-]
$F$	Kraft	[N], [kN], [MN]
$G$	Schubmodul	[MPa], [GPa]
$\Delta h$	Ganghöhe	[mm]
$l_e$	Einleitungslänge für Verbundkräfte, siehe Kapitel 3	[m]
$l_V$	Verbundlänge in Ausziehkörpern, siehe Kapitel 3.3	[mm]
$\nu$	Querdehnzahl, Querkontraktionszahl	[-]
$r_F$	Fräskopfradius	[mm]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$s$	Schlupf	[mm]
$\sigma$	Normalspannung	[MPa]
$t_K$	Kerbentiefe	[mm]
$\tau$	Schubspannung	[MPa]
$\tau_b$	Verbundspannung	[MPa]
$x$	Lagekoordinate	[m]

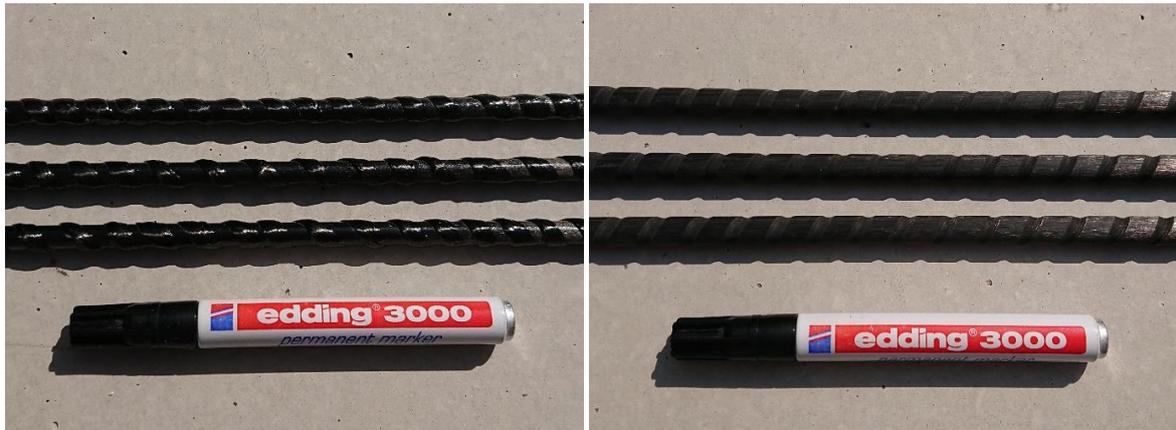
## 1 Einleitung

Die Verwendung von faserverstärktem Kunststoff (FVK, fiber reinforced polymer – FRP) als Bewehrung für Beton ist derzeit für spezielle Anwendungen, die beispielsweise besondere Korrosionsbeständigkeit von Betonbauteilen erfordern, verbreitet. [1] [2]

Die Kombination von carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit ultrahochfestem Beton (ultra high performance concrete – UHPC) verspricht einige besondere Vorteile, befindet sich aber noch im Forschungsstadium. [3] [4] [5] Die besonders hohe Druckfestigkeit von UHPC und hohe Zugfestigkeit von CFK bei gleichzeitig geringem Gewicht könnte sehr schlanke und effiziente Bauteile ermöglichen, [5] dazu ist es aber notwendig, Kräfte effizient von der Bewehrung in den Beton einleiten zu können (bzw. umgekehrt). Anders ausgedrückt muss die verwendete Bewehrung mit dem Beton guten Verbund aufweisen.

Im Unterschied zu Stahlbewehrung in Normalbeton, weisen im Fall von CFK-Stäben in UHPC sowohl der Beton als auch die Bewehrungselemente fast kein duktilen Materialverhalten auf und das Verbundverhalten und die möglichen Versagensformen unterscheiden sich wesentlich. [1] [2] [3] Daher können auch die derzeit für Stahlbewehrung verwendeten Berechnungsmodelle und Konstruktionsregeln nicht direkt übertragen werden.

Um die Kraftübertragung zwischen Beton und CFK-Bewehrungsstäben sicherzustellen, gibt es derzeit unterschiedliche Ansätze von verschiedenen Herstellern von CFK-Stäben, die die Oberfläche der Stäbe auf verschiedene Arten besanden, zusätzliche Fasern aufbringen oder profilieren. [1] [2] [4] [5]



**Abbildung 1-1: CFK-Stäbe mit aufgeklebtem Filamentgarn von S&P (links) und CFK-Bewehrungsstäbe C4R mit eingefräster Wendel von ThyssenKrupp (rechts)**

Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit dem Verbundverhalten von Stäben mit einer eingefrästen Wendel. Es wird zuerst auf die verwendeten Materialien sowie deren Herstellung und Eigenschaften eingegangen, anschließend wird eine in ATENA 2D durchgeführte Parameterstudie zur Auswirkung der Wendelgeometrie auf den Verbund erläutert. Schließlich werden die Ergebnisse von zwei Reihen von Ausziehversuchen vorgestellt, in denen drei verschiedene Stäbe mit selbst gefrästen Wendelgeometrien und zwei von Herstellern erzeugte Bewehrungsstäbe gegenübergestellt werden (Abbildung 1-1).

## 2 Materialien

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die verwendeten Materialien verschafft und die Unterschiede zu normalfestem Beton und üblicher Stahlbewehrung hervorgehoben werden.

### 2.1 Ultrahochfester Beton (UHPC)

Beton ist ein Verbundwerkstoff, der im Allgemeinen aus verschiedenen feinen Zuschlagsmaterialien besteht, die durch eine überwiegend aus hydraulischem Zement erzeugte Bindemittelmatrix aus Zementstein zusammengehalten werden. [1] [6] Er zeichnet sich durch eine hohe Druckfestigkeit und sehr geringe Zugfestigkeit aus. Um die Festigkeit zu erhöhen, werden unter anderem möglichst feste Zuschläge in einer optimierten Korngrößenzusammenstellung verwendet. [7]

Ultrahochfester Beton zeichnet sich in erster Linie durch eine deutlich höhere Druckfestigkeit als bei Normalbetonen aus. Diese und weitere positive Eigenschaften dieses Materials werden durch eine weit höhere Homogenität und Packungsdichte der Bestandteile als bei Normalbeton erreicht, im Gegenzug verliert der Beton allerdings auf Druck, wenn auf die Zugabe von Stahlfasern verzichtet wird, sein quasi-duktilen Verhalten. [7]

#### 2.1.1 Herstellung

UHPC verdankt seine Eigenschaften einem besonders dichten Gefüge von relativ feinen Bestandteilen, wobei Mikrosilika sowohl als Füllstoff für kleinste Zwischenräume als auch als Ersatz für einen Teil des Bindemittels zum Einsatz kommt. „Klassischer“ UHPC wird mit einem Größtkorn von nur etwa 1 mm Größe hergestellt und weist ein Wasser/Bindemittelverhältnis von nur etwa 0,2 auf. [7] Dadurch wird bei der Herstellung der verwendete Zement nicht vollständig hydratisiert, hierzu wäre ein w/b-Wert von etwa 0,4 notwendig. [7] [6]

Um UHPC trotzdem herstell- und verarbeitbar zu machen, war die Entwicklung von Hochleistungsfließmitteln notwendig. Diese basieren auf Polycarboxylethern und ermöglichen trotz der geringen Wasserzugabe die Desagglomeration des Zements und der Mikrosilikabestandteile während des Mischvorgangs. [7]

Zur Beeinflussung der Festigkeit kann UHPC kurz nach dem Betonieren bei 80-90 °C wärmebehandelt werden. Bei diesen höheren Temperaturen reagieren die Mikrosilikabestandteile mit Calciumhydroxid aus dem Zement und bilden zusätzliche festigkeitsbildende Phasen. Die Festigkeit des Betons kann so um zusätzliche 20-30 MPa gesteigert werden. [7]

#### 2.1.2 Verhalten auf Druck

UHPC verhält sich, bedingt durch seine höhere Homogenität und sehr dichtes Gefüge, wesentlich steifer, aber auch spröder als Normalbeton. [7]

Die Druckfestigkeit von UHPC liegt typischerweise zwischen 150 und 200 MPa, höhere Festigkeiten sind aber möglich. Die Arbeitslinie zeigt annähernd lineares Verhalten bis zu etwa 75 % der Bruchlast, mit einem äquivalenten E-Modul von 45-55 GPa. Nach dem Erreichen der Maximallast versagt UHPC schlagartig, wie in Abbildung 2-1 dargestellt ist. [1] [7]

Normalbetone mit Festigkeiten zwischen 20 und 40 MPa verhalten sich zum Vergleich bis zu etwa 35 % ihrer Bruchlast annähernd linear und weisen E-Module im Bereich von 30-35 GPa auf. Allerdings zeigen sie auch ein quasi-plastisches Nachbruchverhalten. [6]

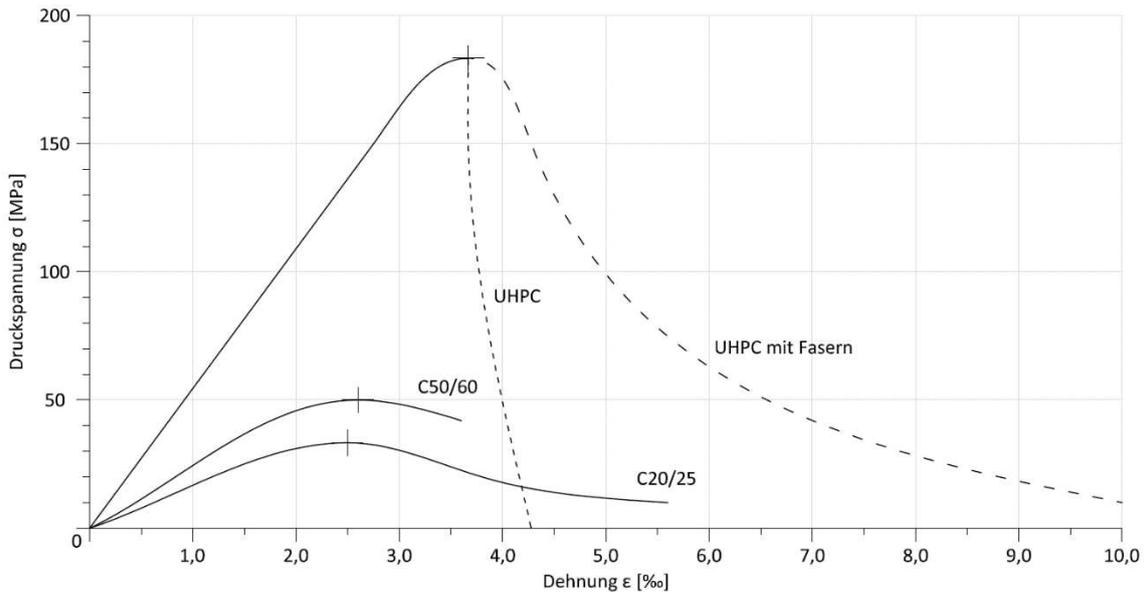


Abbildung 2-1: Arbeitslinien unterschiedlich fester Betone [7] [6]

Um UHPC auch ein Maß an plastischem Verhalten zu verleihen, können dem Beton Stahl- oder auch andere Fasern beigemischt werden. [7]

Die Querdehnzahl liegt sowohl für Normalbeton als auch für UHPC bei 0,2, bei UHPC steigt sie jedoch in der Nähe der Bruchlast durch die Bildung von Mikrorissen stark an. [7] [6]

Die Erhöhung der Druckfestigkeit bei multiaxialem Druck ist bei UHPC weniger ausgeprägt als bei Normalbeton. Bei ausreichend hohem triaxialem Druck verändert sich jedoch die Versagensart von spröde zu duktil. [7]

### 2.1.3 Verhalten auf Zug

UHPC ohne Faserverstärkung verhält sich auf Zug rein linear bis zum Bruch. Aufgrund der hohen Festigkeit der Bindemittelmatrix verlaufen die entstehenden Risse direkt durch sowohl Zementmatrix als auch Zuschlagskörner anstatt wie bei Normalbeton nur durch die Zementmatrix. Dies führt zu sehr glatten Bruchflächen und einem fast vollständigen Fehlen einer sonst möglichen mechanischen Verzahnung innerhalb eines Risses. Deshalb liegt die spezifische Bruchenergie von UHPC auch nur im Bereich von 50 N/m bis 100 N/m für fein- bis grobkörnigen UHPC. [7]

Die uniaxiale Zugfestigkeit von UHPC liegt im Bereich von 7-10 MPa. [7] Bei Biegezugversuchen ist ein signifikanter Größeneinfluss zu beobachten: bei kleinen Prüfkörpern (160×40×40 mm) liegt die Biegezugfestigkeit bei 13-17 MPa, bei größeren (700×150×150 mm) aber nur mehr bei 7-10 MPa. [7]

### 2.1.4 Dauerhaftigkeit

UHPC enthält aufgrund seiner besonders hohen Packungsdichte fast keine Kapillarporen und hat dadurch einen sehr hohen Diffusionswiderstand. Dieser wirkt sich positiv auf die Resistenz gegen CO<sub>2</sub>-Eintrag und damit gegen die Carbonatisierung des Betons sowie gegen das Eindringen von Chloridionen aus Meerwasser oder Streusalz aus. Die Resistenz gegen Schäden aus Frost- und Tauwechsel sowie gegen chemische Angriffe ist ebenfalls sehr hoch. Die Betondeckung für Stahlbewehrung kann deshalb, sofern eines dieser Kriterien maßgebend ist, bei der Verwendung von UHPC deutlich geringer ausfallen als bei Normalbeton. [7]

Zusätzlich tritt an feinen Rissen in UHPC aufgrund des nicht vollständig hydratisierten Zements ein Selbstheilungseffekt aufgrund der Reaktion des Zements an der Rissoberfläche mit der Luftfeuchtigkeit auf. [7]

Allein bei der Feuerresistenz ist anzumerken, dass UHPC eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Normalbeton besitzt und Abplatzungen in Brandversuchen deutlich früher auftreten als bei Normalbeton. Dies wird auf den hohen Diffusionswiderstand des UHPC zurückgeführt, aufgrund dessen die Dissipation des auftretenden Dampfdruckes im Inneren des Bauteils langsamer voranschreitet. Verbesserungen des Verhaltens im Brandfall können durch die Beimengung von Polypropylenfasern und die Verwendung von Basalt- statt Quarzzuschlägen erreicht werden. [7]

## 2.2 Stäbe aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK)

Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) ist ein Verbundwerkstoff, der aus in einer Kunststoffmatrix eingebetteten Kohlefasern besteht. CFK zählt damit zu den Faserverbundwerkstoffen. [8] [9]

Carbonfasern besitzen eine besonders hohe Zugfestigkeit und hohe Steifigkeit bei vergleichsweise geringem Eigengewicht. Sie benötigen aber eine umhüllende Matrix, die die Fasern gegen ein Knicken und ein gegenseitiges Verschieben sichert und vor schädlichen Umwelteinflüssen schützt, um für Bauteile eingesetzt werden zu können. [1] [2] [8]

CFK hat dadurch aber den Vorteil, dass die Fasern in Bauteilen beliebig positioniert und orientiert werden und damit die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden können. Damit können sehr leichte und dabei effiziente Bauteile hergestellt werden. [1] [2] [8] [9]

CFK wurde zuerst in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt, ist aber inzwischen auch in vielen weiteren Anwendungsbereichen, wie für Windturbinen-Flügel oder Sportgeräte, verbreitet. [1] [2] [8] [9]

Neben Kohlefasern werden zur Herstellung von Faserverstärkten Kunststoffen (FVK) auch Glasfasern, Aramidfasern (z.B. Kevlar®) oder Basaltfasern sowie weitere andere, auch natürliche Fasern verwendet. [1] [2] [8]

Für die Bewehrung von Beton wird für spezielle Anwendungen derzeit vor allem glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) in Form verschieden profilierter Stäbe sowie gewobener Matten verwendet. CFK ist weniger verbreitet, jedoch werden von verschiedenen Herstellern auch äquivalente Produkte aus diesem Werkstoff angeboten und es wurden vereinzelt schon CFK-Seile für Vor- und Abspannungen verwendet. CFK-Bauteile sind vor allem aufgrund ihrer hohen Kosten für Neubauten im Bauwesen derzeit nicht weit verbreitet. [1] [2] [9]

CFK-Elemente werden derzeit aber vor allem zur nachträglichen lokalen Verstärkung von Bauwerken eingesetzt. Meist werden dafür CFK-Lamellen an der Oberfläche aufgeklebt oder Bauteile mithilfe von CFK-Spanngliedern nachträglich extern vorgespannt. [1] [2] [9]

Im Allgemeinen ist FVK-Bewehrung, je nach Faser- und Matrixmaterial, weniger steif und weist einen schwächeren Verbund mit Beton auf als Stahlbewehrung, was sich vor allem durch größere Verformungen und größere Rissbreiten bei gleicher Dimensionierung der Bauteile bemerkbar machen würde. Allerdings gibt es Anwendungen, bei denen Stahlbewehrung wesentliche Nachteile gegenüber FVK-Bewehrung aufweist. [1] [2]

FVK benötigt keinen Korrosionsschutz. Während Stahlbewehrung durch eine ausreichende Betondeckung und unter Umständen zusätzliche Schutzmaßnahmen vor Korrosion geschützt werden muss, ist dies bei FVK nicht notwendig. Deshalb wird FVK-Bewehrung für Behälter und Leitungen aus Beton eingesetzt, die besonderen chemischen Angriffen ausgesetzt sind. [1] [2]

Außerdem kann durch diese Eigenschaft die erforderliche Betondeckung stark verringert werden, da nur noch die für die Krafteinleitung notwendige Überdeckung notwendig ist. [1]

FVK ist im Gegensatz zu Stahl nicht magnetisch. Deshalb kann es zum Bewehren von Bauteilen in der Umgebung von magnetisch empfindlichen Geräten (wie etwa MRT-Scannern, großen Elektromotoren oder Eisenbahnanlagen) besser geeignet sein. [1] [2] Kohlefasern sind allerdings im Gegensatz zu etwa Glasfasern elektrisch leitfähig und elektromagnetisch undurchsichtig. [9]

Außerdem ist FVK-bewehrter Beton (speziell GFK-bewehrter Beton) wesentlich leichter abzutragen als Stahlbeton. Dadurch eignet sich FVK-Beton gut für temporäre Bauteile, wie etwa temporäre Stützwände im Tunnelbau, die von Tunnelbohrmaschinen durchbohrt werden können. [1]

Zu den Nachteilen von FVK-Bewehrung zählen unter anderem, dass FVK-Bewehrung sich nicht für den Einsatz als Druckbewehrung eignet und bei FVK-Beton mit den aktuell verfügbaren Produkten nur sehr geringe bis keine Momentenumlagerung in Durchlaufsystemen möglich ist. [1] [2]

### 2.2.1 Herstellung

Für die Herstellung von FVK-Bauteilen können eine Reihe verschiedener Fasern (oder auch Kombinationen verschiedener Fasern) mit einer Reihe verschiedener Kunststofftypen kombiniert werden und es existieren wiederum eine Reihe verschiedener Verfahren zur Herstellung der Bauteile mit jeweils verschiedenen Vorteilen, Nachteilen und Einschränkungen. [8] [1]

In diesem Abschnitt wird nur speziell auf die Herstellung von CFK-Stäben eingegangen.

Carbonfasern (und andere Fasern) verdanken ihre hohe Festigkeit und Steifigkeit vor allem ihrem geringen Durchmesser. Da in dünneren Fasern statistisch eine geringere Anzahl an festigkeitsreduzierenden Fehlstellen vorkommt, nähert sich die Festigkeit sehr dünner Fasern allmählich der theoretischen Festigkeit des Werkstoffs an. [1] [9] Ein Graphit-Einzelkristall besitzt eine theoretische Festigkeit von 100.000 MPa und eine theoretische Steifigkeit von 1.050.000 MPa. Diese Werte lassen sich in Fasern aufgrund der vorhandenen Materialdefekte nicht erreichen. [9]

Kohlefasern werden durch Pyrolyse verschiedener Faservorprodukte hergestellt. Zu diesen zählen Fasern aus Polyacrylnitril (PAN), welche für über 90 % der hergestellten Kohlefasern und auch für den überwiegenden Teil der Fasern für Bewehrungsstäbe verwendet werden, sowie Fasern aus Pech oder auch Cellulose. [1] [2] [9]

Diese Vorgängerfasern werden in mehreren Schritten auf bis zu 3000 °C in einer sauerstofffreien Umgebung erhitzt und schließlich um 50 bis 100 % ihrer ursprünglichen Länge gestreckt, wodurch eine bevorzugte Kristallorientierung und die hohe Längssteifigkeit der Fasern erreicht wird. [1]

Vor der Weiterverarbeitung werden die Fasern oberflächenbehandelt und mit haftvermittelnden Chemikalien versehen. Diese ermöglichen eine bessere Haftung des Matrixmaterials auf der Faser und verbessern damit die Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix (siehe auch Kapitel 3.2). Schließlich wird zum Schutz der Faser noch eine dünne Polymerschicht aufgetragen (Schlichte/ Sizing). [1] [9]

Durch Variation der Herstellungsparameter können die Eigenschaften der produzierten Faser verändert werden. [1] [9]

Nach ihren mechanischen Eigenschaften lassen sich Kohlefasern in mehrere Kategorien unterteilen, die in Tabelle 2-1 aufgelistet sind. [1] [9]

Tabelle 2-1: Herstellerangaben zu verschiedenen Fasertypen aus [9]

	Superhigh Tensile SHT-Faser	High Tensile HT-Faser	Intermediate Modulus IM-Faser	High Modulus HM-Faser	Superhigh Modulus SHM-Faser
E-Modul längs $E_{f  }$ [MPa]	245.000	230.000	294.000	392.000	450.000
E-Modul quer $E_{f\perp}$ [MPa]		28.000		15.200	
Schubmodul $G_{f\perp  }$ [MPa]		50.000		28.600	
Querkontraktionszahl $\nu_{f\perp  }$		0,23		0,2	
Therm. Ausdehnungskoeff. längs $\alpha_{Tf  }$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]		-0,455		-1,08	
Therm. Ausdehnungskoeff. quer $\alpha_{Tf\perp}$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]		12,5		31,0	
Zugfestigkeit $f_{f  }$ [MPa]	4.510	3.430	4.210	2.450	2.150
Dichte $\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,80	1,74	1,74	1,81	1,9

Als Matrixmaterial kommen für CFK verschiedene Polymere zum Einsatz, üblicherweise Duroplaste. Am weitesten verbreitet sind Epoxidharze aufgrund ihrer sehr guten mechanischen Eigenschaften, chemischen Resistenz, Haftung an verschiedenen Fasern und Füllstoffen und guten Schwindeigenschaften. Für besondere Anwendungen kommen auch Phenolharze zum Einsatz, die eine höhere Temperaturbeständigkeit und günstigeres Brandverhalten aufweisen. [1] [9]

Stäbe und verschiedene andere Profilformen werden in Pultrusions- oder Strangziehverfahren hergestellt. Hierbei wird in einem kontinuierlichen Verfahren die Faserverstärkung in der Form von Faserbündeln (Rovings) oder Textilien erst zur Tränkung durch ein Harzbad und anschließend durch eine oder mehrere beheizte Formen gezogen. Vor der Tränkung werden die Fasern oft schon vorerwärmt um unerwünschte Feuchtigkeit zu entfernen. [8] [1]

### Schema eines Strangziehverfahrens/Pultrusionsverfahrens

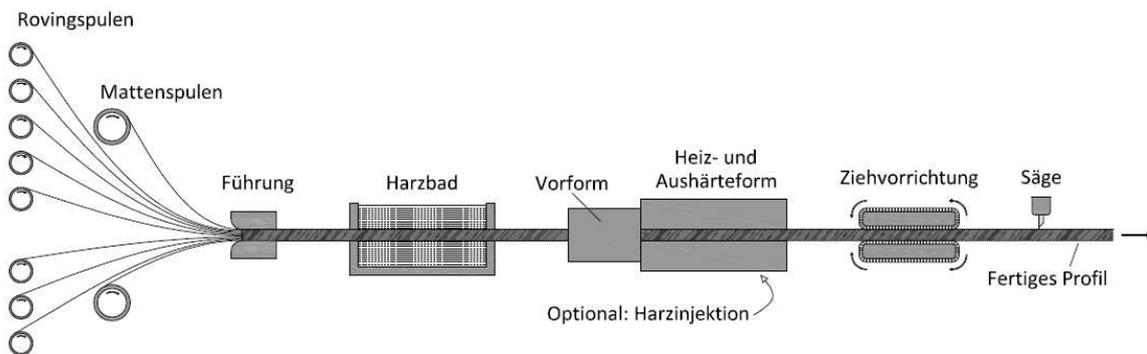


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des Strangzieh- oder Pultrusionsverfahrens [8] [1]

### 2.2.2 Mechanische Eigenschaften

CFK-Stäbe mit ausschließlich parallel zur Stabachse verlaufenden Fasern weisen orthotropes Materialverhalten längs und quer zu den enthaltenen Fasern auf. [1] [2] [9] [8] Die genauen Materialparameter unterscheiden sich allerdings sehr stark zwischen verschiedenen Stabtypen und

verschiedenen Herstellern. Außerdem kann die Oberflächenbeschaffenheit der Stäbe stark variieren. [5]

Beispielhaft sind in Tabelle 2-2 bis Tabelle 2-4 Materialparameter aus verschiedenen Literaturquellen zusammengestellt:

**Tabelle 2-2: Typische Eigenschaften von FVK-Stäben, aus [2]**

Typische Eigenschaften von FVK-Stäben, aus [2]				GFK	CFK	AFK
Stabtyp:						
Dichte	$\rho$	[10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]	2,15 ÷ 3,62	2,58 ÷ 2,77	2,15 ÷ 2,44	
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	Parallel zur Faser	$\alpha_{T\parallel}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	+0,176 ÷ +0,306	-0,342 ÷ ±0,000	-0,576 ÷ -0,175
	Quer zur Faser	$\alpha_{T\perp}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	+0,630 ÷ +0,720	+2,160 ÷ +3,060	+1,782 ÷ +2,340
Zugfestigkeit	$f_{\parallel t}$	[MPa]	483 ÷ 1586	600 ÷ 3689	1724 ÷ 2537	
Zugsteifigkeit	$E_{\parallel t}$	[GPa]	35 ÷ 51	110 ÷ 579	41 ÷ 125	
Rissdehnung	$\varepsilon_{\parallel u}$	[%]	1,2 ÷ 3,1	0,5 ÷ 1,7	1,9 ÷ 4,4	

**Tabelle 2-3: Kennwerte für eine unidirektionale Einzelschicht für typische Verbundwerkstoffe, aus [8]**

Kennwerte für eine unidirektionale Einzelschicht für typische Verbundwerkstoffe, aus [8]					GFK	CFK
Typ:						
Dichte	$\rho$	[10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]	2,0	1,6		
E-Modul, faserparallel	$E_{\parallel}$	[GPa]	45,0	140,0		
E-Modul, fasersenkrecht	$E_{\perp}$	[GPa]	14,0	12,0		
Schubmodul, fasersenkrecht/parallel	$G_{\perp\parallel}$	[GPa]	5,0	6,0		
Querdehnzahl, fasersenkrecht/parallel	$\nu_{\perp\parallel}$	[-]	0,27	0,26		
Zugfestigkeit, faserparallel	$f_{\parallel t}$	[MPa]	1.300	2.000		
Zugfestigkeit, fasersenkrecht	$f_{\perp t}$	[MPa]	35	50		
Druckfestigkeit, faserparallel	$f_{\parallel c}$	[MPa]	800	1.400		
Druckfestigkeit, fasersenkrecht	$f_{\perp c}$	[GPa]	140	200		
Schubfestigkeit, fasersenkrecht/-parallel	$f_{\perp\parallel}$	[%]	75	80		

Tabelle 2-4: Rechenwerte für Grund-Elastizitätsgrößen von unidirektionalen Schichten, aus [9]

Rechenwerte für Grund-Elastizitätsgrößen von unidirektionalen Schichten (Faservolumenanteil $\varphi = 0,6$ ), aus [9]				
Typ:			GF-EP (E-Glasfaser)	CF-EP (HT-Faser)
E-Modul, faserparallel	$E_{\parallel}$	[GPa]	45,16	139,36
E-Modul, fasersenkrecht	$E_{\perp}$	[GPa]	14,70	8,80
Schubmodul, fasersenkrecht/parallel	$G_{\perp\parallel}$	[GPa]	5,30	4,60
Schubmodul, fasersenkrecht/senkrecht	$G_{\perp\perp}$	[GPa]	5,33	3,20
Querdehnzahl, faserparallel/senkrecht	$\nu_{\parallel\perp}$	[-]	0,10	0,02
Querdehnzahl, fasersenkrecht/parallel	$\nu_{\perp\parallel}$	[-]	0,30	0,29
Querdehnzahl, fasersenkrecht/senkrecht	$\nu_{\perp\perp}$	[-]	0,38	0,37

Unter unidirektionaler Belastung verhalten sich FVK-Stäbe linear-elastisch und weisen keine plastischen Reserven auf. [1] [2] Bei kombinierter Belastung von Schubspannungen mit Querdruck oder Querkzug reagiert die Kunststoffmatrix in FVK aufgrund von Mikroschädigungen aber nichtlinear. Während das Verhalten auf Querdruck und Querkzug weiter annähernd linear bleibt, nimmt die Schubsteifigkeit unter diesen Umständen mit zunehmender Schubspannung ab. [9] [8]

Auf Druck sind sowohl die Festigkeit als auch die Steifigkeit parallel zur Faser geringer als auf Zug, da die Fasern vorzeitig lokal ausknicken können (Microbuckling), die Matrix auf Querkzug oder durch einen Schubriss versagen kann. [2]

Die transversale Schubfestigkeit von FVK-Stäben wird in [2] mit 30 – 50 MPa angegeben.

FVK-Stäbe zeigen in Zugversuchen eine Abhängigkeit ihrer maximal übertragbaren Kraft von ihrem Durchmesser. Dickere Stäbe können nur geringere Zugspannungen übertragen als dünnere Stäbe. Diese Unterschiede in den Ergebnissen werden vor allem auf Scherversatzeffekte (Shear Lag) zurückgeführt. Aufgrund der großen Differenz zwischen der Längssteifigkeit der Fasern und der Schubsteifigkeit der Matrix wird an Lasteinleitungsstellen bei dickeren Stäben nicht der gesamte FVK-Querschnitt gleichmäßig beansprucht, wodurch an der Oberfläche höhere Zugspannungen auftreten als im Inneren des Stabs. [2]

### 2.2.3 Dauerhaftigkeit

CFK-Stäbe sind sehr dauerhaft gegenüber chemischen Angriffen, Ermüdung und den meisten anderen Einflüssen. Die Ausnahmen bilden die Interaktion von Feuchtigkeit mit der Kunststoffmatrix und hohe Temperaturen. [1] [2] [4]

Je nach Art und Zusammensetzung der Kunststoffmatrix kann Feuchtigkeitseintrag durch Diffusion oder Kapillarwirkung entlang der Fasern (Wicking) zu einer Alterung der Matrix beitragen. Dadurch können die matrix-dominierten Eigenschaften des CFK-Stabs wie die Scherfestigkeit, Schersteifigkeit und Verbundeigenschaften beeinträchtigt werden. Hierbei ist auf eine sorgfältige Herstellung und geeignetes Matrixmaterial und Sizing zu achten. [1]

Die Kunststoffmatrix erreicht außerdem schon bei Temperaturen um etwa 100 °C ihre Glasübergangstemperatur. Über dieser Temperatur ist die Matrix nicht mehr in einem harten (glasigen) Zustand und kann keine signifikanten Schub- oder Verbundspannungen mehr übertragen. Die Fasern können weiterhin Zugkräfte übertragen, sofern sie an beiden Enden in einer kühleren

Region des Bauteils verankert sind. Sie verlieren allerdings bei höheren Temperaturen ebenfalls an Festigkeit und Steifigkeit, wobei für CFK eine Reduktion um 50 % bei etwa 250 °C auftritt. [2]

### 3 Verbundverhalten von Bewehrungsstäben in Beton

Genauso wie FVK und Beton selbst ist bewehrter Beton wiederum ein Verbundwerkstoff. Die Bewehrungsstäbe übernehmen die Zugkräfte in den Bereichen des Bauteils in denen diese auftreten und das Abtragen der Druckspannungen erfolgt über den Beton. Damit diese Kraftaufteilung funktionieren kann, müssen Spannungen vom Beton in die Bewehrung eingeleitet werden können und umgekehrt. [6]

#### 3.1 Äußerer Verbund

Die Übertragung der Kräfte zwischen Beton und Bewehrung findet über eine schubfeste Verbindung der beiden Komponenten - den Verbund (bond) – statt. Da der Beton nur eine relativ geringe Zugfestigkeit und maximale Dehnung besitzt, treten in stärker zugbeanspruchten Regionen von Betonbauteilen Risse auf. In den Rissen werden die gesamten Zugkräfte von den Bewehrungselementen übertragen. Angrenzend an die Risse werden die Zugkräfte teilweise über den Verbund und eine Einleitungslänge  $l_e$  in den Beton übertragen, bis die Längsdehnung der Bewehrung und des umgebenden Betons denselben Wert aufweisen oder die Zugfestigkeit des Betons an einer weiteren Stelle erreicht wird und sich ein weiterer Riss öffnet. [6]

Die genaue Verteilung der Verbundspannungen ist im Allgemeinen nicht bekannt, für einen runden Stab kann aber die Gleichgewichtsbeziehung (3.1) angegeben werden, wenn eine konstante Verbundspannungsverteilung über den Umfang angenommen wird.

$$F_{Zug} = \sigma_{Bew}(x_{Riss}) \cdot A_{Bew} = \int_{x_{Riss}}^{x_{Riss}+l_e} \tau_b(x) \cdot d_{Stab} \cdot \pi \cdot dx + \sigma_{Bew}(x_{Riss} + l_e) \cdot A_{Bew} \quad (3.1)$$

$F_{Zug}$	Gesamte übertragene Zugkraft
$\sigma_{Bew}(x)$	Spannung in der Bewehrung
$x$	Lagekoordinate
$A_{Bew}$	Querschnittsfläche der Bewehrung
$l_e$	Einleitungslänge
$\tau_b(x)$	Verbundspannung
$d_{Stab}$	Stabdurchmesser

Zur Vereinfachung wird die Verbundspannung auch als Mittelwert über die Einleitungslänge angegeben: [6]

$$\int_{x_{Riss}}^{x_{Riss}+l_e} \tau_b(x) \cdot d_{Stab} \cdot \pi \cdot dx = \tau_{b,m} \cdot d_{Stab} \cdot \pi \cdot l_e \quad (3.2)$$

Genauere analytische Modelle wurden für bestimmte Fälle entwickelt, wie zum Beispiel für Ausziehversuche von Stahlstäben in Normalbeton. [10]

Im Allgemeinen ist die entwickelte Verbundspannung an einer Stelle entlang der Bewehrung von der Längsverschiebungsdifferenz zwischen Bewehrung und Beton - dem Schlupf  $s$  – abhängig. Sie wird als  $\tau_b(s)$  angegeben. [1] [6] [11] [10]

Um die auftretenden Rissbreiten möglichst gering zu halten, ist eine möglichst hohe mittlere Verbundspannung wünschenswert. Damit wird die Einleitungslänge verkürzt und der Rissabstand verringert, wodurch mehrere Risse mit geringerer Rissbreite anstatt einer geringeren Anzahl Risse mit größerer Rissbreite entstehen. [6]

Um Probleme hinsichtlich großer Rissbreiten und großer Biegeverformungen zu umgehen, können Betonbauteile vorgespannt werden. Hierzu muss aber die Verankerung der verwendeten Spannglieder möglich sein, welche bei CFK-Spanngliedern derzeit noch eine Herausforderung darstellt. [12] Vorgespannte Bauteile mit sofortigem Verbund aus UHPC in Kombination mit CFK-Spanngliedern, bei denen die Verankerung über den Verbund erreicht wird, werden derzeit an der BOKU Wien sowie an anderen Forschungseinrichtungen entwickelt. [13] [14]

Die Verbundwirkung eines Bewehrungselements kann in zwei Anteile zerlegt werden: Einerseits in den Haft- und Reibungsverbund der Beton- und Bewehrungsoberflächen und andererseits in den mechanischen Verbund oder Scherverbund, der aufgrund der Verzahnung der Bewehrung im Beton auftritt. [6] [1]

### 3.1.1 Adhäsion und Reibung

Zwischen Zementstein und Stahl gibt es eine schwache, auf Kapillarkräften beruhende Klebewirkung, deren Haftung allerdings gering ist und schon bei geringen Verschiebungen zerstört wird. [6]

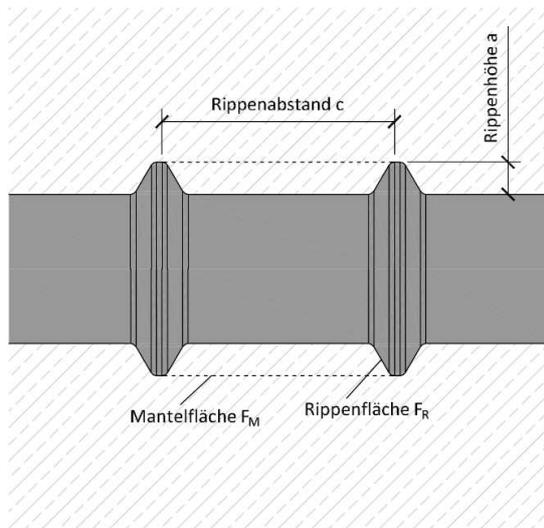
Ist der Haftungswiderstand überwunden, tritt ein Reibungswiderstand auf, wenn Querpressungen auf die Bewehrungsoberfläche einwirken. Bei einbetonierter Bewehrung sind solche Querpressungen aufgrund des Schwindens des Betons vorhanden, bei CFK-Bewehrung kann zusätzlich die Bewehrung aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme der Kunststoffmatrix durch Diffusion oder Wicking quellen und die Oberflächenpressung erhöhen. [1] [6] Für Stahlbewehrung in Beton liegt der Reibungsbeiwert zwischen 0,3 und 0,6. [6]

### 3.1.2 Mechanischer Verbund

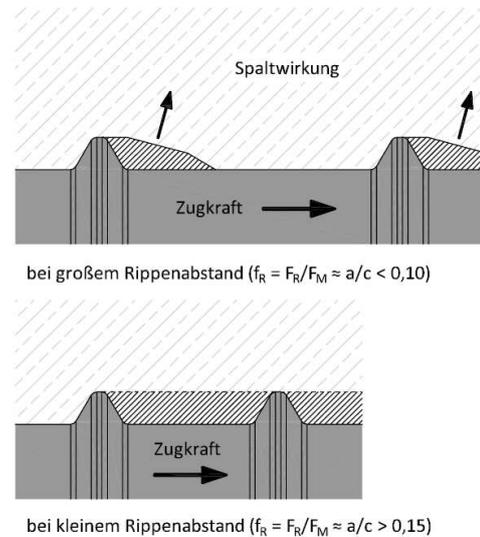
Ist die Oberfläche der Bewehrung nicht eben und parallel zur Zugrichtung, tritt nach Überwindung des Haftwiderstands eine mechanische Verzahnung auf, die wesentlich höhere Verbundspannungen ermöglicht als die Haftung und Reibung an einem glatten Stab. [1] [2] [11] [6]

Der Einfluss der Oberflächenprofilierung von Bewehrungsstäben wurde für Stahlstäbe in Normalbeton in [11] untersucht und die bezogene Rippenfläche  $f_R$  als guter Vergleichsmaßstab gefunden. Die bezogene Rippenfläche  $f_R$  ist als das Verhältnis von Rippenfläche im Querschnitt zur Mantelfläche der Betonkonsolen zwischen den Rippen definiert.

Abmessungen an einem gerippten Stahlstab



Bruchflächen zwischen den Rippen



**Abbildung 3-1: Verwendete Abmessungen an gerippten Stahlstäben und Bruchflächen bei verschiedenen bezogenen Rippenflächen nach [11], [6].**

Für CFK-Bewehrung hat sich noch keine optimale Oberflächenprofilierung durchgesetzt. Es gibt Untersuchungen zu einer Reihe verschiedener Ansätze, darunter:

- Eingefräste Rippen [1] [2] [3] [15]
- Aufgeklebte helixförmige Rippen (Kunststoffbänder oder getränkte Rovinge) [1] [2]
- Sandummantelte Stäbe [15] [16]
- Kunststoffrippen aus Matrixmaterial [1] [2]
- Faserummantelung [5]
- Kombinationen der oben genannten Varianten [16] [4]

Je nach Form und Materialeigenschaften der Stäbe können in verschiedenen Betonen unterschiedliche Verbundfestigkeiten, -steifigkeiten und Versagensformen auftreten. Der Beton kann vor allem durch das Abscheren oder Zerdrücken der Konsolen zwischen den Rippen oder durch das Öffnen eines Längsrisse entlang der Bewehrung (Spalten) ein Versagen einleiten. [6] [10] Ein Spalten wird durch eine flache Neigung der Rippenflanke relativ zur Staboberfläche begünstigt. [11]

Das Versagen der Betonkonsolen führt in Versuchen mit Stahlstäben in Normalbeton zu einem abrupten, spröden Versagen, das Spalten eher zu einem duktilen Versagen. [10] Diese Aussage konnte in den durchgeführten Versuchen für CFK-Stäbe in UHPC nicht allgemein bestätigt werden, siehe Kapitel 5.

### 3.2 Innerer Verbund

In der Bewehrung muss die Verbundspannung von der Oberfläche in das Innere des Elements geleitet werden, das die Zugkräfte weiterleitet. Im Fall von gerippten Stäben müssen die Stützkkräfte, die auf die Rippen wirken, in den durchgängigen Teil des Stabquerschnitts geleitet werden. Bei Stahlstäben sind hierfür relativ kleine Rippenaufstandsflächen ausreichend. [11]

In CFK-Stäben aller in Kapitel 3.1.2 aufgezählten Varianten muss die eingeleitete Spannung, je nach Stabtyp, von einer Kunststoff-Klebeschicht und der Kunststoffmatrix oder nur der Kunststoffmatrix zu den innenliegenden Carbonfasern übertragen werden.

Epoxidharz, das für diese Anwendungen üblicherweise als Klebstoff und als Matrix verwendet wird, weist aber eine wesentlich geringere Schubsteifigkeit und Scherfestigkeit auf als Stahl. Zusätzlich können die Eigenschaften von Epoxidharz stark variieren. [1] [17]

In [1] und [17] werden für die Materialkennwerte von Epoxidharz die folgenden Spannen angegeben (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Materialparameter für Epoxidharz

Materialparameter		Minimum	Maximum	Quelle
Zugfestigkeit	[MPa]	27,6	89,6	[1]
		40,0	65,0	[17]
Druckfestigkeit	[MPa]	103,4	172,4	[1]
		116,0	404,0	[17]
Biegefestigkeit	[MPa]	91,7	144,8	[1]
		74,0	325,0	[17]
Bruchdehnung	[%]	3,0	6,0	[1]
		3,0	5,0	[17]
E-Modul (Zug)	[MPa]	2.413	2.413	[1]
		850	4.800	[17]
E-Modul (Druck)	[MPa]	-	-	[1]
		3.100	4.500	[17]
E-Modul (Biegung)	[MPa]	-	-	[1]
		2.550	15.500	[17]
Scherfestigkeit	[MPa]	-	-	[1]
		12,0	24,0	[17]
Querdehnzahl	[-]	-	-	[1]
		0,42	0,42	[17]

Die angegebenen Parameter zeigen eine gute Übereinstimmung mit den matrixdominierten Eigenschaften von CFK, mit der Ausnahme der Scherfestigkeit, die in Literaturquellen um 70 bis 85 % niedriger angegeben wird als für CFK in [8] und um 20 bis 76 % niedriger als für FVK in [2] (siehe Kapitel 2.2.2). Dieser Kennwert ist für die erreichbare Verbundfestigkeit sehr wesentlich, da sowohl bei aufgeklebten Rippen, aufgeklebtem Sand als auch im Fall einer eingefrästen Wendel die Festigkeit der Scherfuge unter den Rippen bzw. dem Sand die aufnehmbare Verbundspannung limitiert. [1] [2]

CFK-Stäbe mit aufgeklebten, helikal umlaufenden Rippen versagen in Versuchen meist durch ein Ablösen der Rippe an der Klebefuge und einem Ausziehen des Stabs. [1] Stäbe mit einer eingefrästen Wendel werden in ähnlicher Weise durch die Scherfestigkeit an der Wendelbasis in ihrer Leistungsfähigkeit beschränkt. [2]

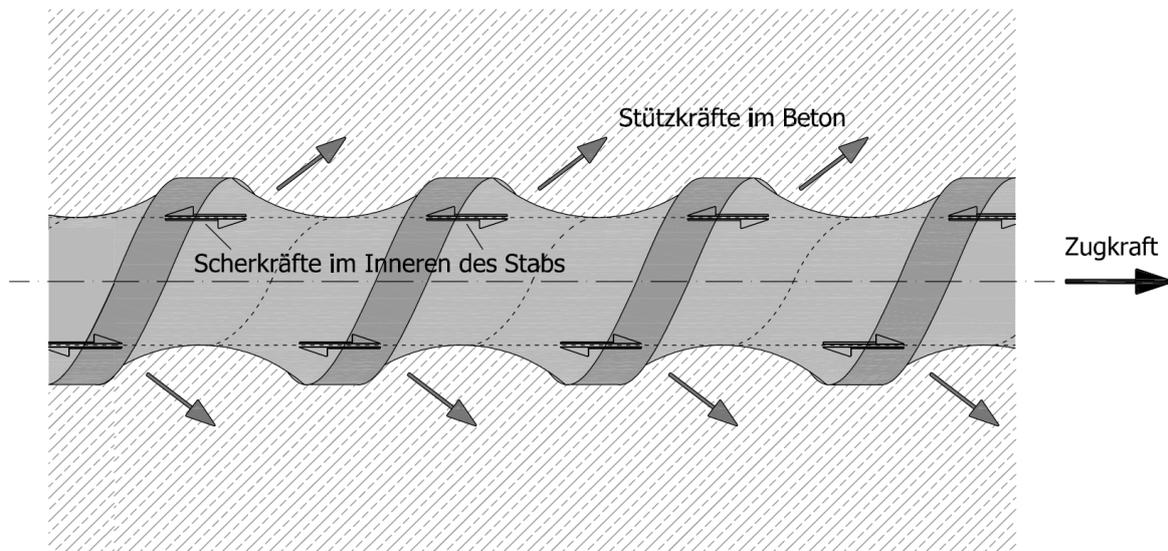


Abbildung 3-2: Scherkräfte an der Mantelfläche des Nettoquerschnitts in einem eingefrästen Stab

Ein solches vorzeitiges Verbundversagen hat jedoch den Vorteil, dass ein duktileres Versagen auftritt und mit solchen Stäben bewehrte Bauteile ein Maß an Pseudoduktilität aufweisen können. Hierbei wird die Bewehrung zwar nicht voll ausgenutzt, es kann aber bei passender Auslegung das Problem eines abrupten, spröden Versagensverhaltens abgeschwächt werden. [1] [2]

Die Schubsteifigkeit der Kunststoffmatrix trägt auch zur maximal aufnehmbaren Zugkraft eines verankerten Stabs bei, da eine höhere Schubsteifigkeit die notwendige Verzerrung im Inneren des Stabs zur Weiterleitung der an der Oberfläche angreifenden Verbundkräfte reduziert (Shear Lag). Auf diesen Umstand ist auch der wesentliche Teil des Größeneinflusses auf die Zugfestigkeit bei CFK-Stäben zurückzuführen. [2]

### 3.3 Prüfkörper für Ausziehversuche

Die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung einer Kombination von Bewehrungsstab und Beton wird in Ausziehversuchen bestimmt. Bei diesen wird ein Bewehrungsstab, der über eine bestimmte Länge  $l_V$  in einem Prüfkörper einbetoniert wurde, ausgezogen und die am Stab eingeleitete Kraft sowie der Auszug des Stabs gemessen. Diese Prüfkörper können verschieden ausgebildet sein, beispielsweise können Würfel, Quader oder Balken mit Einschnitten verwendet werden. [6] [18]

In Abbildung 3-3 sind drei Varianten für Ausziehversuche mit einem würfelförmigen Prüfkörper gegenübergestellt.

## Prüfkörper für Ausziehversuche

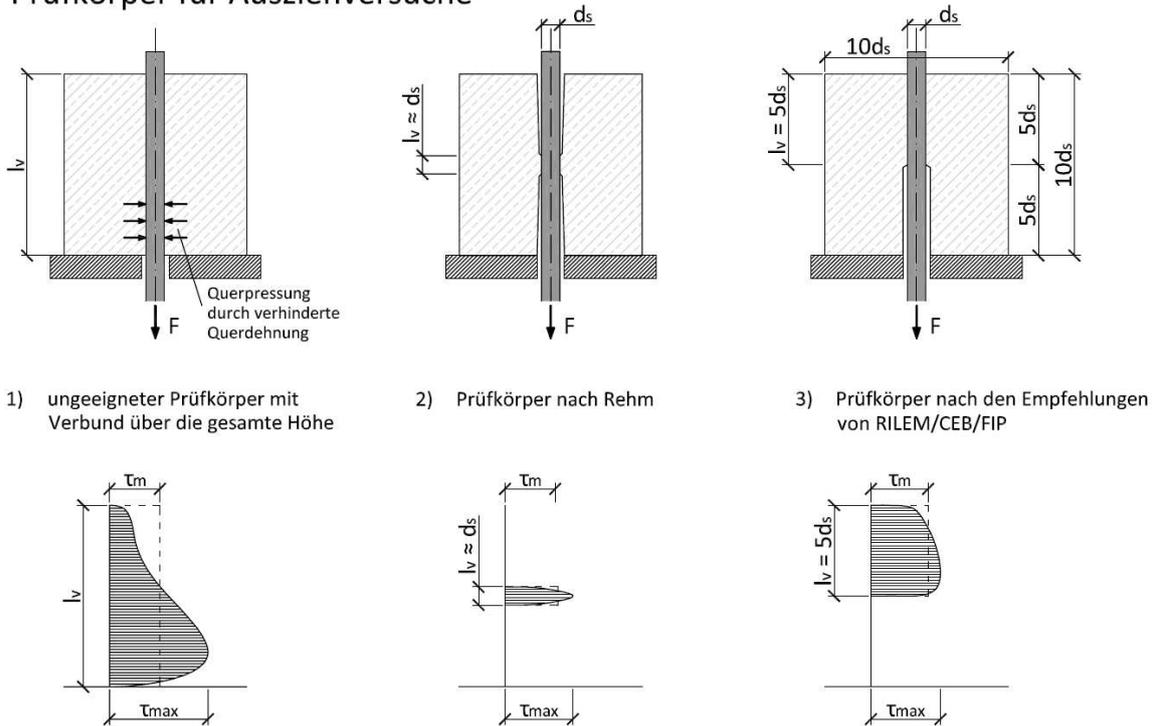


Abbildung 3-3: Vergleich verschiedener Prüfkörper für Ausziehversuche [6] [11]

Im ersten Prüfkörper 1) ist der Bewehrungsstab über die gesamte Länge einbetoniert. Diese Variante ist für die Ermittlung der  $\tau_b(s)$ -Beziehung am wenigsten geeignet, da einerseits die Verbundlänge relativ lang und daher der auftretende Schlupf über die Länge nicht annähernd konstant ist, andererseits an der Auflagefläche eine behinderte Querdehnung des Betons den Verbund beeinflusst. [6]

In Prüfkörper 2), der in den Untersuchungen, die in [11] beschrieben sind verwendet wurde, befindet sich der Stab nur über eine sehr kurze Länge mit dem Beton im Verbund. Hierdurch sollte der Verbund so nahe wie praktisch möglich an einem infinitesimalen Längenelement  $dx$  untersucht werden. Dieser Prüfkörpertyp ist aber auch mit einem hohen Herstellungsaufwand verbunden. [6] [11]

Prüfkörper 3) ist der nach den Empfehlungen von RILEM, CEB und FIP übliche Versuchskörper. Bei diesem steht der Stab nur in der der Auflagefläche gegenüberliegenden Hälfte des Würfels mit dem Beton in Verbund. Dadurch wird der bei Prüfkörper 1) störende Einfluss der Lagerplatte vermieden. [6] [18]

Für die für diese Arbeit durchgeführten Versuche wurden Varianten des Prüfkörpers 3) mit 8 mm und 10 mm dicken Stäben verwendet.

### 3.4 Ergebnisse vorangegangener Verbundversuche

An der TU Wien wurden bereits ähnliche Verbundversuche zum Vergleich von glatten, radial eingefrästen und sandummantelten CFK-Stäben mit einem Durchmesser von 8 mm in UHPC durchgeführt. In diesen Versuchen wurden ebenfalls Prüfkörper nach den Empfehlungen von RILEM verwendet (siehe Kapitel 3.3). [19] [15]

Diese lieferten für glatte Stäbe eine maximale mittlere Verbundspannung von etwa 4,0 MPa und für die besandeten Stäbe eine maximale mittlere Verbundspannung von 16,0 MPa, jeweils mit einem steilen Kraftanstieg der maximalen Kraft bei kleinem Schlupf unter 0,1 mm und einem duktilen Auszug der Stäbe danach. Die eingefrästen Stäbe zeigten einen ähnlich steilen Kraftanstieg bis zu einer

Verbundspannung von etwa 8 MPa, bevor sie bei stark verminderter Verbundsteifigkeit eine maximale mittlere Verbundspannung von 13,8 MPa bei 4,2 mm Schlupf erreichten. [19] [15]

An der TU München wurden Ausziehversuche an CFK-Stäben mit Sandbeschichtung und einem helikal aufgeklebten Kunststoffband mit Durchmessern von 5,5 mm und 7,5 mm sowie an Stäben mit einer Sandbeschichtung alleine mit einem Durchmesser von 7,5 mm in UHPC durchgeführt. Hier wurden für die dünneren Stäbe maximale mittlere Verbundspannungen zwischen 27,9 MPa und 31,6 MPa festgestellt. Die dickeren Stäbe mit Sandummantelung alleine erreichten maximal 27,1 MPa bis 30,3 MPa und die Stäbe mit einem zusätzlichen Kunststoffband erreichten maximal 23,2 MPa bis 26,9 MPa. Ein genauer Verlauf der  $\tau_b(s)$ -Beziehung wurde nicht angegeben. [16]

Die Versuche sind allerdings nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Stäbe verschiedener Hersteller sich nicht nur in der Längssteifigkeit und Längszugfestigkeit unterscheiden, sondern auch unterschiedliche Scherfestigkeiten, Schub- und Quersteifigkeiten aufgrund verschiedener Faservolumengehalte und Tränkungen sowie unterschiedliche Oberflächenbildungen aufweisen. [5]

## 4 Modellberechnungen in ATENA 2D

Um verschiedene eingefräste Wendelgeometrien vorab zu vergleichen, wurde eine Parameterstudie im FE-Programm ATENA 2D durchgeführt, in welchem nichtlineare Materialmodelle für Beton zur Verfügung stehen. In diesem Abschnitt werden zuerst der Aufbau des Berechnungsmodells sowie die verwendeten Materialmodelle erläutert, dann die variierten Parameter erklärt und schließlich die Ergebnisse präsentiert und die Auswahl der drei für die Versuche hergestellten Varianten begründet.

### 4.1 Modell

Um die notwendigen Berechnungszeiten zu verringern, wurde ein zweidimensionales Modell gewählt und ein 1 mm dicker radial aus dem Prüfkörper geschnittener Streifen modelliert. Die Dicke des Streifens wurde näherungsweise als konstant gewählt.

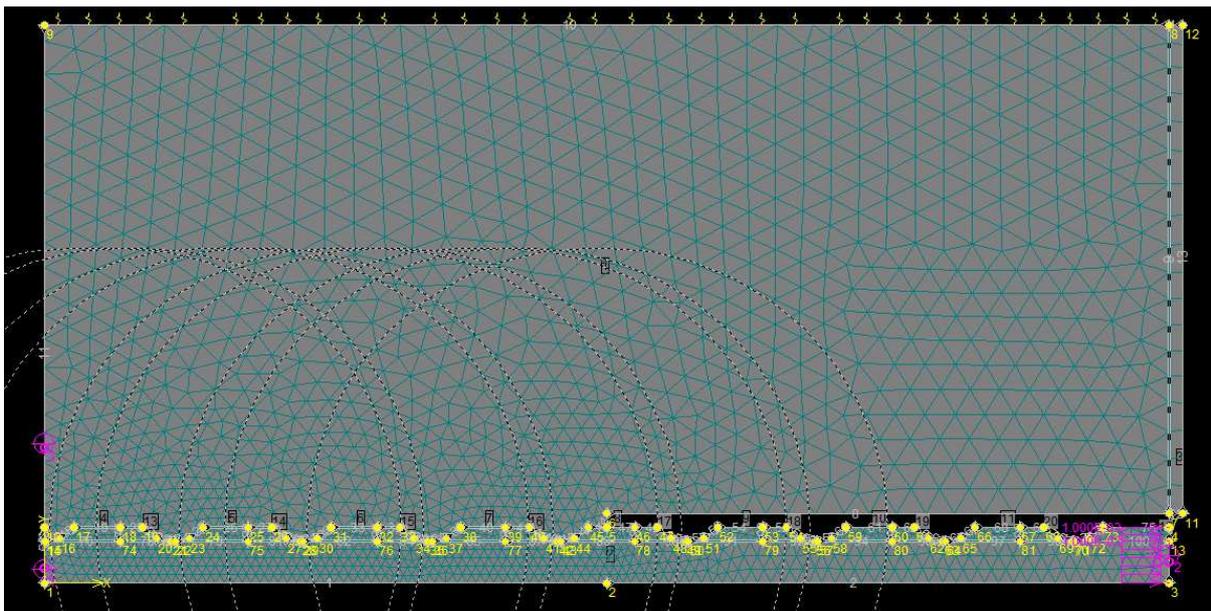


Abbildung 4-1: Beispiel eines verwendeten FE-Modells in ATENA 2D

Die Annäherung in zwei Dimensionen bildete den herrschenden dreidimensionalen Spannungszustand im Ausziehkörper zwar nicht vollständig ab und ein mögliches Spalten des Prüfkörpers wurde nicht berücksichtigt, jedoch konnten in einem gegebenen Zeitraum wesentlich mehr Stabvarianten untersucht werden.

Für die Modellierung des Betons wurde das SBeta2-Materialmodell verwendet, das einen ebenen Spannungszustand annimmt. Die gewählte Würfeldruckfestigkeit von 170,6 MPa und der E-Modul von 53,48 GPa des UHPC wurde aus Prüfergebnissen vorangegangener Versuche übernommen. Für die später durchgeführten Versuche für diese Arbeit wurde UHPC nach derselben Rezeptur hergestellt. Diese ist in Tabelle 4-1 aufgelistet. [20]

**Tabelle 4-1: Zusammensetzung des verwendeten UHPC [20]**

Bestandteil	[kg/m <sup>3</sup> ]
Wasser	10
Hochleistungsfließmittel 1	40
Hochleistungsfließmittel 2	20
Entschäumer	1
Zement (CEM I 52,5 NC3A-frei)	750
Schwindkompensator	40
Zusatzmittel, reaktiv (Microsilika-Slurry)	310
Zusatzmittel, inert (Gesteinsmehl)	200
Quarzsand 1 (0,1 – 0,5 mm)	490
Quarzsand 2 (1,0 – 1,6 mm)	490

Für die übrigen Parameter wurden die vom Programm aus der Würfeldruckfestigkeit berechneten Werte übernommen. Alle verwendeten Parameter sind in Tabelle 4-2 angeführt.

Tabelle 4-2: Modellparameter für UHPC in ATENA

Parameter des UHPC im SBeta2-Materialmodell in ATENA		
Grundlegend:		
E-Modul	53,48	GPa
Querdehnzahl	0,20	-
Zugfestigkeit	13,10	MPa
Druckfestigkeit	145,0	MPa
Zug:		
Art der Zugerweichung	Exponentiell	-
Spezifische Bruchenergie	184,6	N/m
Rissmodell	Fest	-
Druck:		
Dehnung im Würfeldrucktest bei maximaler Last	6,617	‰
Reduktion der Druckfestigkeit durch Risse	0,800	-
Art der Druckerweichung	Crush band	-
Kritische Druckverschiebung	0,5	mm
Schub:		
Schubretentionsfaktor	Variabel	-
Zug/Druck-Interaktion	Linear	-

Diese Werte ergeben gemäß den Angaben in [21] die in Abbildung 4-2 dargestellte biaxiale Spannungshüllkurve.

### Biaxial failure function (ATENA)

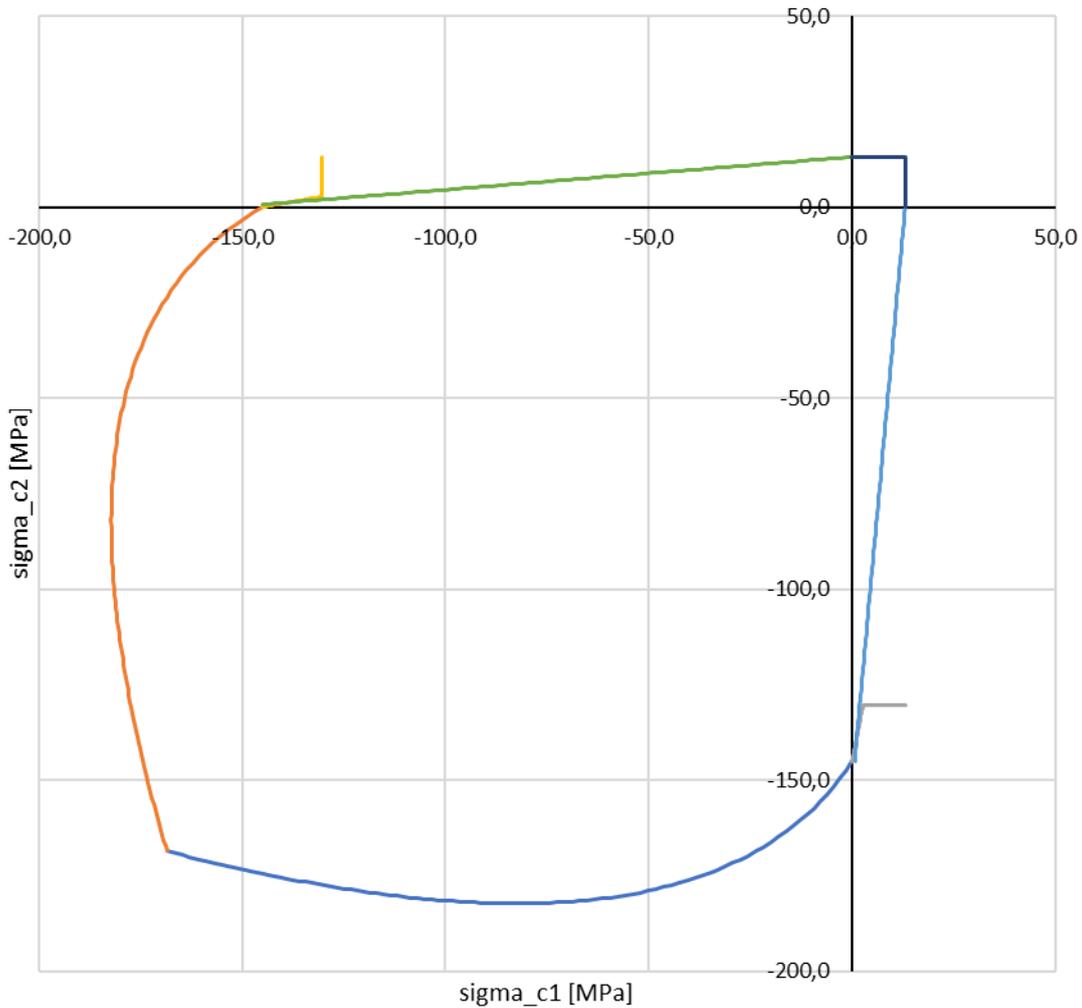


Abbildung 4-2: Biaxiale Spannungs-Hüllkurve des ATENA Sbeta2-Materialmodells

Der CFK-Stab wurde aus mehreren Teilen zusammengesetzt definiert und jeweils linear elastisch modelliert, da ATENA kein geeignetes orthotropes Materialmodell anbietet. Für den Stabkern wurden die Kennwerte für eine Zugbeanspruchung parallel zur Faser gewählt, diese sind in Tabelle 4-3 aufgelistet.

Tabelle 4-3: Modellparameter für CFK (längs) in ATENA

Parameter für CFK (längs) in ATENA			
Grundlegend:			
E-Modul	200,0	GPa	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2
Querdehnzahl	0,26	-	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2

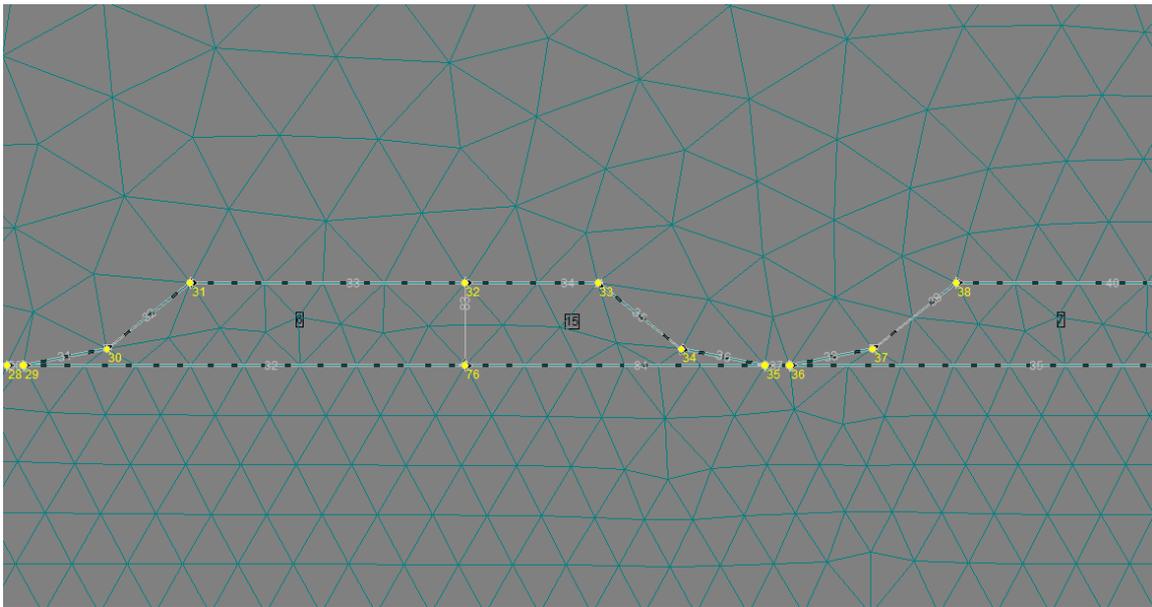
Ein Abreißen des Stabes wurde im Nachhinein durch einen Vergleich des Berechnungsergebnisses mit der Zugfestigkeit des Stabkernquerschnitts berücksichtigt.

Am Fuß jedes Wendelzahns wurde ein Interface eingefügt, um das Abscheren der Wendel darstellen zu können. Die Berechnungsparameter für dieses Interface sind in Tabelle 4-4 aufgelistet.

Tabelle 4-4: Modellparameter für das Interface zwischen CFK und CFK in ATENA

Parameter für das Interface zwischen CFK-Zahn und CFK-Stabkern in ATENA			
Grundlegend:			
Zugsteifigkeit	$6,00 \times 10^8$	MN/m <sup>2</sup> /m	Berechnet aus einem angenommenen E-Modul für Epoxidharz von 3000 MPa und einer angenommenen Schichtdicke von $2,0 \times 10^{-5}$ m
Schersteifigkeit	$2,113 \times 10^8$	MN/m <sup>2</sup> /m	Berechnet aus $E = 3000$ MPa und $\nu = 0,42$ für Epoxidharz, daraus folgend $G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} = 1056,3$ MPa für isotropes, linear elastisches Material und einer angenommenen Schichtdicke von $2,0 \times 10^{-5}$ m
Zugfestigkeit	50,0	MPa	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2
Kohäsion	80,0	MPa	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2
Reibungsbeiwert	0,5	-	Annahme
Definierte Erhärtung/Erweichung:			
Zug			
u [m]	f <sub>t</sub> [-]		
0,0	1,0		
$1,0 \times 10^{-5}$	0,01		
$1,0 \times 10^{-4}$	0,0		
		Annahme	
Schub			
u [m]	f <sub>t</sub> [-]		
0,0	1,0		
$1,0 \times 10^{-4}$	0,1		
$5,0 \times 10^{-4}$	0,0		
		Annahme	

Nach einigen vorläufigen Berechnungen mit trapezförmigen Einschnitten und Zähnen am CFK-Stab war festzustellen, dass die CFK-Wendelzähne bei vielen untersuchten Varianten durch ein Abscheren zum Versagen führten. Um die Scherfläche möglichst groß zu halten, wurden danach nur mehr runde Einschnitte betrachtet. Diese wurden näherungsweise durch sechs Punkte mit geraden Verbindungslinien beschrieben (siehe Abbildung 4-3), da diese kleinen Elementgrößen scheinbar an die Grenzen der in ATENA 2D möglichen Rechengenauigkeit stießen. Feinere Aufteilungen der Krümmung sowie kleinere als die verwendeten Elementgrößen führten zu Fehlern aufgrund singularer Steifigkeitsmatrizen. Das horizontale Segment zwischen den mittleren beiden Punkten der polygonalen Annäherung der Kerbe (zwischen Knoten 35 und 36 in Abbildung 4-3) wurde mit einer Länge von 0,2 mm konstant gehalten. Die Punkte zwischen den höchsten und tiefsten Punkten der Einfräsung (Knoten 34 und 37 in Abbildung 4-3) wurden so gewählt, dass sie der anzunähernden Kerbe möglichst nahe lagen, da in ATENA 2D Koordinaten nur auf 0,1 mm genau eingegeben werden können.



**Abbildung 4-3: Ansicht des geteilten CFK-Zahns und der als Polygon approximierten Einfräsung**

Zusätzlich wurden die CFK-Zähne in zwei Segmente unterteilt. Dem kürzeren, dem Zugende des Stabes näheren Teil (Bereich 15 in Abbildung 4-3) wurden die linear elastischen Eigenschaften von CFK quer zur Faser zugewiesen und dem längeren Teil (Bereiche 6 und 7 in Abbildung 4-3) die Eigenschaften parallel zur Faser. Der kürzere Teil reichte über ein Drittel der Außenkante des Zahns, maximal aber über 3 mm. Diese Aufteilung sollte Spannungsspitzen an den herauspringenden Ecken der Zähne realitätsnäher darstellen.

**Tabelle 4-5: Modellparameter für CFK (quer) in ATENA**

Parameter für CFK (quer) in ATENA			
Grundlegend:			
E-Modul	12,0	GPa	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2
Querdehnzahl	0,26	-	Annahme, siehe Kapitel 2.2.2

Das Interface zwischen dem UHPC und den CFK-Segmenten wurde mithilfe eines Modells eines glatten Stabes kalibriert. In diesem wurden die Interface-Eigenschaften so angepasst, dass das Modellverhalten annähernd den Ergebnissen der glatten Stäbe aus [19] und [15] entspricht. Die Parameter für dieses Interface sind in Tabelle 4-6 enthalten.

Tabelle 4-6: Modellparameter für das Interface zwischen CFK und UHPC in ATENA

Parameter für das Interface zwischen CFK und UHPC in ATENA			
Grundlegend:			
Zugsteifigkeit	$4,226 \times 10^7$	MN/m <sup>2</sup> /m	Als 2× Schersteifigkeit angenommen
Schersteifigkeit	$2,113 \times 10^7$	MN/m <sup>2</sup> /m	Aus Kalibrierung
Zugfestigkeit	0,01	MPa	Annahme
Kohäsion	7,0	MPa	Aus Kalibrierung
Reibungsbeiwert	0,5	-	Aus Kalibrierung
Definierte Erhärtung/Erweichung:			
Zug			
u [m]	f <sub>t</sub> [-]		
0,0	1,0		
$1,0 \times 10^{-4}$	0,0		
		Annahme	
Schub			
u [m]	f <sub>t</sub> [-]		
0,0	1,0		
$5,0 \times 10^{-4}$	0,0		
		Annahme, aus Kalibrierung	

Eine Feder an der Außenkante des Prüfkörpers (an der Oberkante des Modells in Abbildung 4-1) war ursprünglich für eine mögliche Berücksichtigung eines Spaltens des Prüfkörpers vorgesehen. Dieser Aspekt des Modells wurde aber in weiterer Folge verworfen und die Federsteifigkeit auf 999.000 N/m/m gesetzt. Damit sollte ein verhindertes Spalten modelliert werden.

Die Auflagefläche des Prüfkörpers wurde als Stahlplatte angenommen und ein Interface zwischen Stahl und Beton eingefügt, um eine starre Verbindung zu vermeiden. Die Parameter für diese beiden Elemente sind in Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 aufgelistet.

Tabelle 4-7: Modellparameter für Stahl in ATENA

Parameter für Stahl in ATENA		
Grundlegend:		
E-Modul	200,0	GPa
Querdehnzahl	0,30	-

Tabelle 4-8: Modellparameter für das Interface zwischen Beton und Stahl in ATENA

Parameter für das Interface zwischen Beton und Stahl in ATENA		
Grundlegend:		
Zugsteifigkeit	$6,0 \times 10^6$	MN/m <sup>2</sup> /m
Schersteifigkeit	$2,0 \times 10^6$	MN/m <sup>2</sup> /m
Zugfestigkeit	1000	MPa
Kohäsion	1000	MPa
Reibungsbeiwert	0,3	-

## 4.2 Variierte Parameter

Nachdem die Form der eingefrästen Wendel auf ein Kreissegment beziehungsweise ein sphärischer Fräskopf festgelegt worden war, wurde die Wendelgeometrie durch drei Größen parametrisiert:

- Die Wendelsteigung  $\alpha_w$ , die als

$$\alpha_w = \arctan\left(\frac{\Delta h}{d_s \cdot \pi}\right) \quad (4.1)$$

festgelegt ist. Damit ist die Wendelsteigung mit der Ganghöhe  $\Delta h$  der Wendel verknüpft, da der Stabdurchmesser für alle Varianten derselbe ist. Es wurden Wendelsteigungen von 10°, 15°, 20°, 30° und 45° untersucht.

- Die Kerbenbreite  $b_K$ , die als

$$b_K = \sqrt{8t_K r_F - 4t_K^2} = b_{K,||} \cdot \cos(\alpha_w) \quad (4.2)$$

definiert wurde.  $b_K$  ist ein Vergleichswert und entspricht nicht der Breite der gefrästen Kerbe normal zu ihrer Laufrichtung. Hier wurden die Werte 2, 4, 6 und 8 mm verwendet, mit der Ganghöhe der Wendel als oberer Grenze.

- Die Kerbtiefe  $t_K$ . Für diese wurden Werte von 0,5 mm, 0,75 mm, 1,0 mm, 1,25 mm, 1,5 mm und 2,0 mm eingesetzt, mit der halben Kerbenbreite  $b_K$  als oberer Grenze.

Die verwendeten Größen sind in Abbildung 4-4 an einem Stababschnitt dargestellt.

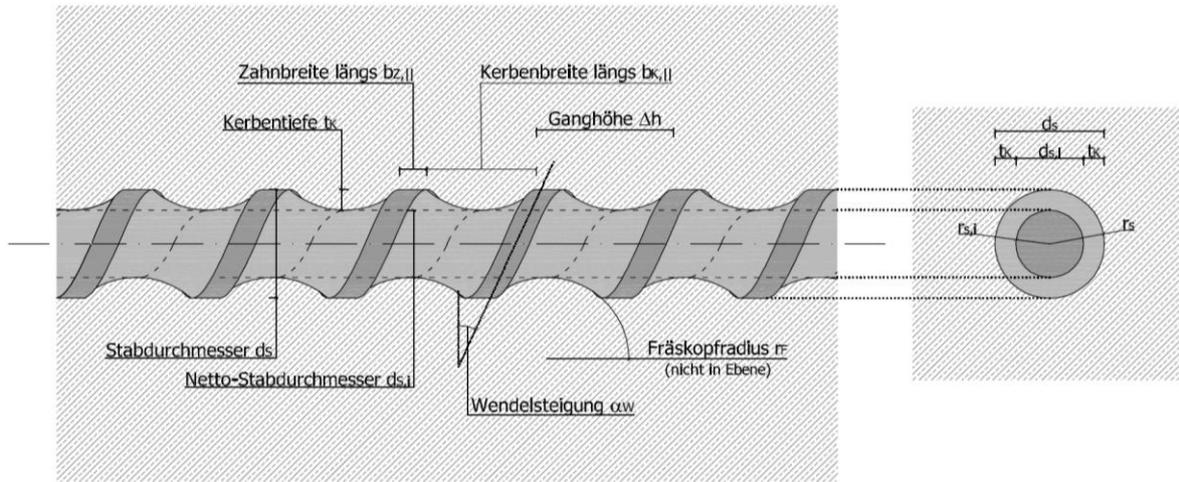


Abbildung 4-4: Verwendete Abmessungen an Stäben mit eingefräster Wendel

Diese Variationen ergaben letztendlich 87 zu berechnende Kombinationen. Zusätzlich wurde der mittlere besandete Stab aus [19] und [15] und die Variante des zu prüfenden Thyssen C4R-Stabs mit 8 mm Durchmesser modelliert.

Von jeder Variante wurde auch ein Modell mit nur einer Kerbe oder einem Zahn erstellt, wobei die Kerbe bzw. der Zahn ein Drittel der Verbundlänge vom lastfreien Ende des Stabs entfernt definiert wurde. Je ein Beispiel dieser Modelle sind in Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 zu sehen.

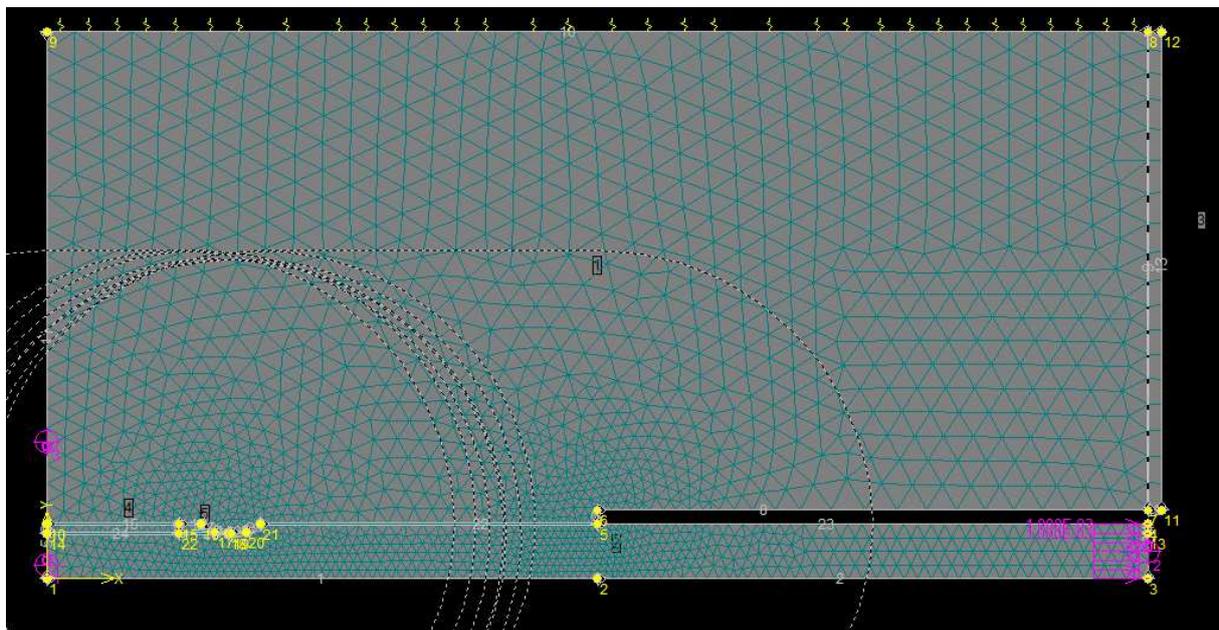


Abbildung 4-5: Beispiel eines Modells mit einer Einzelkerbe

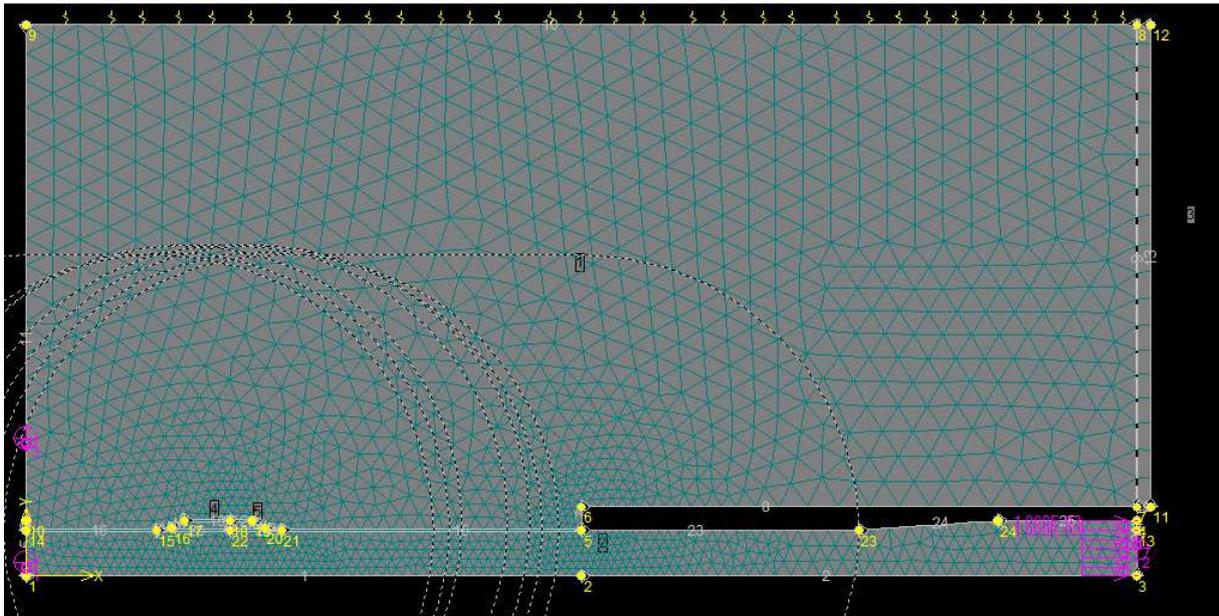


Abbildung 4-6: Beispiel eines Modells mit einem Einzelzahn

### 4.3 Ergebnisse

Die berechneten maximalen mittleren Verbundspannungen jeder Stabvariante aus den ATENA-Modellen sind nach Wendelsteigung gruppiert in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-13 aufgeführt.

Tabelle 4-9: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 10°

10°		Wendelbreite [mm]			
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,50	30,50	36,60		
	0,75	27,40	35,90		
	1,00	37,00	31,10		
	1,25		30,70		
	1,50		30,50		
	2,00		30,50		

Tabelle 4-10: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 15°

15°		Breite [mm]			
	$\tau_{max}$ [Mpa]	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,50	22,30	32,00	30,30	
	0,75	25,50	31,60	27,50	
	1,00	27,90	32,70	40,40	
	1,25		36,90	38,30	
	1,50		36,70	39,40	
	2,00		31,60	23,20	

Tabelle 4-11: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 20°

20°		Breite [mm]			
	$\tau_{max}$ [Mpa]	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,50	18,70	22,90	26,60	27,20
	0,75	20,20	25,70	26,90	34,10
	1,00	24,20	30,10	34,20	34,60
	1,25		34,50	33,30	35,00
	1,50		36,00	39,90	43,10
	2,00		36,70	40,90	44,30

Tabelle 4-12: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 30°

30°		Breite [mm]			
	$\tau_{max}$ [Mpa]	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,50	11,40	13,20	17,00	18,20
	0,75	13,20	13,30	16,30	18,20
	1,00	14,20	16,10	19,50	20,70
	1,25		18,50	19,80	20,80
	1,50		20,40	24,20	25,00
	2,00		20,80	26,60	27,20

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 4-13: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 45°

45°		Breite [mm]			
		2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,50	7,50	9,30	9,70	8,90
	0,75	8,40	9,30	10,90	12,20
	1,00	9,20	10,60	11,60	11,80
	1,25		12,10	12,60	12,30
	1,50		13,10	14,80	14,90
	2,00		13,90	16,40	16,00

Die Modelle mit tieferen und breiteren Kerben lieferten tendenziell höhere Werte als flachere, schmalere Einschnitte. Hierbei ist aber die Reduktion der aufnehmbaren Zugkraft im verbleibenden Kernquerschnitt noch nicht berücksichtigt worden. Dazu wurde eine Zugfestigkeit des Stabes von 2000 MPa angenommen und für jede Kerbtiefe die Zugtragfähigkeit des Kernquerschnitts (siehe Abbildung 4-7) auf die Mantelfläche des Stabes in der Verbundlänge als oberer Grenzwert für die aufnehmbare mittlere Verbundspannung angesetzt. Die Ergebnisse dieser Schnitte sind in Tabelle 4-14 bis Tabelle 4-18 aufgeführt.

Maximal mögliche mittlere Verbundspannung

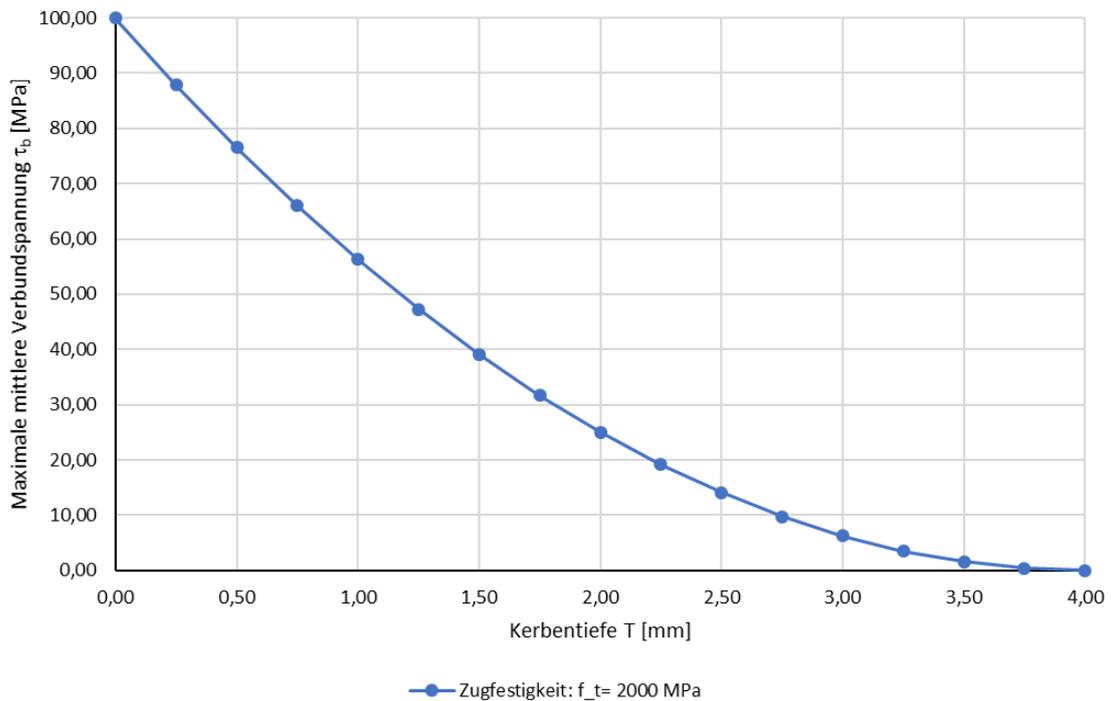


Abbildung 4-7: Verlauf der äquivalenten mittleren Verbundspannung bei Erreichen der Zugtragfähigkeit des Kernquerschnitts des Stabes

**Tabelle 4-14: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest-Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 10°**

10°	$\tau_{mod}$ [Mpa]	Breite [mm]				
		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	x	x
	0,50	4,00	30,50	36,60	x	x
	0,75	4,00	27,40	35,90	x	x
	1,00	4,00	37,00	31,10	x	x
	1,25	4,00	x	30,70	x	x
	1,50	4,00	x	30,50	x	x
	2,00	4,00	x	25,00	x	x

**Tabelle 4-15: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest-Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 15°**

15°	$\tau_{mod}$ [Mpa]	Breite [mm]				
		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	x
	0,50	4,00	22,30	32,00	30,30	x
	0,75	4,00	25,50	31,60	27,50	x
	1,00	4,00	27,90	32,70	40,40	x
	1,25	4,00	x	36,90	38,30	x
	1,50	4,00	x	36,70	39,06	x
	2,00	4,00	x	25,00	23,20	x

**Tabelle 4-16: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 20°**

20°	$\tau_{mod}$ [Mpa]	Breite [mm]				
		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	18,70	22,90	26,60	27,20
	0,75	4,00	20,20	25,70	26,90	34,10
	1,00	4,00	24,20	30,10	34,20	34,60
	1,25	4,00	x	34,50	33,30	35,00
	1,50	4,00	x	36,00	39,06	39,06
	2,00	4,00	x	25,00	25,00	25,00

**Tabelle 4-17: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest-Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 30°**

30°	$\tau_{\text{mod}}$ [Mpa]	Breite [mm]				
		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	11,40	13,20	17,00	18,20
	0,75	4,00	13,20	13,30	16,30	18,20
	1,00	4,00	14,20	16,10	19,50	20,70
	1,25	4,00	x	18,50	19,80	20,80
	1,50	4,00	x	20,40	24,20	25,00
	2,00	4,00	x	20,80	25,00	25,00

**Tabelle 4-18: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest-Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 45°**

45°	$\tau_{\text{mod}}$ [Mpa]	Breite [mm]				
		0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,50	9,30	9,70	8,90
	0,75	4,00	8,40	9,30	10,90	12,20
	1,00	4,00	9,20	10,60	11,60	11,80
	1,25	4,00	x	12,10	12,60	12,30
	1,50	4,00	x	13,10	14,80	14,90
	2,00	4,00	x	13,90	16,40	16,00

Dieselben Schnitte sind grafisch in Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-12 dargestellt.

Wendel - Steigung 10°

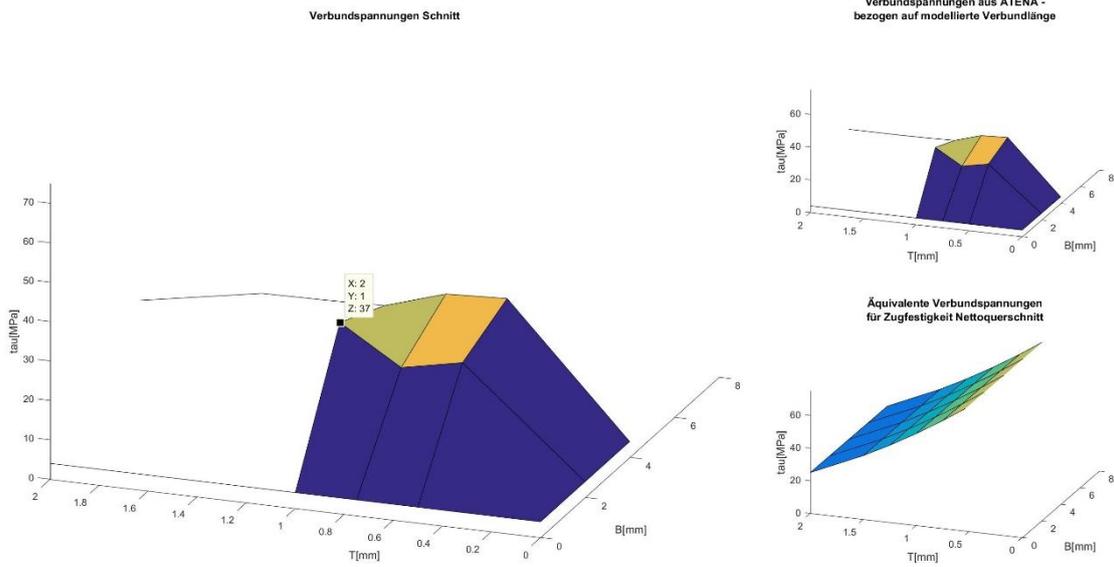


Abbildung 4-8: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 10°

Wendel - Steigung 15°

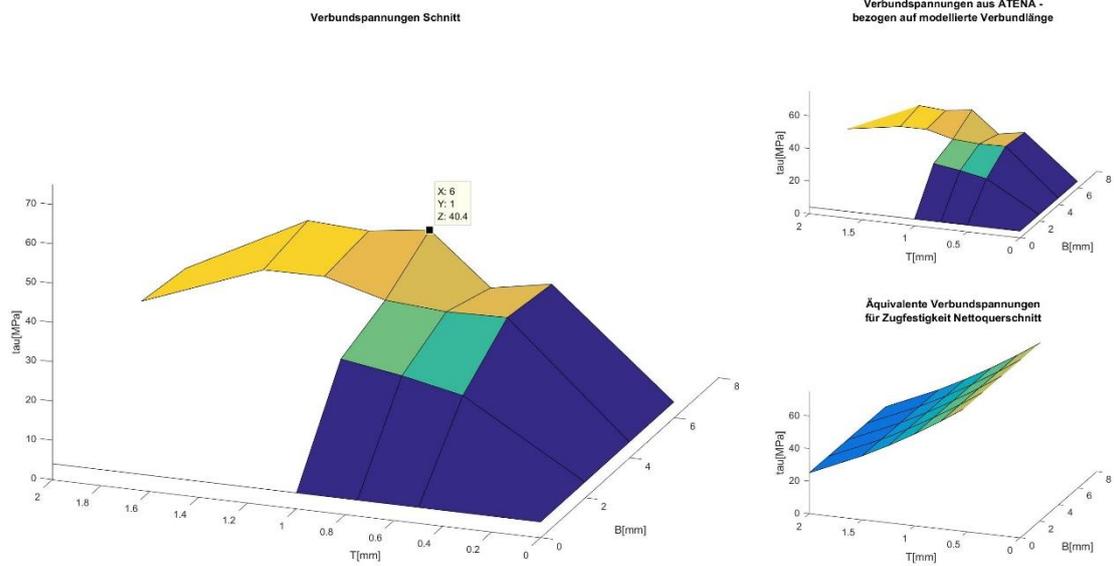


Abbildung 4-9: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 15°

Wendel - Steigung 20°

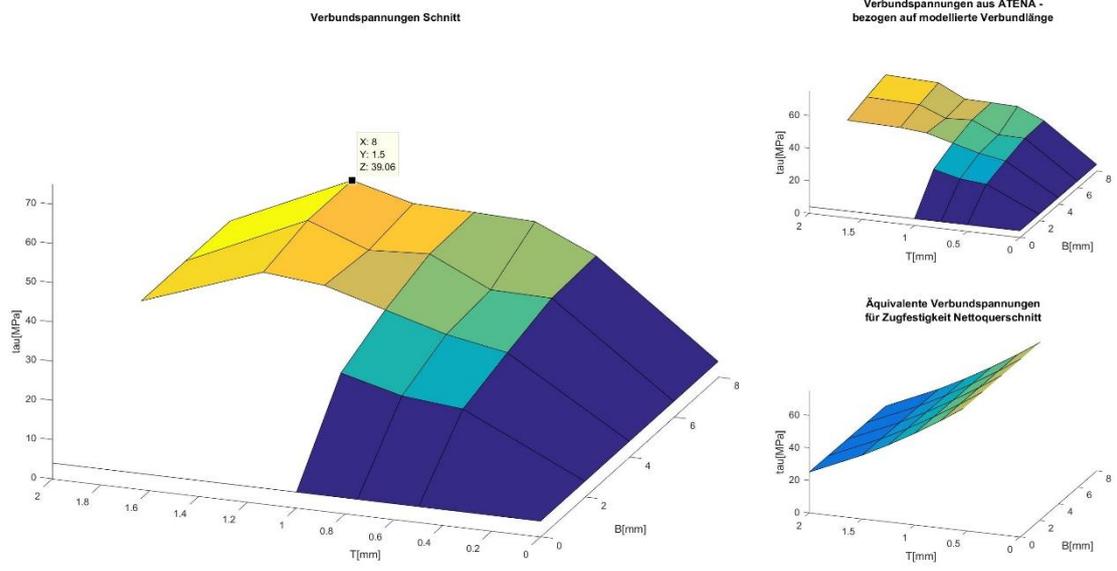


Abbildung 4-10: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 20°

Wendel - Steigung 30°

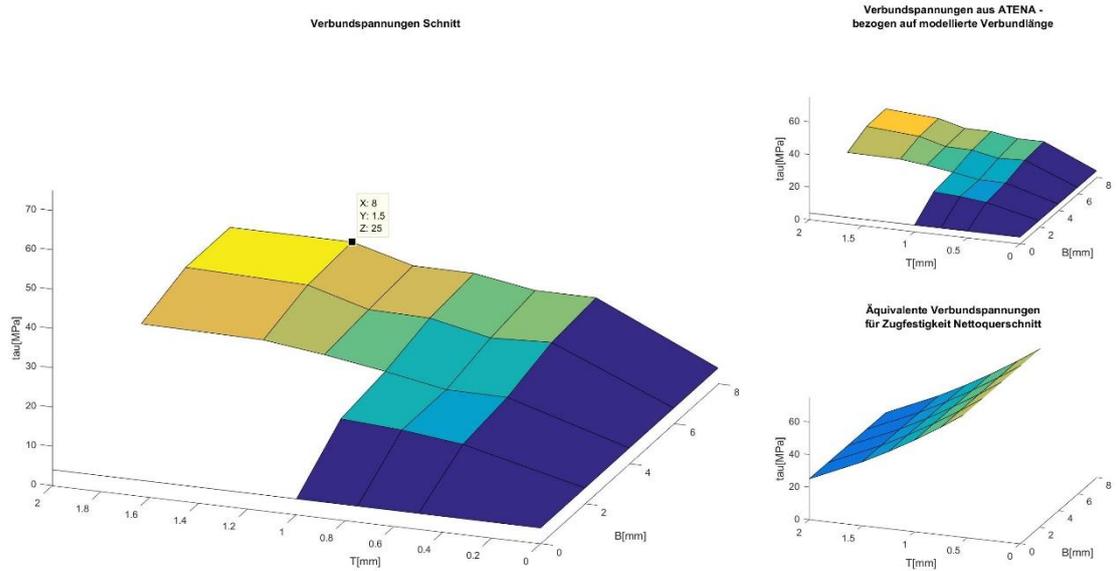


Abbildung 4-11: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 30°

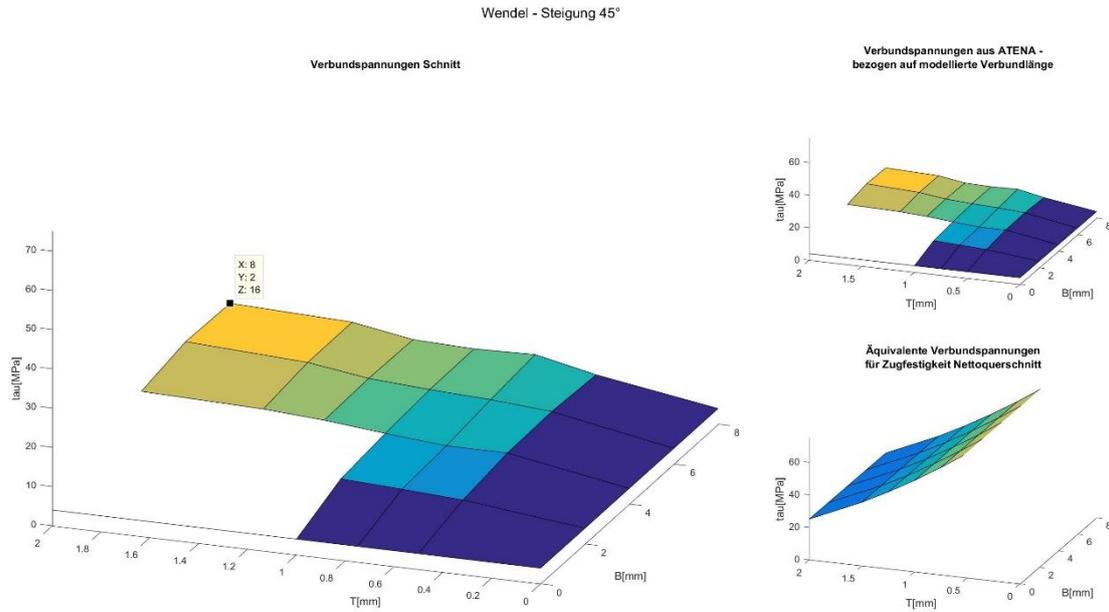


Abbildung 4-12: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 45°

Das höchste Ergebnis lieferte mit 40,4 MPa die Variante mit einer Wendelsteigung von 15°, Wendelbreite von 6,0 mm und Wendeltiefe von 1,0 mm, mit einigen weiteren Varianten knapp darunter.

Ein Vergleich der Ergebnisse nach ihrem Verhältnis von Zahnabstand zu Wendeltiefe, angelehnt an das Vergleichsmaß aus [11], zeigt keine offensichtliche Regelmäßigkeit (Abbildung 4-13).

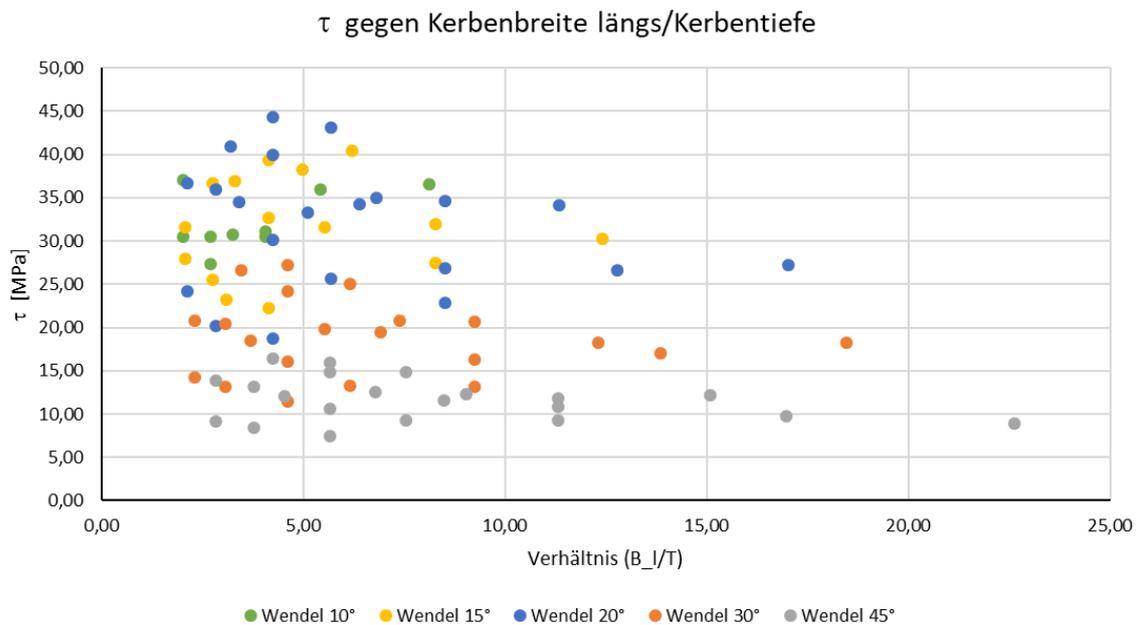
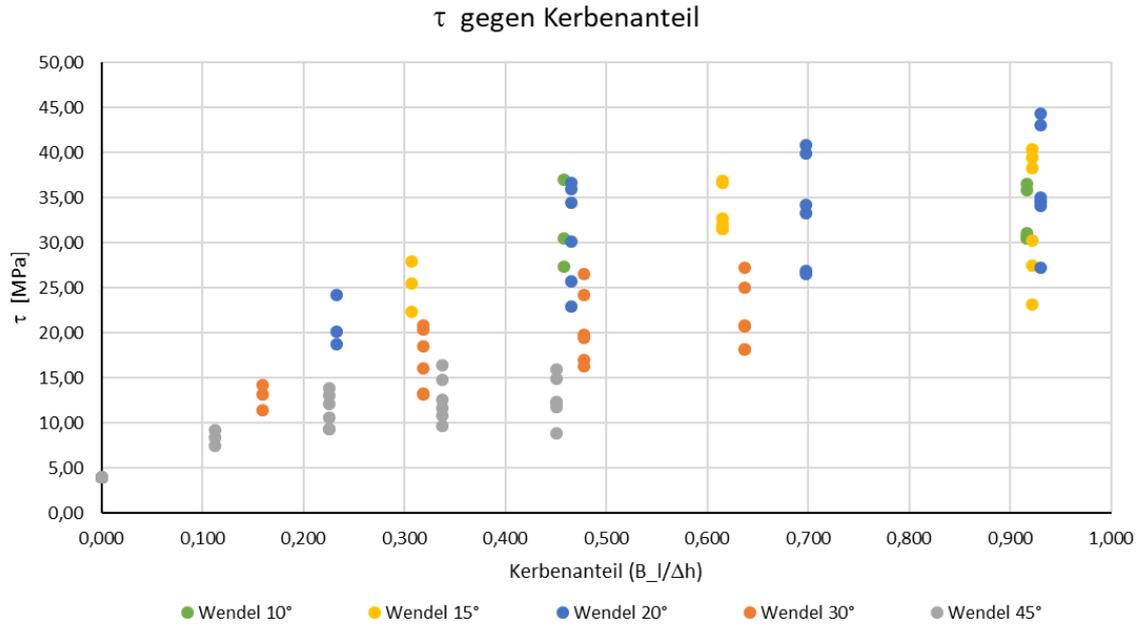


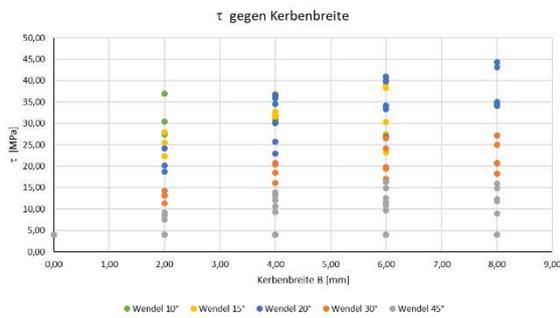
Abbildung 4-13: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite parallel zur Stabachse zur Kerbtiefe

Ein Vergleich des Verhältnisses von Zahnabstand zu Ganghöhe zeigt eine mögliche Tendenz zu höheren Verbundspannungen bei größerer Kerbenfläche (Abbildung 4-14).

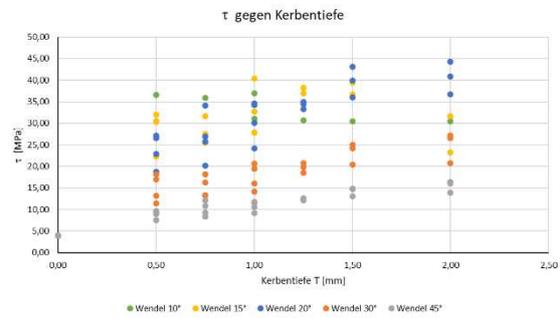


**Abbildung 4-14: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite parallel zur Stabachse zur Ganghöhe der Wendel**

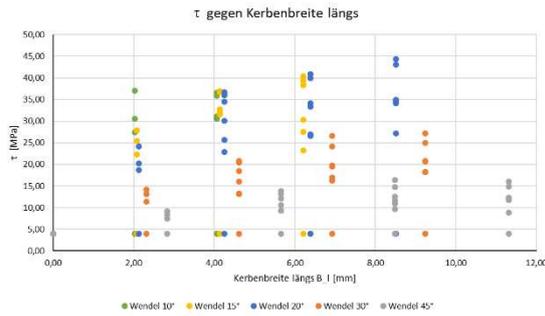
Weitere untersuchte Vergleichswerte und Gegenüberstellungen sind in Abbildung 4-15 bis Abbildung 4-18 dargestellt.



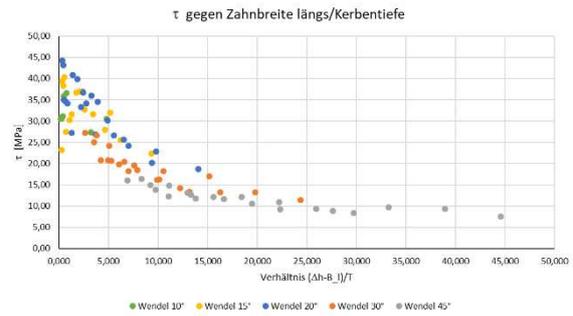
**Abbildung 4-15: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite**



**Abbildung 4-16: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbtiefe**



**Abbildung 4-17: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite parallel zur Stabachse**

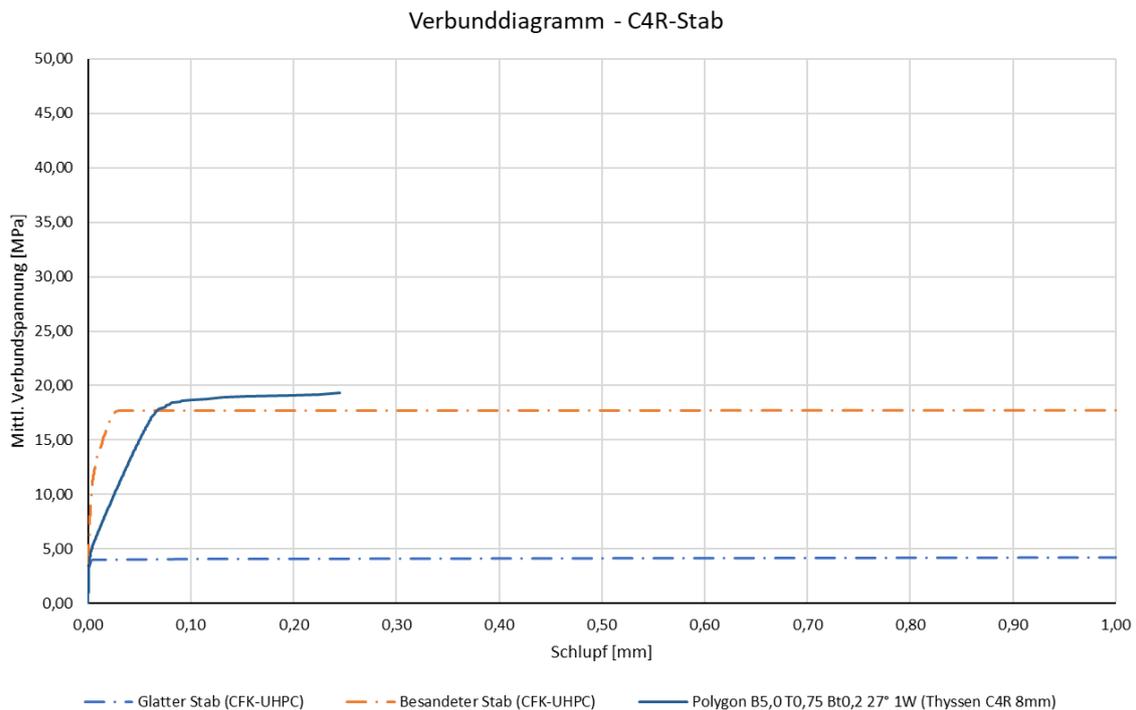


**Abbildung 4-18: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Zahnbreite parallel zur Stabachse zur Kerbtiefe**

Die Ergebnisse der Modelle mit Einzelzähnen und Einzelkerben sind in Anhang A enthalten.

Für den C4R-Stab wurde das gleiche Modell für einen Stab mit einer Ganghöhe von 12,70 mm (Wendelsteigung von 26,8° bei 8 mm Stabdurchmesser), einer Kerbenbreite von 5 mm und einer Kerbtiefe von 0,75 mm angepasst. Diese Parameter entsprechen der Version des C4R-Stabs mit 8 mm Außendurchmesser.

Die Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve mit einem Maximum von 19,3 MPa ist in Abbildung 4-19 dargestellt und die Modellgeometrie in Abbildung 4-20.



**Abbildung 4-19: Berechnungsergebnis für einen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser**

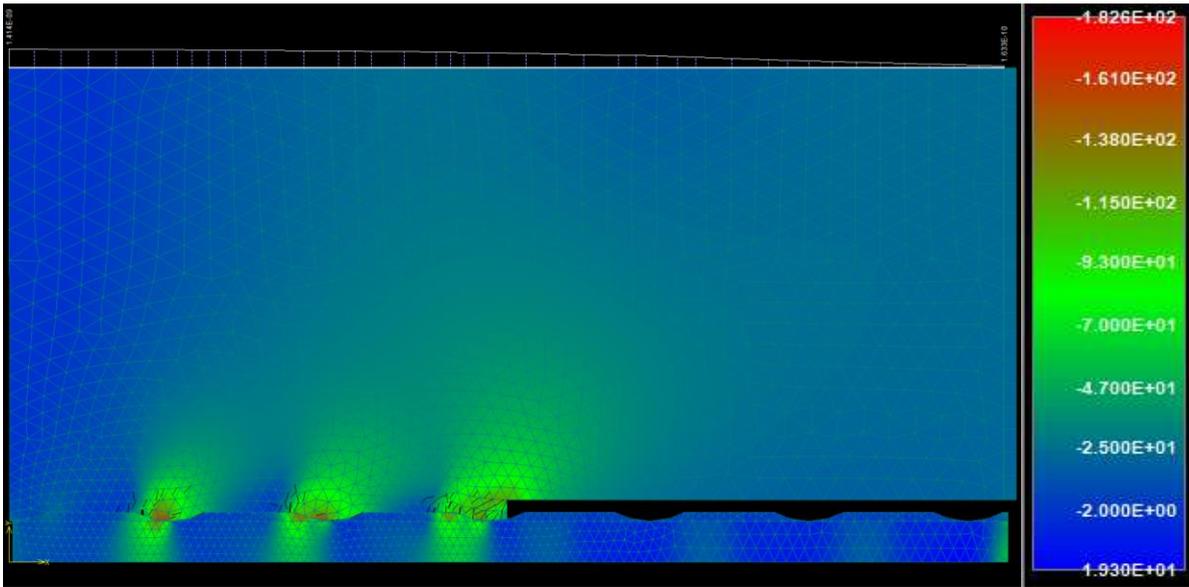


Abbildung 4-20: Minimale Hauptspannungen beim Erreichen der maximalen Last für den C4R-Stab [MPa]

#### 4.4 Kritik

Die höchsten erreichten mittleren Verbundspannungen in den Modellberechnungen liegen rund um 40 MPa und damit wesentlich über den Ergebnissen vorangegangener Versuche (siehe Kapitel 3.4), aber nur knapp über der vom Hersteller angegebenen maximalen mittleren Verbundspannung für die Thyssen C4R-Stäbe von etwa 37 MPa. Für diese Stäbe ergibt sich aus dem Modell allerdings nur eine maximale mittlere Verbundspannung von 19,3 MPa.

Verbunddiagramm - Vergleich des Berechnungsergebnisses mit Herstellerangaben

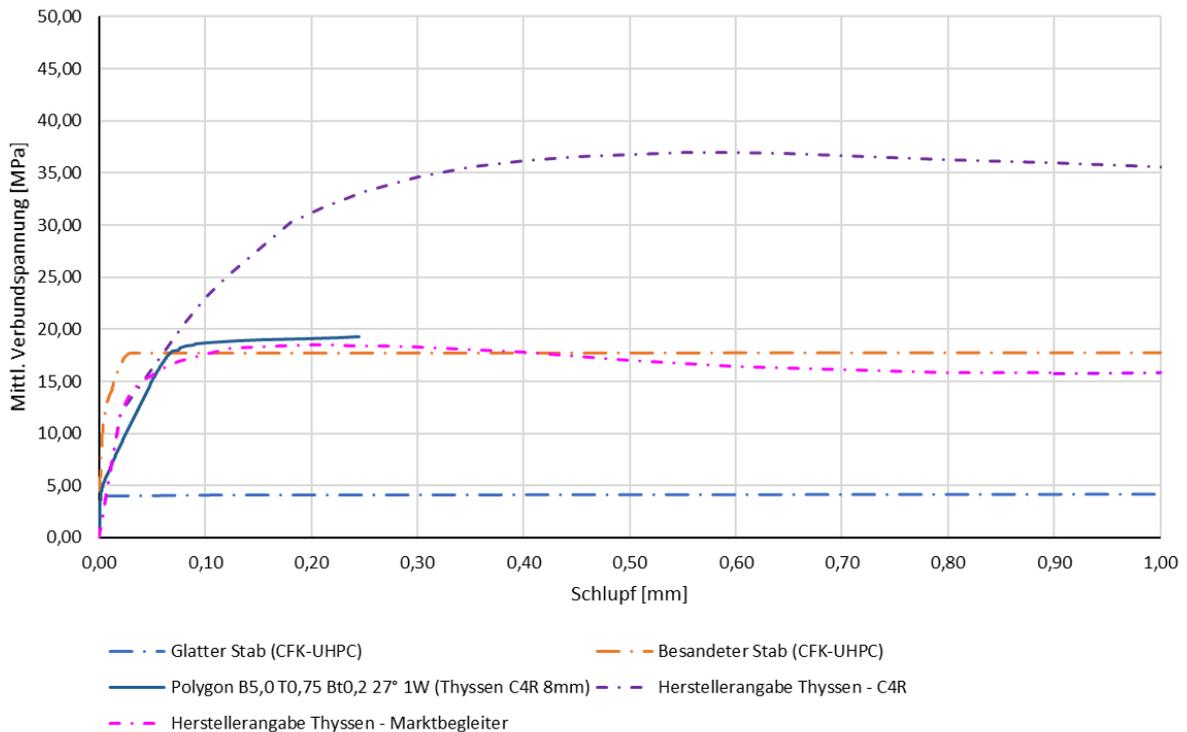


Abbildung 4-21: Vergleich des berechneten Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für einen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser mit den Herstellerangaben für den C4R-Stab und dessen Marktbegleiter

Diese Diskrepanz könnte durch eine zu starke Vereinfachung des Modells erklärt werden, da eine zweidimensionale Darstellung des Prüfkörpers in einem ebenen Spannungszustand teils wesentliche Effekte tangential zum Stab nicht berücksichtigt. Zusätzlich werden die Ergebnisse durch einige weitere Faktoren infrage gestellt:

Bei einigen wiederholten Berechnungen war ein wesentlicher Einfluss des FE-Netzes und der exakten Position der Begrenzungspunkte zu bemerken, da eine kleine Verschiebung oder neue Netzgenerierung das Ergebnis um über 10 % verändern konnte. Zusätzlich ist das FE-Netz an der Kontaktfuge zwischen CFK-Stab und Beton zwar so fein wie numerisch möglich definiert, aber mit nur zwei Elementen über die Tiefe der Wendel noch relativ grob, wie in Abbildung 4-3 dargestellt.

Die Angaben zur Scherfestigkeit von CFK (beziehungsweise dem Epoxidharz der Matrix) in der Literatur liegen teilweise sehr weit auseinander und reichen von 12 MPa bis 80 MPa (siehe Kapitel 2.2.2 und 3.2). In den ATENA-Modellen wurde der höchste Wert angenommen, um vor allem den Einfluss der Geometrie zu untersuchen. Zusätzlich wurde der Einfluss der kleiner werdenden Mantelfläche bei tieferen Einfräsungen nicht berücksichtigt. Zusammen können vor allem bei geringen Festigkeiten die maximalen Verbundspannungen deutlich eingeschränkt werden, wie in Abbildung 4-22 wieder für einen 8 mm dicken Stab dargestellt ist. Die nichtlineare Kurve der Einschränkung durch den verminderten Kernquerschnitt bei einer Zugfestigkeit von 2000 MPa ist zu Vergleichszwecken in dieser Abbildung ebenfalls enthalten.

Maximal mögliche mittlere Verbundspannung

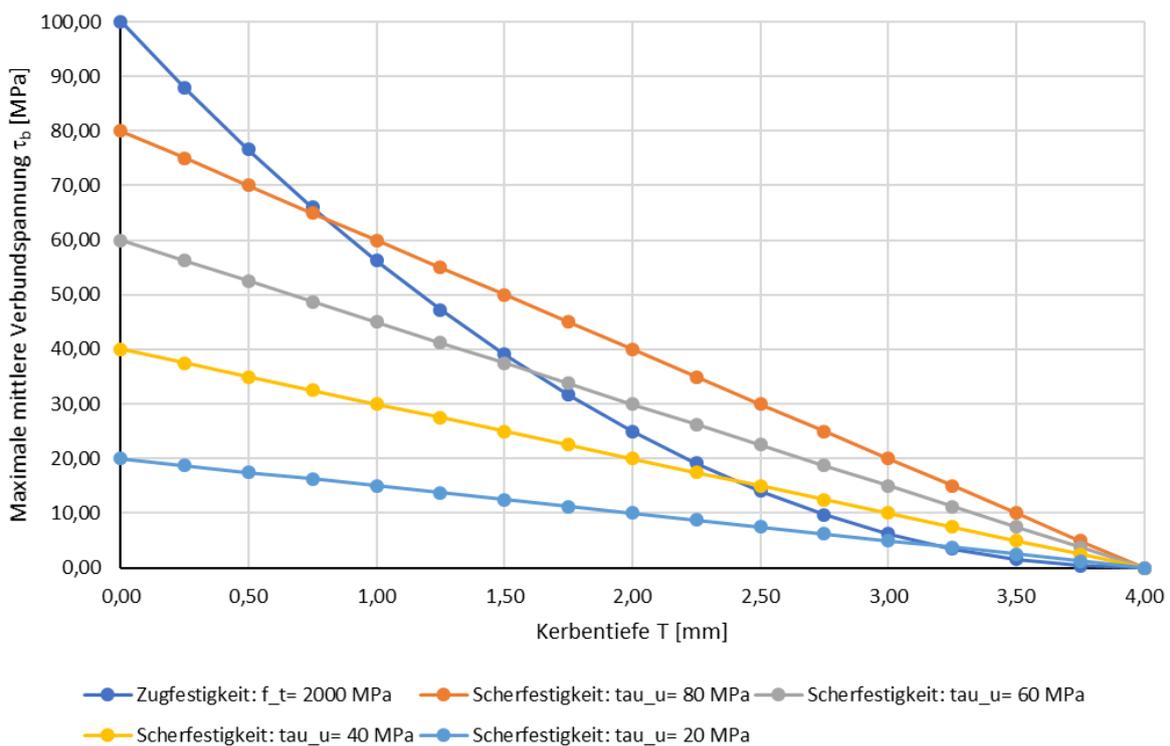


Abbildung 4-22: Vergleich der maximal möglichen mittleren Verbundspannungen aufgrund der Tragfähigkeit des Stabnettoquerschnitts und verschiedener Scherfestigkeiten bei kleiner werdender Mantelfläche des Kernquerschnitts

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, wurde auch ein mögliches (teilweises) Spalten des Prüfkörpers nicht berücksichtigt.

## 4.5 Auswahl der Stabgeometrien für die Versuche

Für die Versuche wurden drei Stabvarianten ausgewählt (nach Fräsvolumen gereiht):

Tabelle 4-19: Ausgewählte Wendelgeometrien für die Ausziehversuche

Gewählte Varianten	Wendelsteigung	Kerbenbreite [mm]	Kerbtiefe [mm]	$\tau_{vb,m,max}$ (ATENA 2D) [MPa]	Fräskopfdurchmesser [mm]
1	20°	4,0	0,5	22,90	8,5
2	15°	4,0	0,5	32,00	8,5
3	15°	6,0	0,75	27,50	12,75

Diese Auswahl beruhte auf einer Reihe verschiedener Überlegungen. Jedenfalls sollten die Stäbe nicht zu tief eingefräst werden, um die Zugtragfähigkeit des Stabes nicht zu stark zu verringern. Da aber die Stäbe einen Durchmesser von nur 8 mm hatten, hätte eine umlaufende 1 mm tiefe Kerbe den Nettoquerschnitt schon auf nur mehr 56 % der ursprünglichen Querschnittsfläche reduziert (siehe Abbildung 4-22). Daher wurden nur kleinere Wendeltiefen als 1 mm in Betracht gezogen. Infolge dessen wurden Kerbenbreiten von 8 mm ausgeschlossen, da die Fräsköpfe mit den notwendigen Radien nur schwer zu beschaffen gewesen wären.

Weiters sollten Varianten mit möglichst hohen berechneten Verbundspannungen getestet werden. Die Varianten mit einer Wendelsteigung von 10° wurden allerdings ausgeschlossen, da die für den geplanten Herstellungsprozess notwendigen Führungsrohre aus 3D-gedrucktem Kunststoff (siehe Kapitel 5) mit einer so geringen Ganghöhe als möglicherweise zu filigran eingeschätzt wurden.

Daher wurde zuerst Variante 2 ausgewählt, die die höchste berechnete Verbundspannung der verbleibenden Varianten von 32,00 MPa aufweist. Das Modell und die berechnete Verbundkurve für diese Variante sind in Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 dargestellt.

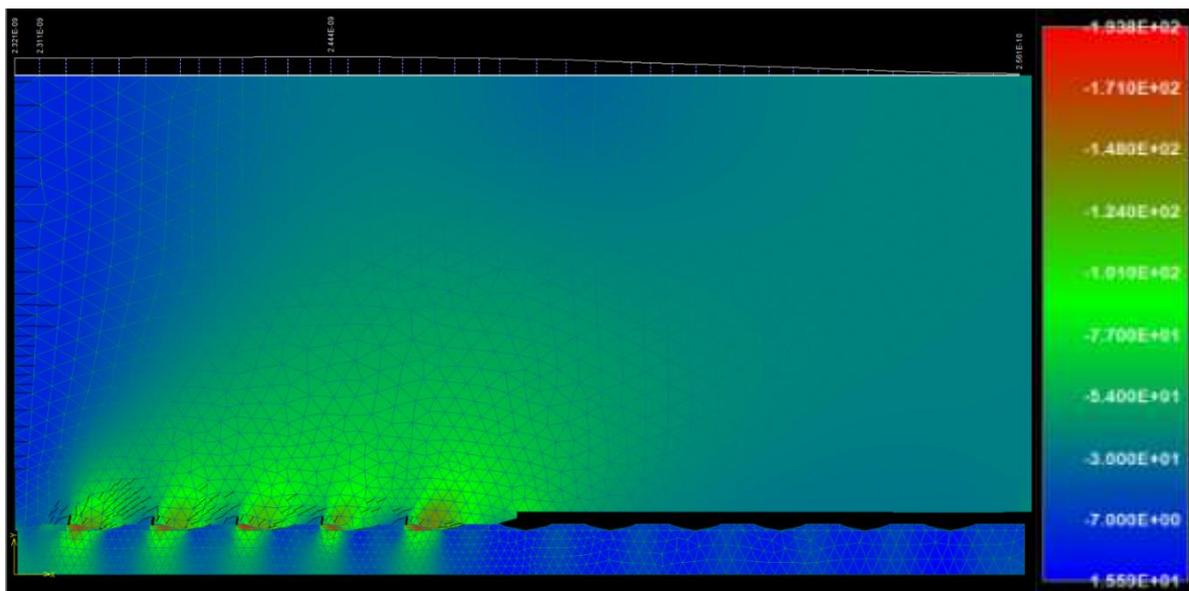


Abbildung 4-23: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 2 [MPa]

Verbunddiagramm - 15° B4,0 T0,5 mit Vergleichskurven

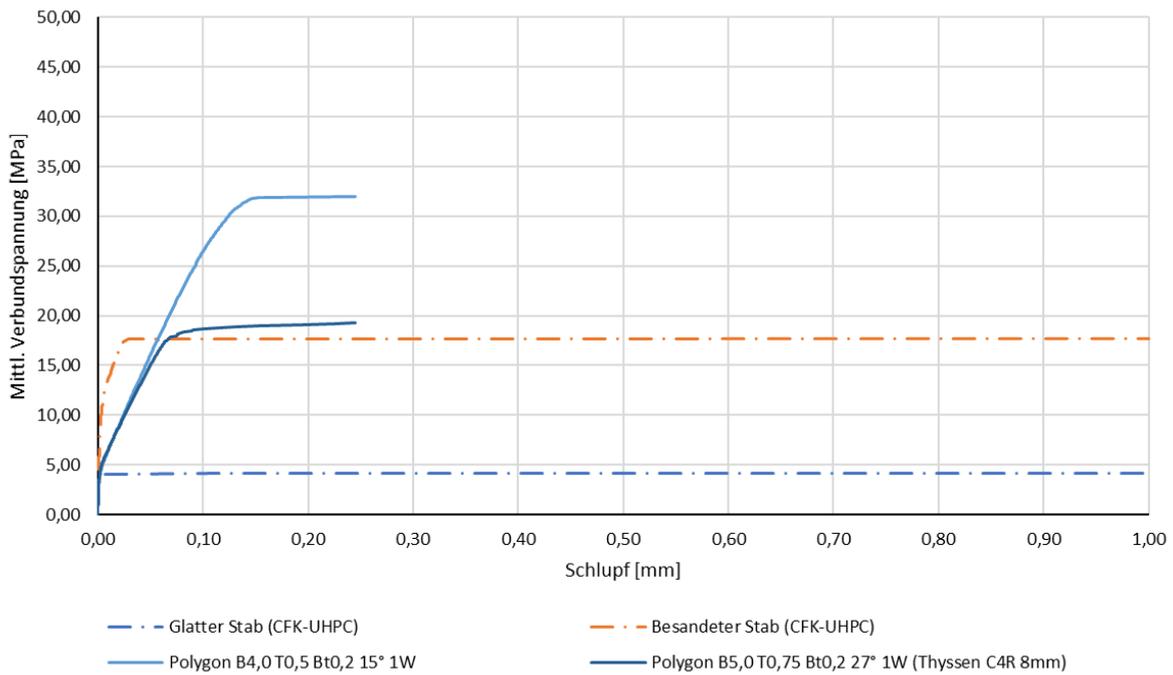


Abbildung 4-24: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 2 (hier bezeichnet als „Polygon B4,0 T0,5 Bt0,2 15° 1W“) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15], [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser

Dazu wurde die Variante 3 gewählt, die dieselbe Ganghöhe, aber eine tiefere und breitere Einfräsung aufweist. So könnte in den Versuchen der Einfluss einer veränderten Kerbengröße beobachtet werden. Zusätzlich war die berechnete maximale Verbundspannung von 27,50 MPa für diese Variante relativ niedrig im Vergleich zu ähnlichen Varianten (siehe Tabelle 4-15) und daher womöglich unterschätzt. Das Modell und die berechnete Verbundkurve dieser Variante sind in Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26 dargestellt.

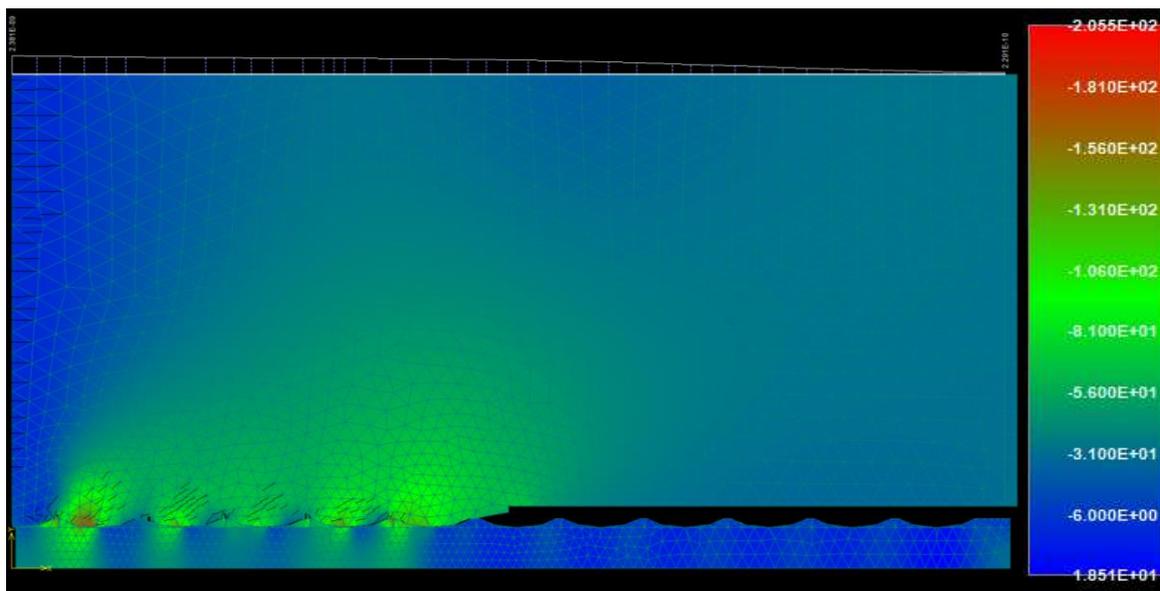


Abbildung 4-25: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 3 [MPa]

### Verbunddiagramm - 15° B6,0 T0,75 mit Vergleichskurven

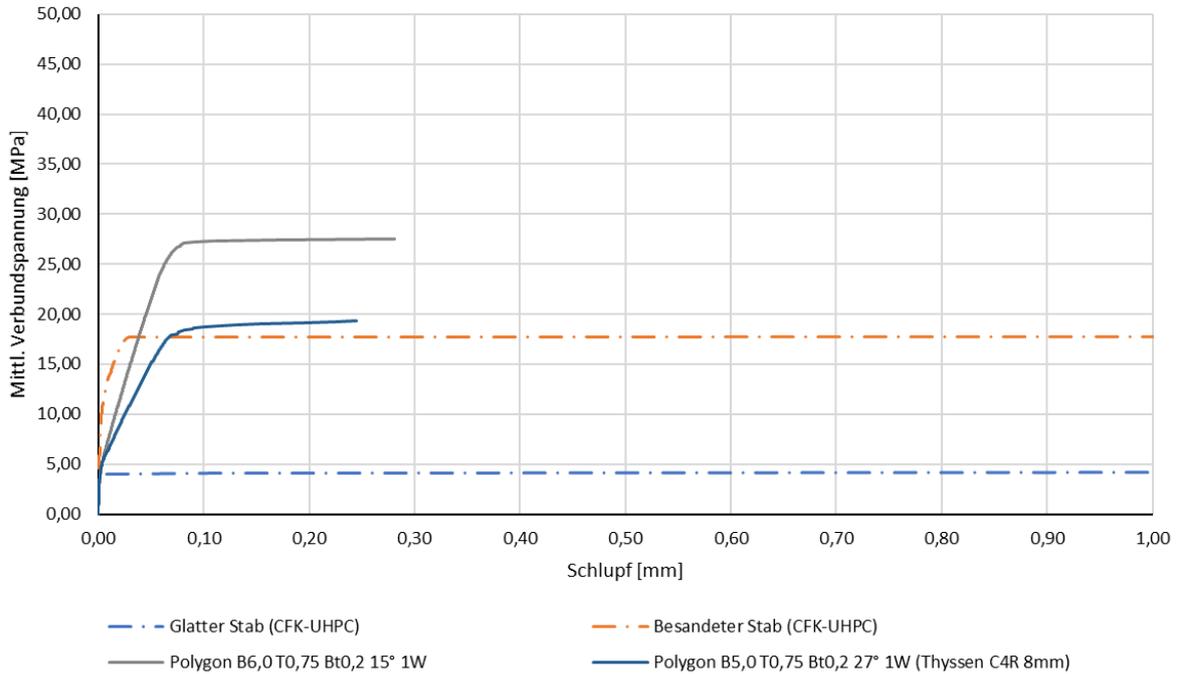


Abbildung 4-26: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 3 (hier bezeichnet als „Polygon B6,0 T0,75 Bt0,2 15° 1W“) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15], [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser

Schließlich wurde Variante 1 ausgewählt, die sich gegenüber der Variante 2 nur durch eine größere Wendelsteigung beziehungsweise Ganghöhe unterscheidet. So könnte in den Versuchen deren Einfluss untersucht werden. Die berechnete maximale Verbundspannung von 22,90 MPa war bereits um rund 28 % niedriger als die der Variante 2. Das Modell und die berechnete Verbundkurve dieser Variante sind in Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 dargestellt.

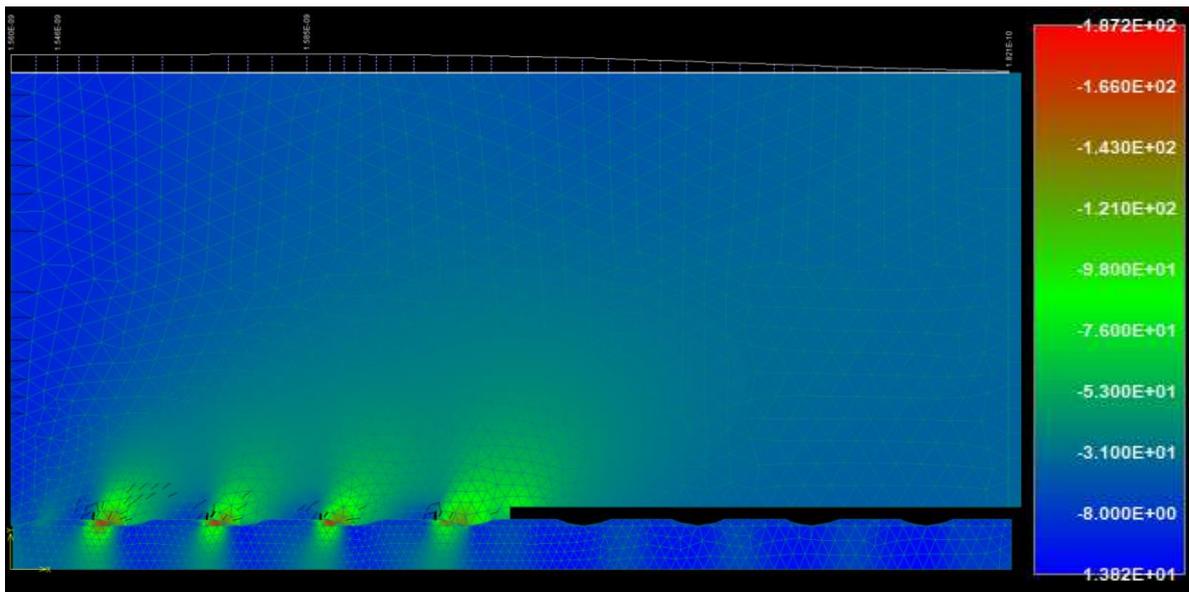


Abbildung 4-27: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 1 [MPa]

Verbunddiagramm - 20° B4,0 T0,5 mit Vergleichskurven

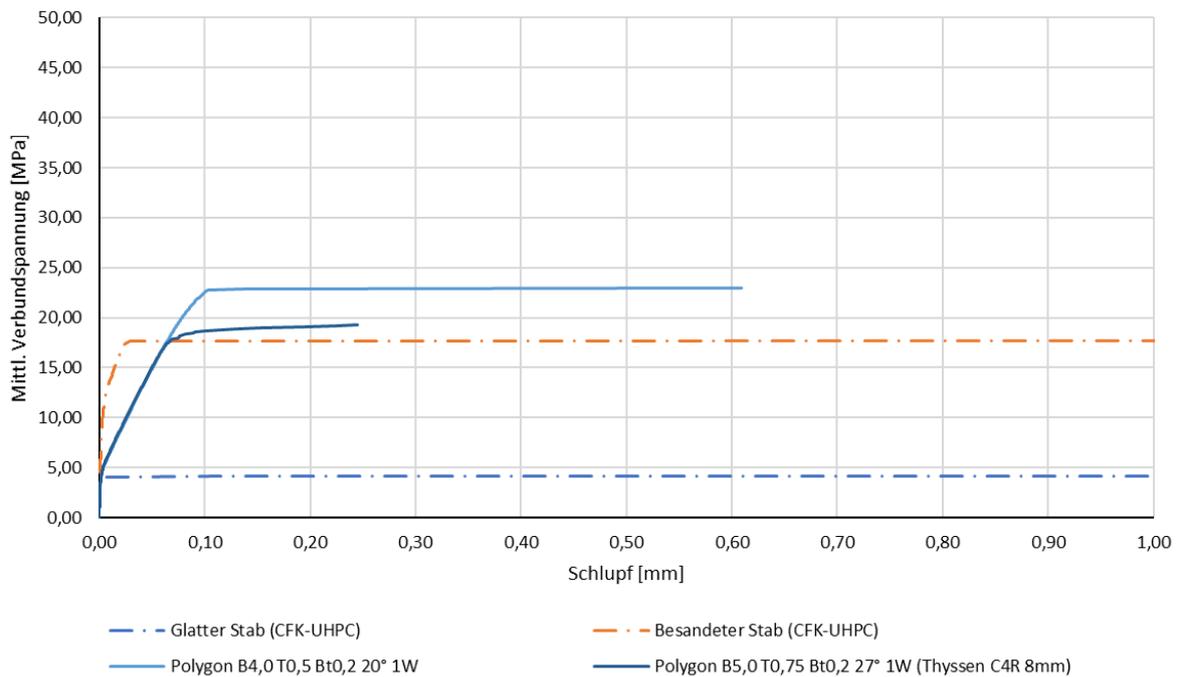


Abbildung 4-28: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 1 (hier als „Polygon B4,0 T0,5 Bt0,2 20° 1W“ bezeichnet) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15] und [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser

## 5 Versuche

Für diese Arbeit wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die erste im Prüflabor des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien und die zweite am Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur (BOKU) in Wien. Die erste Versuchsreihe wurde mit Prüfkörpern nach den Empfehlungen von RILEM mit einer Kantenlänge von  $10 \cdot d_s$  durchgeführt. Die zweite Versuchsreihe wurde mit größeren Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 150 mm durchgeführt, da in der ersten Versuchsreihe ein Großteil der Prüfkörper gespalten wurde und die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig sind. In der zweiten Versuchsreihe wurden größere Prüfkörper verwendet, um die Gefahr eines Spaltens zu verringern, und einige Aspekte der Herstellung und der Prüfung verbessert oder verfeinert, um die Herstellungs- und Messgenauigkeit zu verbessern.

In beiden Versuchsreihen wurden für die drei gewählten Stabvarianten aus Kapitel 4.5 ähnliche Stäbe mithilfe von 3D-gedruckten Führungen aus Kunststoff aus 8 mm dicken CFK-Stäben hergestellt. Die Führungsrohre sind in Abbildung 5-1 zu sehen.

Die C4R-Stäbe wurden von der Firma Thyssen bezogen, waren allerdings nur mit einem Außendurchmesser von 10 mm verfügbar.

In der zweiten Versuchsreihe wurden zusätzlich Stäbe mit einem Durchmesser von 8 mm der Firma S&P getestet, die mit einem in Epoxidharz getränkten Roving umwickelt waren und damit eine aufgeklebte umlaufende Rippe aufwiesen.

Beide von Herstellern bezogene Stabvarianten sind in Abbildung 5-2 abgebildet.

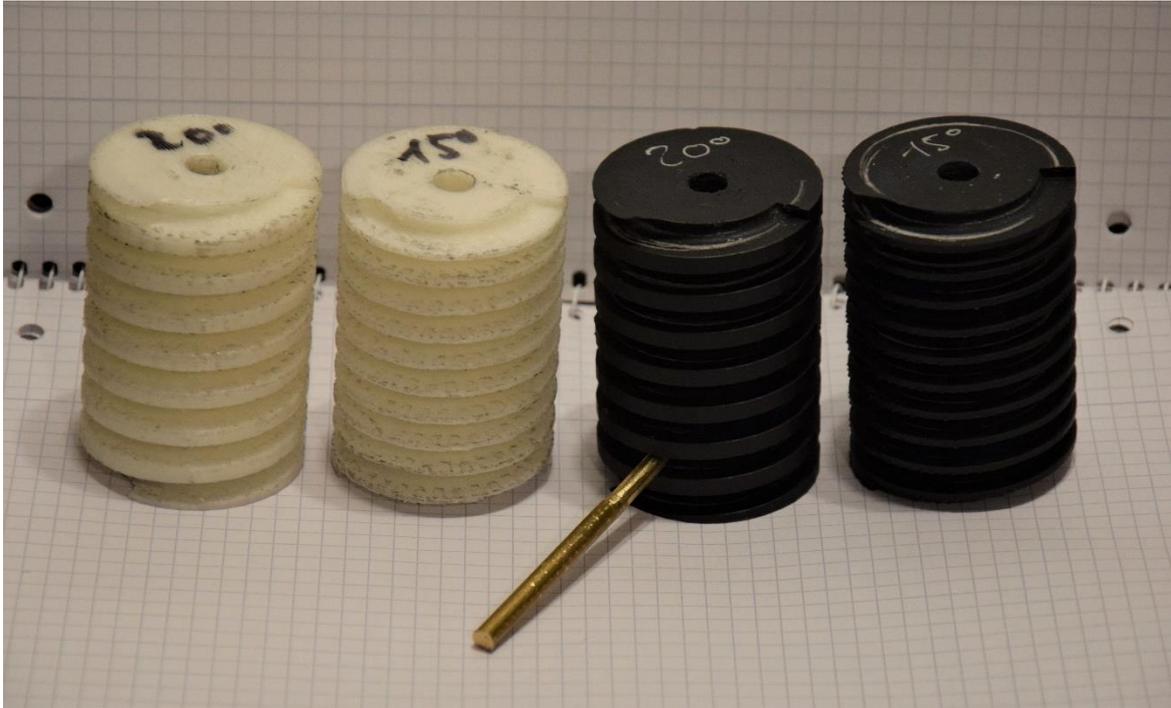


Abbildung 5-1: Führungsrohre mit Stift für die Herstellung der gewendelten CFK-Stäbe

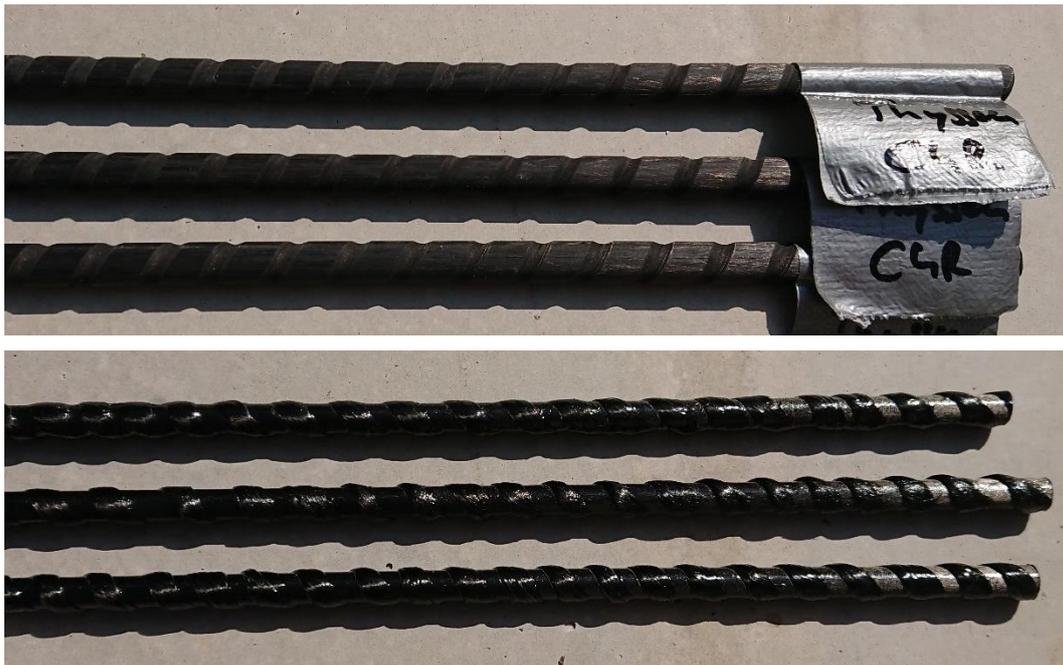


Abbildung 5-2: Gewendelte C4R-Stäbe der Firma Thyssen (oben) und beklebte Stäbe der Firma S&P (unten)

### 5.1 Erste Versuchsreihe – 80 mm und 100 mm Würfel

Die erste Versuchsreihe wurde mit Würfelausziehkörpern mit einer Kantenlänge von  $10 \cdot d_s$  und einer Verbundlänge von  $5 \cdot d_s$  gemäß den RILEM-Empfehlungen mit einer hydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck mit einer Nennlast von 1000 kN für Zugprüfungen des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien durchgeführt.

### 5.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Für die Prüfkörper wurden Einzelschalungen aus 21 mm dicken Mehrschicht-Holzplatten hergestellt und horizontal von zwei Seiten aus durchbohrt (siehe Abbildung 5-6). Die Stäbe würden somit quer zur Betonierichtung mittig im Prüfkörper eingebaut sein.

Zur Herstellung der Stäbe mit eingefrästen Wendeln wurden glatte CFK-Stäbe mithilfe einer Führungsschiene aus Holz an einem Bohrmaschinenständer vorbeigeführt, in dem eine Bohrmaschine mit dem jeweiligen Fräskopf eingespannt war. Ein Messingstift wurde passend zugeschliffen und an der Führungsschiene befestigt. Die Führungsrohre wurden mit Heißkleber an den Stäben befestigt und durch das Abfahren der Kerbe in den Führungsrohren mit dem Messingstift die Stäbe passend am Fräskopf vorbeigeschoben. Dieser Aufbau ist schematisch in Abbildung 5-3 dargestellt.

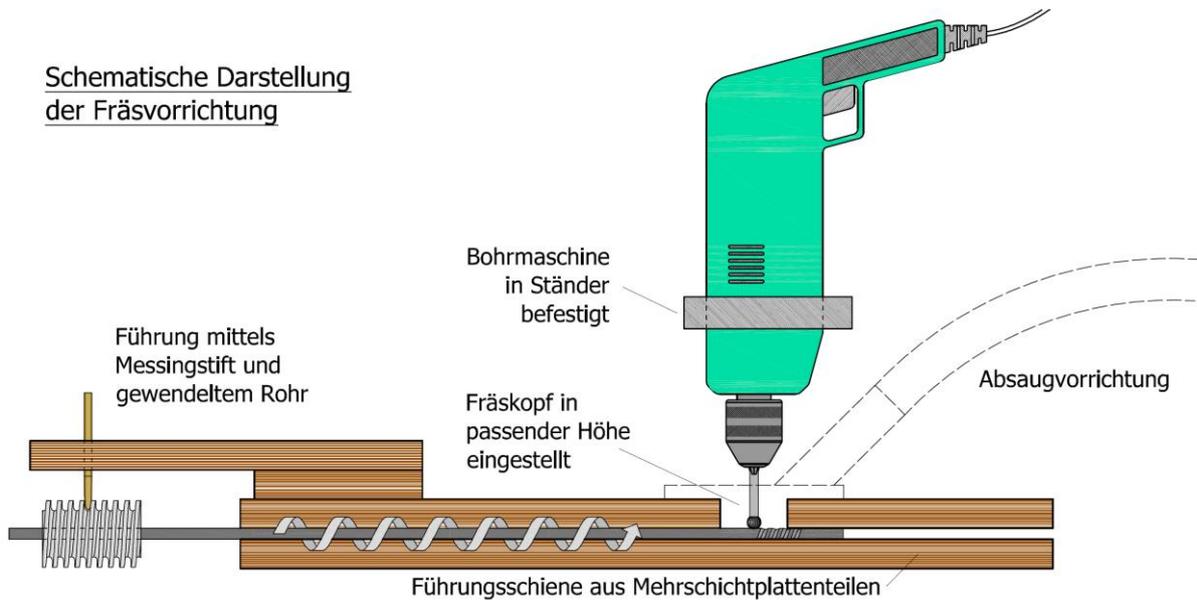


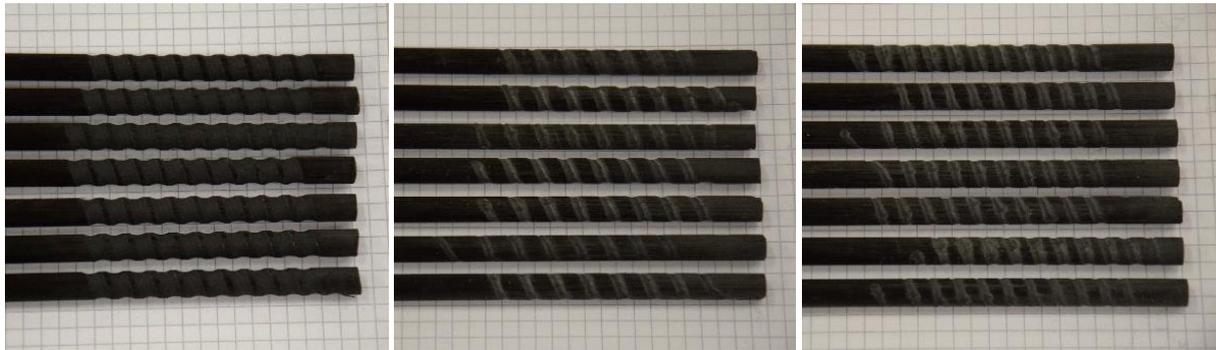
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der verwendeten Fräsvorrichtung für die Stäbe der ersten Versuchsreihe

Die verwendeten Fräsköpfe entsprachen mangels Verfügbarkeit nicht exakt den geplanten Durchmessern. Statt Durchmessern von 8,5 mm und 12,75 mm wurden Fräsköpfe mit Durchmessern von 7,8 mm und 10 mm verwendet. Zusätzlich zeigten die kleineren Fräsköpfe schon sehr schnell eine hohe Abnutzung, obwohl sie laut Hersteller für das Fräsen von CFK geeignet wären.



Abbildung 5-4: Vergleich des benutzten Fräskopfes mit 10 mm Durchmesser (jeweils links) mit dem benutzten 7,8 mm-Fräskopf (jeweils in der Mitte) und einem neuen 7,8 mm Fräskopfs(jeweils rechts)

Der vergleichsweise einfache Aufbau führte zu Herstellungsungenauigkeiten, die in Tabelle 5-1 aufgelistet sind. Die gefrästen Stäbe sind in Abbildung 5-5 zu sehen.



**Abbildung 5-5: Hergestellte gewendelte Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 10 mm Durchmesser gefräst (links), einer Wendelsteigung von 20° und dem Fräskopf mit 7,8 mm Durchmesser gefräst (Mitte) und einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 7,8 mm Durchmesser gefräst (rechts)**

**Tabelle 5-1: Gemessene Wendelabmessungen der verwendeten Stäbe (\*aus Wendelabmessungen rückgerechnet)**

Schalung Nr.	Würfelgröße [mm]	Stab DN [mm]	Fräskopf DN [mm]	Kerbenbreite* [mm]	Kerbtiefe [mm]	Wendelsteigung [°]	Ganghöhe [mm]
1	80	8	10,0	4,75	0,60	15	6,73
2	80	8	10,0	4,93	0,65	15	6,73
3	80	8	10,0	4,75	0,60	15	6,73
4	80	8	10,0	4,93	0,65	15	6,73
5	80	8	10,0	4,56	0,55	15	6,73
6	80	8	10,0	4,56	0,55	15	6,73
7	80	8	7,8	3,23	0,35	20	9,15
8	80	8	7,8	3,23	0,35	20	9,15
9	80	8	7,8	3,44	0,40	20	9,15
10	80	8	7,8	3,99	0,55	20	9,15
11	80	8	7,8	4,16	0,60	20	9,15
12	80	8	7,8	3,44	0,40	20	9,15
13	80	8	7,8	3,00	0,30	15	6,73
14	80	8	7,8	3,64	0,45	15	6,73
15	80	8	7,8	3,23	0,35	15	6,73
16	80	8	7,8	3,00	0,30	15	6,73
17	80	8	7,8	3,23	0,35	15	6,73
18	80	8	7,8	3,64	0,45	15	6,73
19	80	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
20	80	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
21	80	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
T1	100	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70
T2	100	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70
T3	100	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70

Zur Isolierung der Stäbe vom Beton in der Schalung und damit der Vorgabe der Verbundlänge wurden Aluminiumrohre passend zugeschnitten und in ihrer Länge auf  $\pm 0,1$  mm genau zugeschliffen, um eine Verbundlänge von 40 mm bzw. 50 mm zu erreichen.

Die Stäbe wurden in die Schalungen horizontal eingebaut und der Ansatz des Isolierrohres mit Gewebefband abgedichtet. Die Stäbe wurden am Anfang und Ende der Verbundlänge mit Gewebefband umwickelt, um das Bohrloch in der Schalung und das innere Ende des Isolierrohres abzudichten. Eine der Schalungen ist beispielhaft in Abbildung 5-6 zu sehen.

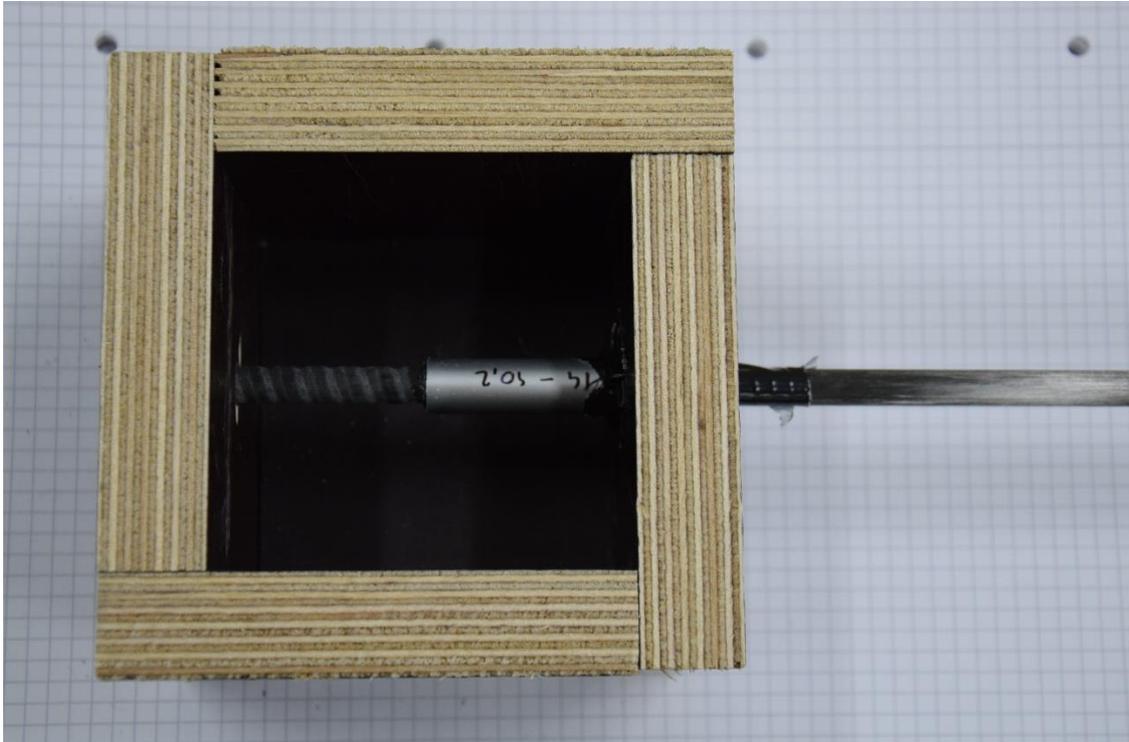


Abbildung 5-6: Schalung mit eingebautem Stab für die erste Versuchsreihe

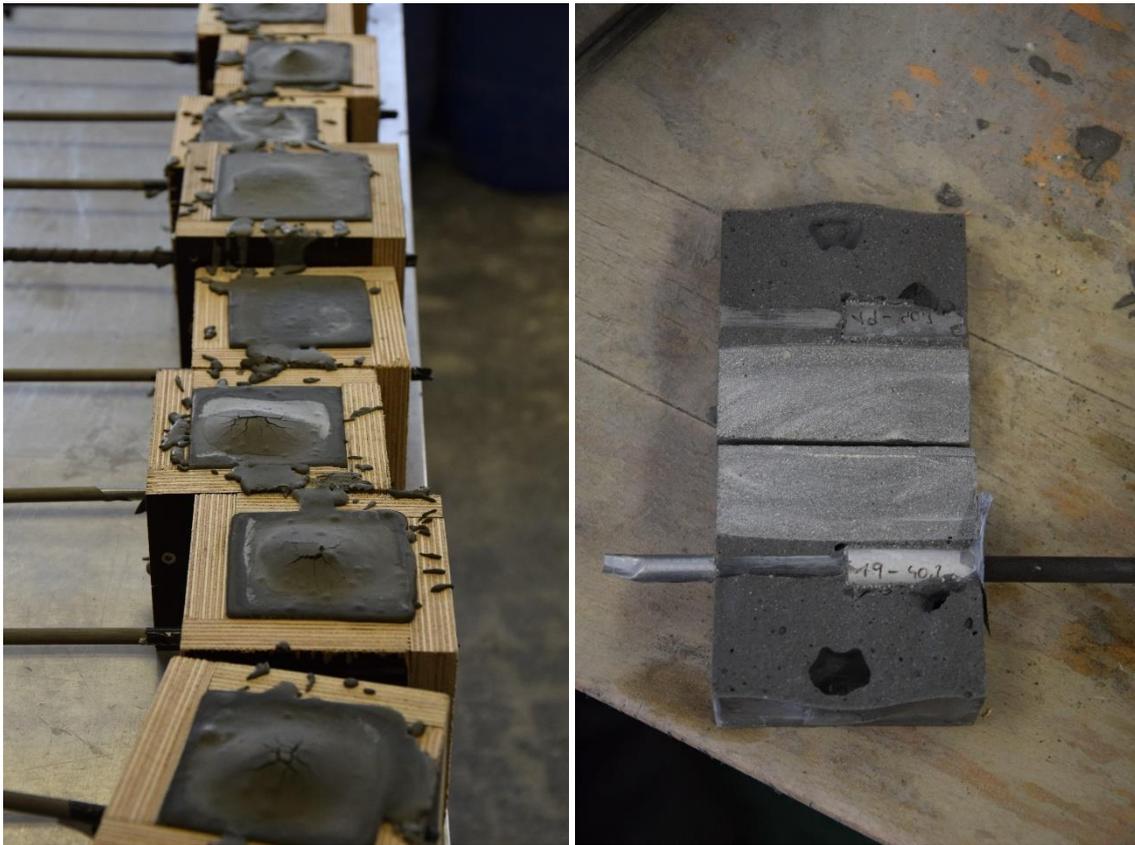
Der UHPC wurde am Institut für Werkstofftechnologie der TU Wien in einem Intensivmischer Typ R08 der Firma Eirich mit Stiftenwirbler hergestellt, vergossen und drei Tage lang unter Kunststoffplanen abgedeckt gelagert. Danach wurden die Prüfkörper im Labor des Instituts für Tragkonstruktion ausgeschalt und vier Wochen wiederum unter Kunststofffolien gelagert, bevor sie geprüft wurden.



Abbildung 5-7: Zwangsmischer des Instituts für Werkstofftechnologie der TU Wien (links) und die ausgeschalteten Prüfkörper im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen

Eine Reaktion des Aluminiums mit der Frischbetonmatrix führte zu einer unerwarteten Gasblasenbildung an den Isolierrohren in einem Großteil der Schalungen. Einer der Prüfkörper mit

einem glatten Stab (Prüfkörper 19) wurde aufgeschnitten, um das Ausmaß der Beeinträchtigung der Betonkörper abschätzen zu können (Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8: Aufgewölbte Oberseite der Prüfkörper (links) durch Gasblasenbildung an den Isolierrohren aus Aluminium und ein aufgeschnittener Prüfkörper mit mehreren sichtbaren Blasen über dem Isolierrohr (rechts)**

Die Gasblasen lagen nicht direkt im Verbundbereich und ein Spalten der Prüfkörper in der Ebene dieser Hohlräume wäre nach den Versuchen leicht festzustellen. Die Prüfkörper wurden daher getestet und die Lage von Hohlräumen in auftretenden Bruchflächen wurde während der Versuchsdurchführung dokumentiert.

### 5.1.2 Materialeigenschaften

Der UHPC wurde hinsichtlich seiner Druckfestigkeit mit sechs 100 mm-Würfel und seiner Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und seines E-Moduls mit zwölf 40×40×160 mm-Prismen geprüft.

Die Versuche ergaben die in Tabelle 5-2 aufgelisteten mittleren Materialkennwerte.

Tabelle 5-2: Mittlere Materialkennwerte aus der Prüfung des UHPC für die erste Versuchsreihe

Mittlere Druckfestigkeit (100 mm Würfel × 6):	176,25 MPa
Mittlere Druckfestigkeit (40×40×160 mm-Prisma × 6 nach Biegezugversuch):	170,05 MPa
Mittlere Druckfestigkeit (40×40×160 mm-Prisma × 6 ohne Biegezugversuch):	165,03 MPa
Mittlerer E-Modul (40×40×160 mm-Prisma × 3):	56.276 MPa
Mittlere Biegezugfestigkeit (40×40×160 mm-Prisma × 6):	12,13 MPa

Die Bewehrungsstäbe mit eingefräster Wendel wurden aus glatten S&P Clever CFK-Bewehrungsstäben hergestellt. Laut einem vom Hersteller übermittelten Prüfbericht weisen diese Stäbe parallel zur Stabachse eine mittlere Zugfestigkeit von 2.048 MPa und einen E-Modul von 161 GPa auf.

Die C4R-Stäbe der Firma Thyssen wiesen laut Hersteller eine Zugfestigkeit von 1.650 MPa, eine Bruchdehnung von 1,1 % und einen E-Modul von 151 GPa auf. Die Kunststoffmatrix bestand aus Epoxidharz.

### 5.1.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden mit einer Prüfmaschine zum Auszug des Stabs nach oben und einer im Boden verankerten, aufgeständerten Lagerplatte durchgeführt. Die Stabenden wurden über Klemmbacken mit der Prüfmaschine verbunden. Der Aufbau ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

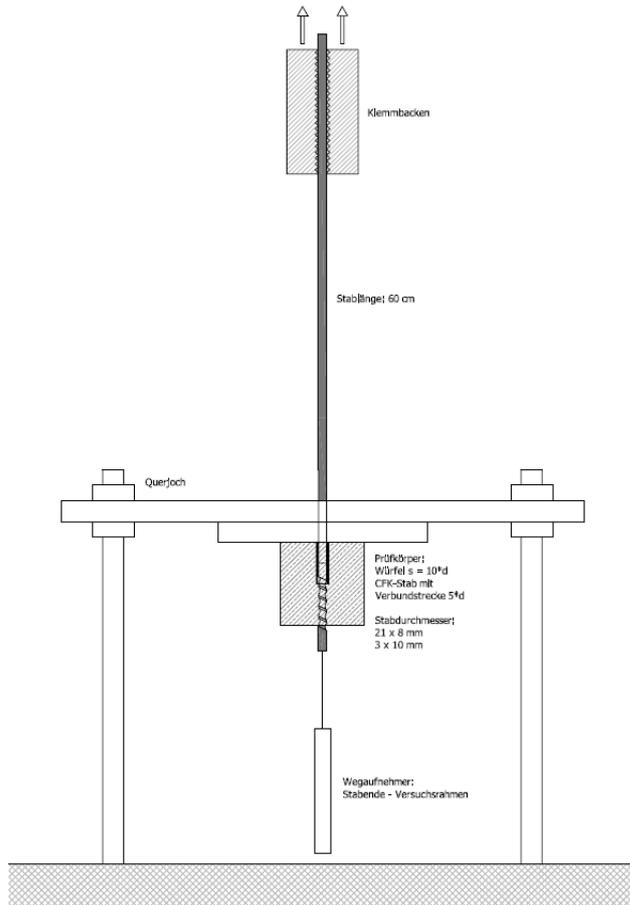


Abbildung 5-9: Versuchsaufbau für die erste Versuchsreihe

Die eingeleitete Kraft wurde mit einer in der Maschine integrierten Kraftmessdose gemessen und der Auszug des Stabes über einen Wegaufnehmer an der Unterseite des Prüfkörpers, der am freien Stabende montiert wurde. Über diesen Wegaufnehmer wurde die Verschiebung des freien Stabendes relativ zum Prüfraumen aufgezeichnet.

Die Versuche wurden maschinenweggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt.

#### 5.1.4 Ergebnisse

Die maximalen erreichten mittleren Verbundspannungen der ersten Versuchsreihe sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Der rot hinterlegte Wert für Versuchskörper 6 wurde nicht bei der Berechnung des Durchschnitts für diesen Stabtyp berücksichtigt, da kein Verbundversagen eintrat.

Tabelle 5-3: Maximale mittlere Verbundspannungen aus der ersten Versuchsreihe

$\sigma_{\tau_{max}}$ [MPa]	D10 15°	D7,8 20°	D7,8 15°	glatt	C4R
	Vk1-Vk6	Vk7-Vk12	Vk13-Vk18	Vk19-Vk21	VkT1-VkT3
	<b>25,782</b>	<b>24,710</b>	<b>23,933</b>	<b>5,239</b>	<b>27,817</b>
1	26,51	27,03	24,09		29,52
2	28,97	22,43	22,56	5,56	25,57
3	22,32	20,95	26,12	4,92	28,36
4	26,31	23,29	20,46		
5	24,81	24,82	26,32		
6	21,44	29,73	24,05		

In Abbildung 5-10 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 1 bis 6 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von 15° und der größeren gefrästen Kerbe dargestellt.

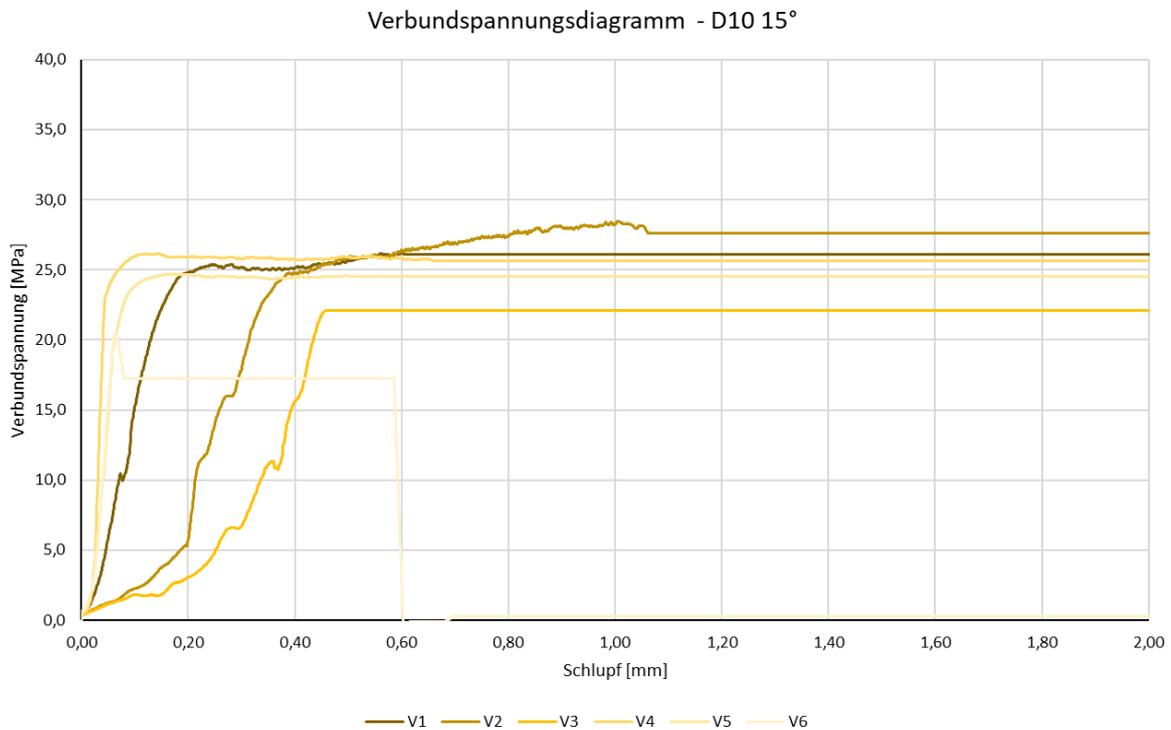


Abbildung 5-10: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 1-6 der ersten Versuchsreihe

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert dieser Stabgruppe beträgt 13,4 % oder 3,46 MPa.

Bei den Versuchskörpern 1-5 trat ein Spalten der Würfel ein, bei Versuchskörper 6 wurde der CFK-Stab am Zugende zwischen den Klemmbacken zerdrückt (siehe Abbildung 5-11), ohne dass ein Verbundversagen eintrat. Deshalb wurde dieser Versuch nicht in die Berechnung der mittleren maximalen Verbundspannung oder der mittleren Verbundkurve für diese Versuchsgruppe einbezogen.



**Abbildung 5-11: Zerdrücktes Zugende des CFK-Stabs in Versuchskörper 6**

Die Rippen der Stäbe, deren Prüfkörper gespalten wurden waren teilweise stark beschädigt, wie in Abbildung 5-12 zu sehen ist.



**Abbildung 5-12: Gespalteener Prüfkörper 3 (oben) und beschädigter Stab 3 (unten) nach dem Versuch**

Nur bei Versuchskörper 4 waren in den Spaltbruchflächen größere Gasblasen enthalten (Abbildung 5-13). Die maximal erreichte mittlere Verbundspannung dieses Prüfkörpers lag aber über dem Durchschnitt dieser Versuchsgruppe. Daher wurde angenommen, dass dadurch das Ergebnis des Versuchs nicht beeinträchtigt wurde und das Ergebnis in die weitere Auswertung aufgenommen.



Abbildung 5-13: Gespaltener Prüfkörper 4 mit großen Gasblasen (oben) und beschädigter Stab 4 (unten) nach dem Versuch

In Abbildung 5-14 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 7 bis 12 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von 20° und der kleineren gefrästen Kerbe dargestellt.

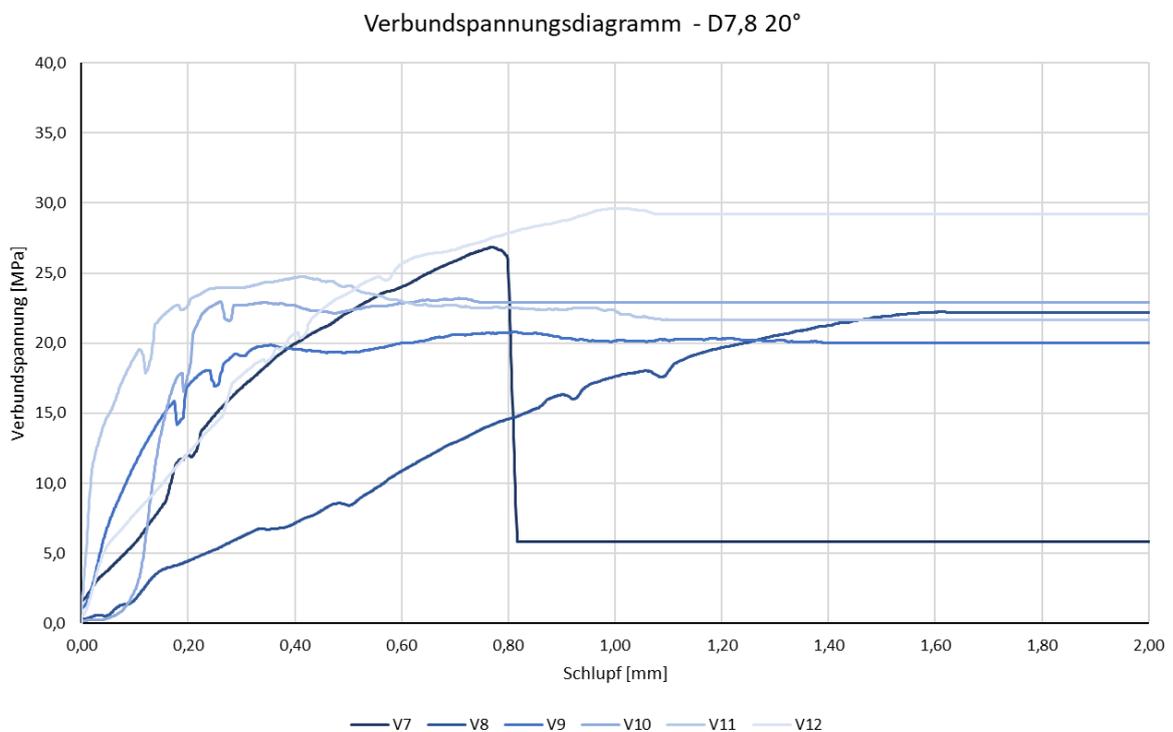
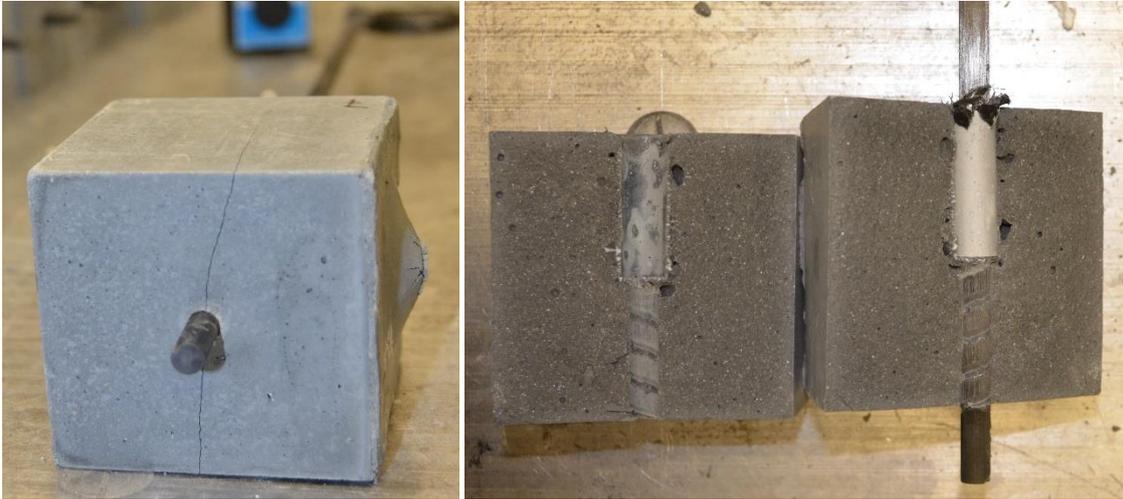


Abbildung 5-14: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 7-12 der ersten Versuchsreihe

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert dieser Stabgruppe beträgt 20,3 % oder 5,02 MPa.

Bei Versuchskörper 7 wurde ebenfalls der Stab zwischen den Klemmbanken zerdrückt, der Prüfkörper wies aber einen Spaltriss auf (Abbildung 5-15) und die erreichte Maximallast lag über dem Durchschnitt dieser Prüfkörpergruppe.



**Abbildung 5-15: Spaltriss in Prüfkörper 7 nach dem Versuch (links) und der nahezu unbeschädigte CFK-Stab im Inneren (rechts)**

Bei den Versuchskörpern 8, 10, 11 und 12 wurden wiederum die Prüfkörper gespalten und die Stabrippen beschädigt, bei Versuchskörper 9 wurden die Rippen des CFK-Stabs abgeschert und der Stabkern ausgezogen (Abbildung 5-16). Bei Prüfkörper 10 waren ebenfalls die Rippen des Stabs abgeschert (Abbildung 5-17).

Nur bei Versuchskörper 8 waren zwei größere Gasblasen mit einem Durchmesser von etwa 10 mm in den Bruchflächen vorhanden.

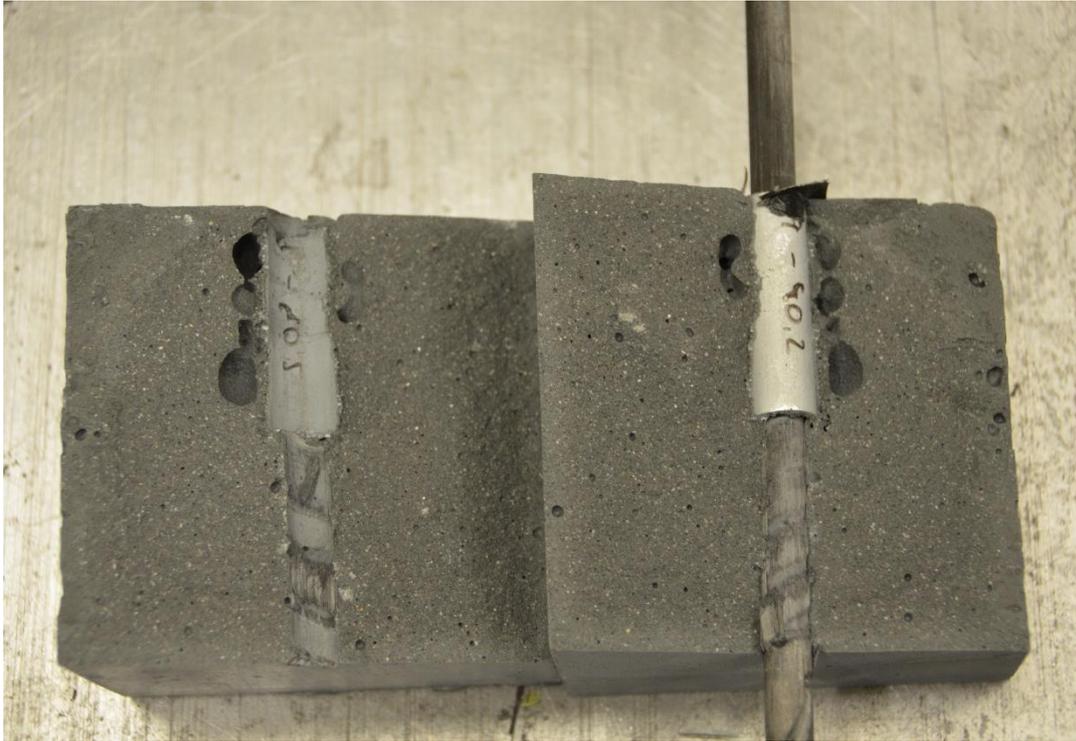


Abbildung 5-16: Nachträglich gespaltener Prüfkörper 9 mit abgescherten Stabrippen

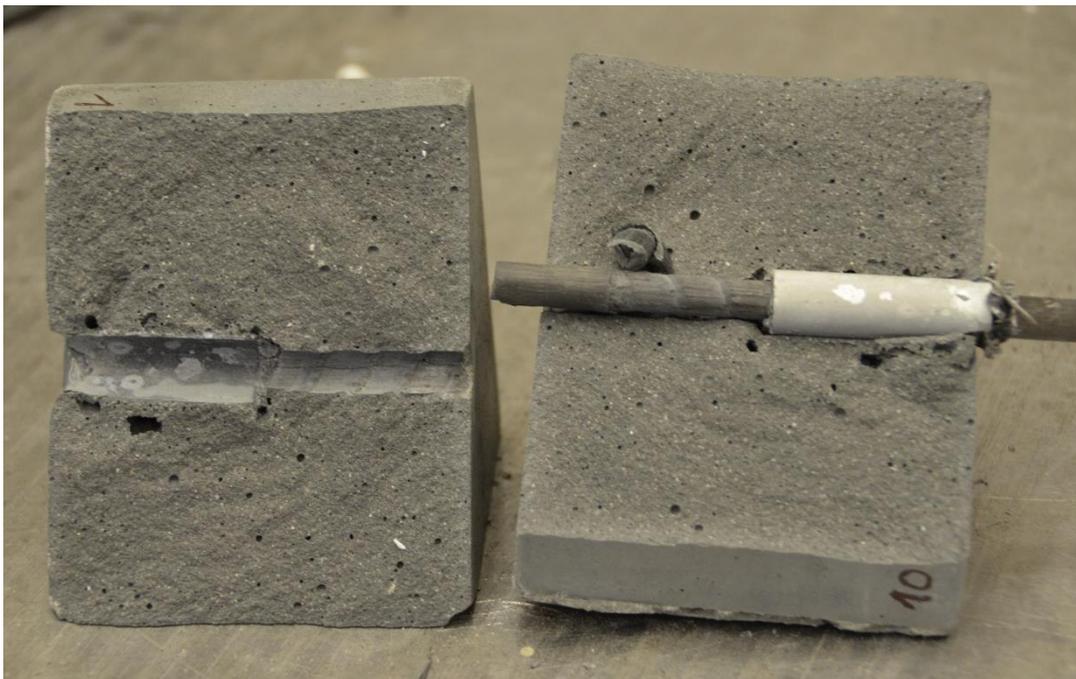
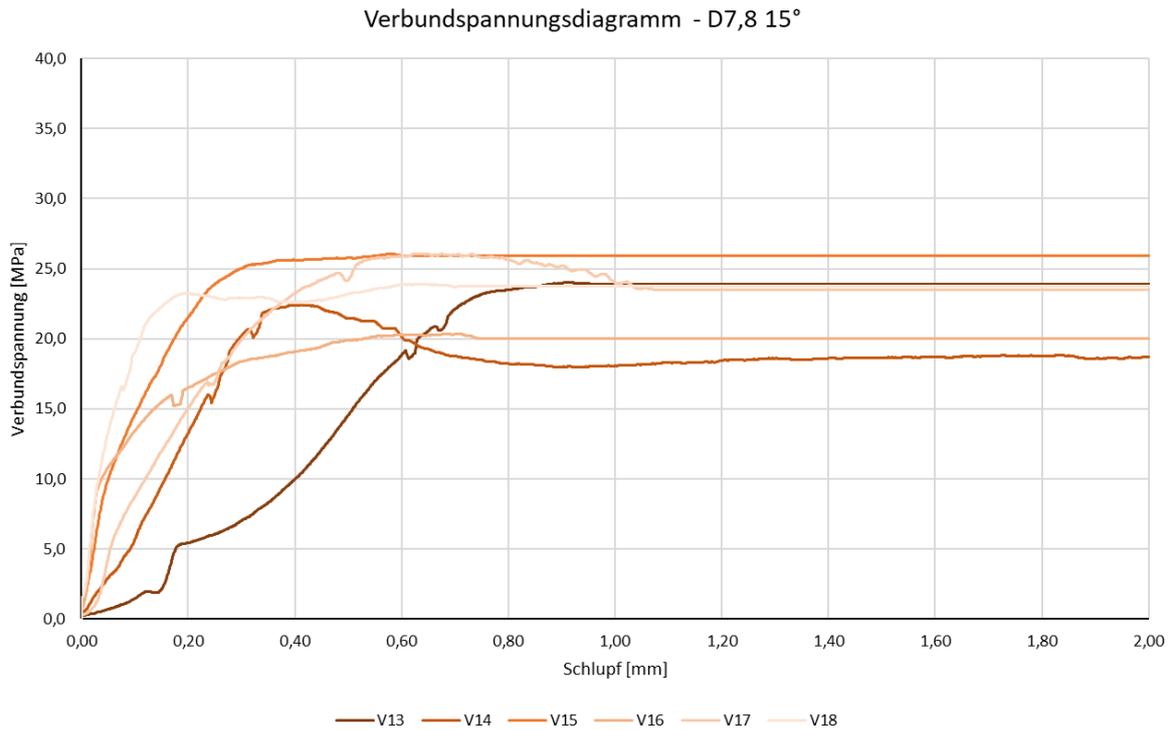


Abbildung 5-17: Im Versuch gespaltener Prüfkörper 10 mit abgescherten Rippen

In Abbildung 5-18 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 13 bis 18 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von 15° und der kleineren gefrästen Kerbe dargestellt.



**Abbildung 5-18: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 13-18 der ersten Versuchsreihe**

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert dieser Gruppe beträgt 14,5 % oder 3,47 MPa.

Bei den Versuchskörpern 13-18 wurde in allen Versuchen der Prüfkörper gespalten. Die Stabrippen wurden bei allen Versuchen dieser Gruppe bis auf Versuchskörper 15 teilweise oder stark beschädigt. Beispielhaft sind in Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 die Prüfkörper 13 und 14 nach den Versuchen abgebildet.

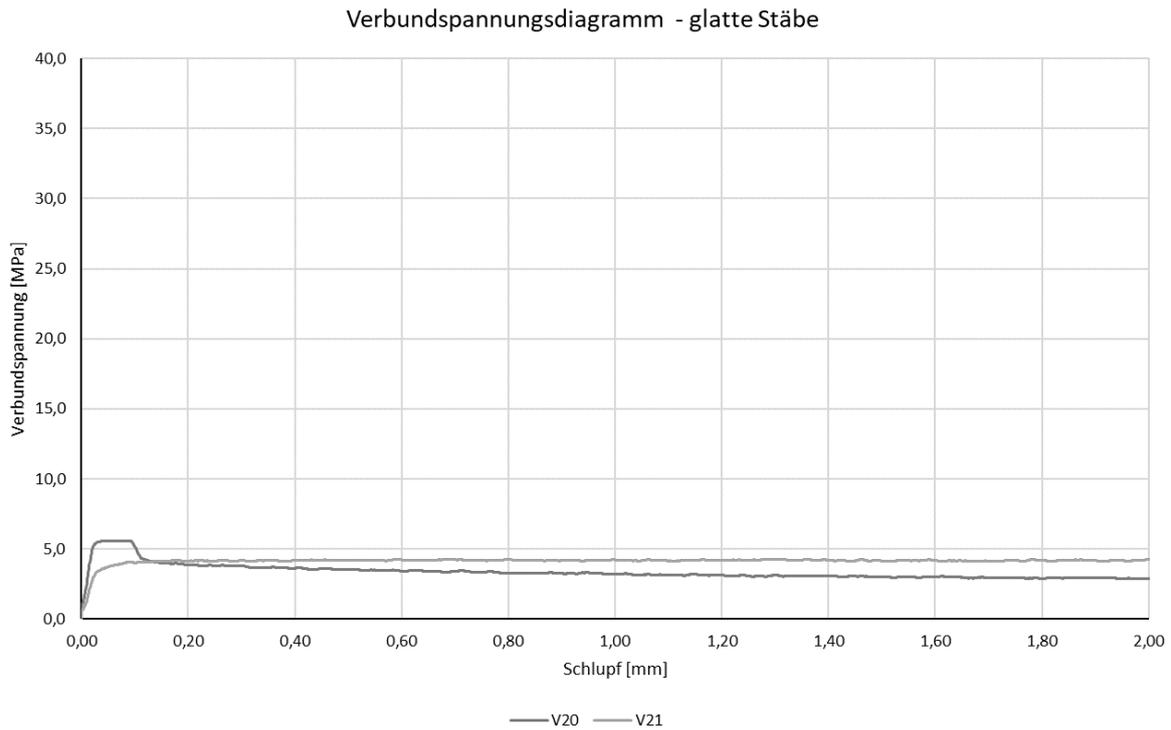


Abbildung 5-19: Bruchfläche des Prüfkörpers 13 (oben) und beschädigter Stab 13 (unten)



Abbildung 5-20: Vollständig abgescherte Stabrippen in Prüfkörper 14

In Abbildung 5-18 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 20 und 21 mit glatten Stäben dargestellt.



**Abbildung 5-21: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 20 und 21 der ersten Versuchsreihe**

Die Versuche mit den verbliebenen zwei Prüfkörpern mit glatten Stäben lieferten im Vergleich zu den in [15] und [19] beschriebenen Versuchen mit den gleichen Stäben etwas höhere Maximalwerte, zeigten aber qualitativ ein ähnliches Verbundverhalten. Beide Stäbe wurden aus den Prüfkörpern ausgezogen.

In Abbildung 5-22 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper T1 bis T3 mit den C4R-Stäben der Firma Thyssen dargestellt, mit den Herstellerangaben zum Vergleich.

Verbundspannungsdiagramm - Thyssen C4R

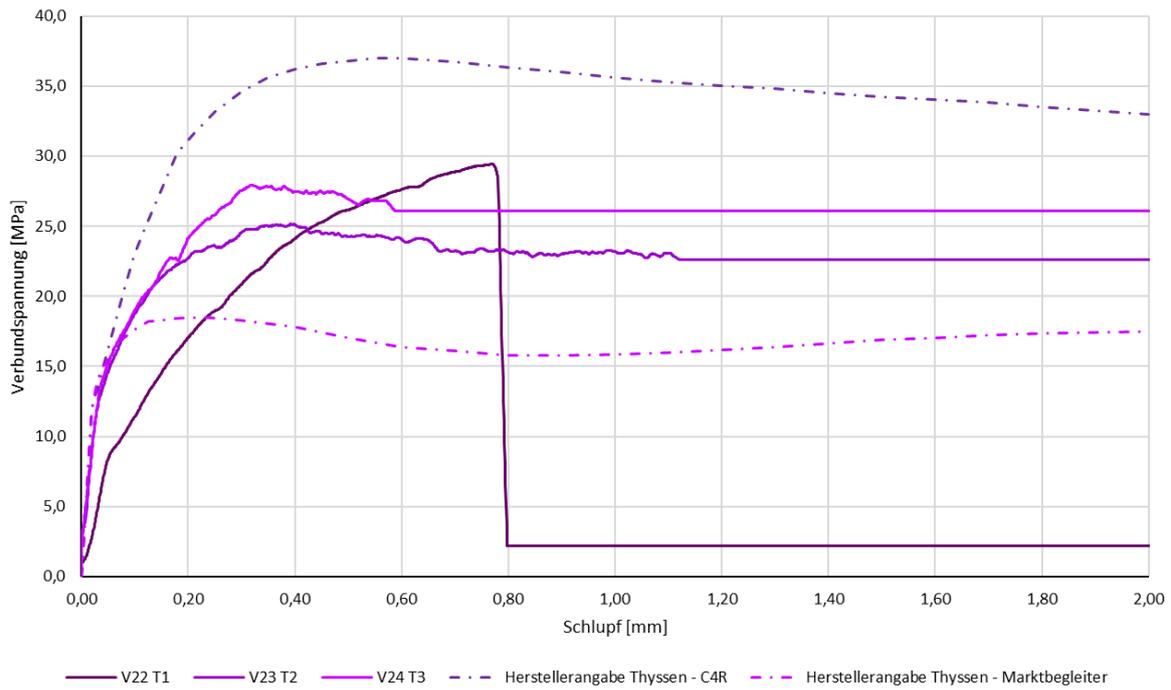


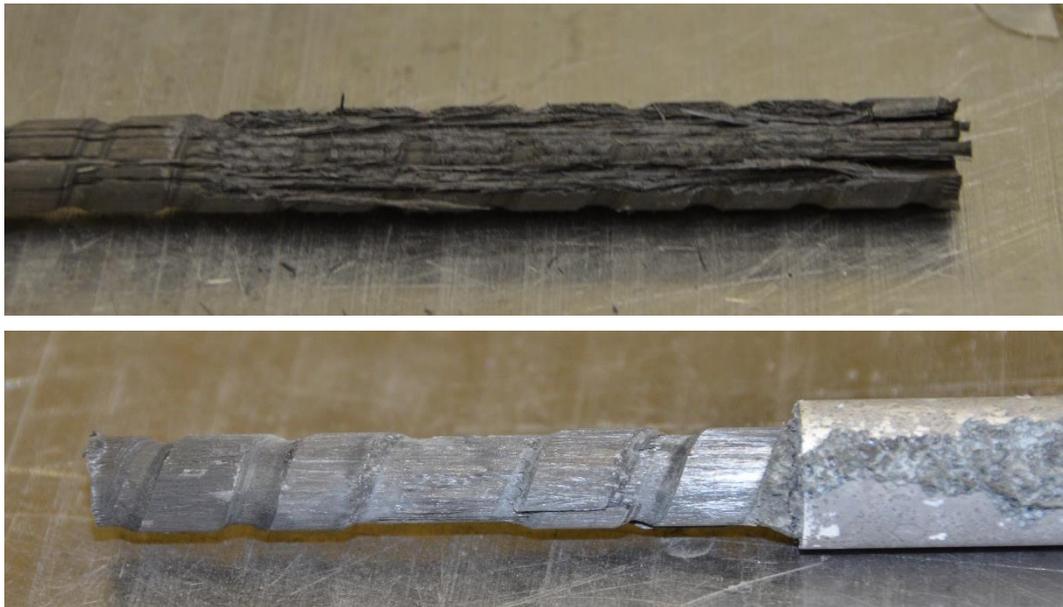
Abbildung 5-22: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper T1 bis T3 der ersten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert beträgt 8,08 % oder 2,25 MPa.

Bei all diesen Prüfkörpern wurde im Zuge des Versuchs das Zugende des CFK-Stabs zwischen den Klemmbacken zerdrückt und alle Prüfkörper wiesen am Ende der Versuche Spaltrisse auf (Abbildung 5-23). Bei Prüfkörper T3 wurde eine Stabrippe teilweise beschädigt, wie in Abbildung 5-24 zu sehen ist.

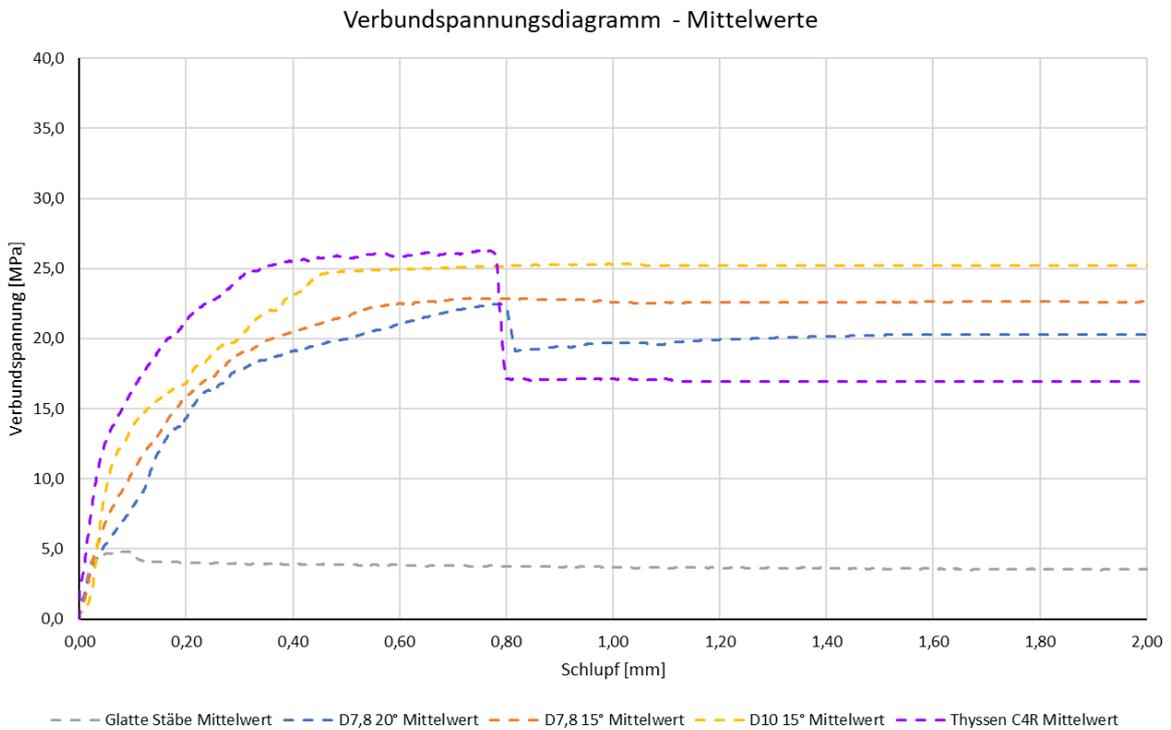


Abbildung 5-23: Spaltrisse im Prüfkörper T1 (links) und nahezu unbeschädigter Stab im Inneren (rechts)



**Abbildung 5-24: Zerdrücktes Zugende (oben) und teilweise abgescherte Rippe am Verbundende (unten) des Stabs in Prüfkörper T3**

In Abbildung 5-18 sind die mittleren Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die jeweiligen Versuchsgruppen mit gleichen Stabgeometrien zu sehen.



**Abbildung 5-25: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven für verschiedene Stabtypen in der ersten Versuchsreihe**

Die C4R-Stäbe zeigen im Durchschnitt die höchste Steifigkeit, gefolgt von den anderen drei Gruppen in der Reihenfolge bezüglich des Wendelvolumens. Die Stabgruppen mit der kleineren Wendel sind hier im Vergleich zu den durchschnittlichen Maximalwerten der Verbundspannung (Tabelle 5-3) in ihrer

Reihenfolge vertauscht – die Kurve der Stäbe mit der kleineren Wendelsteigung liegt über jener der Stäbe mit der größeren Wendelsteigung.

In Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-31 werden die Maximalwerte der Verbundspannung aus den Versuchen den verschiedenen möglichen Vergleichswerten, die in Kapitel 4.3 untersucht wurden, gegenübergestellt. Allerdings zeigen keine dieser Vergleiche offensichtliche Tendenzen.

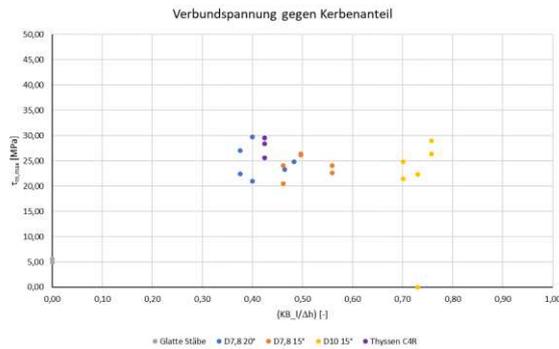


Abbildung 5-26: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Kerbenanteil

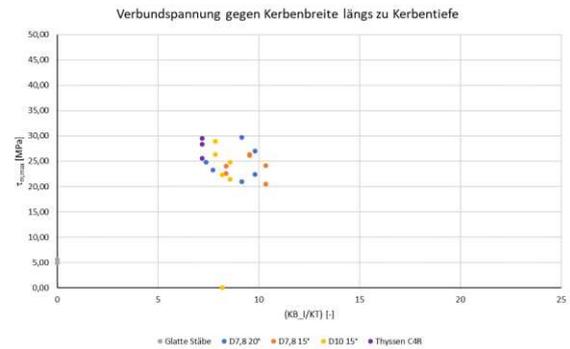


Abbildung 5-27: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite längs zur Kerbtiefe

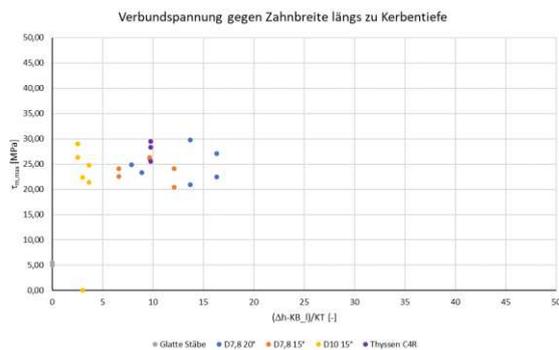


Abbildung 5-28: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Zahnbreite längs zur Kerbtiefe

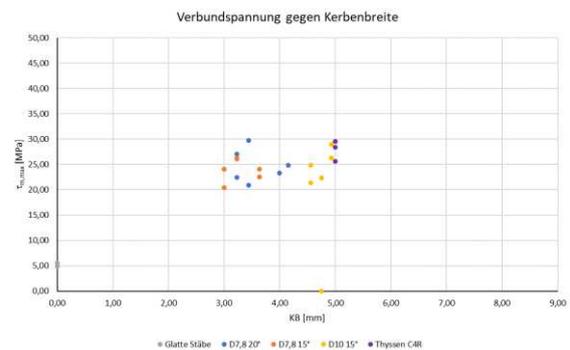


Abbildung 5-29: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite

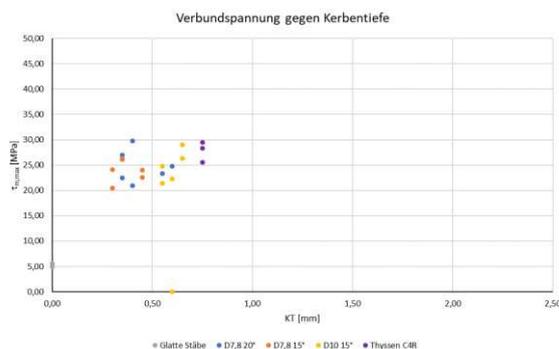


Abbildung 5-30: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbtiefe

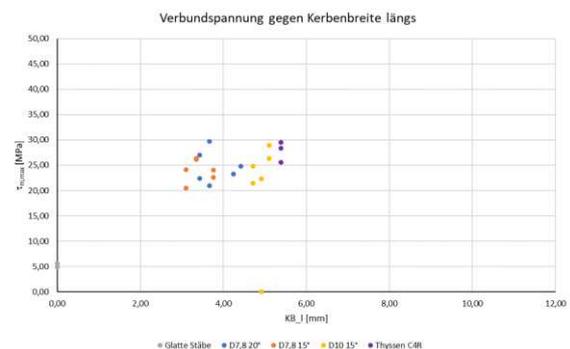


Abbildung 5-31: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite längs

## 5.2 Zweite Versuchsreihe – 150 mm Würfel

Die zweite Versuchsreihe wurde, um ein Spalten der Prüfkörper möglichst zu vermeiden, mit Würfelpüfkörpern mit 150 mm Kantenlänge und Verbundlängen von wiederum  $5 \cdot d_s$  durchgeführt. Für diese Versuche wurde eine hydraulische Prüfmaschine der Firma Walter+Bai mit einer Nennlast von 63 kN des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur in Wien verwendet.

### 5.2.1 Herstellung der Prüfkörper

Für die Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe wurden wieder Einzelschalungen aus 21 mm dicken Mehrschicht-Holzplatten hergestellt und horizontal von zwei Seiten aus durchbohrt. Die Stäbe waren somit wieder quer zur Betonierichtung mittig in den Schalungen eingebaut.

Die Stäbe mit eingefräster Wendel wurden ähnlich wie für die erste Versuchsreihe hergestellt, allerdings wurde statt einer in einem Bohrmaschinenständer eingespannten Bohrmaschine eine Ständerbohrmaschine verwendet. Diese konnte wesentlich genauer in ihrer Position eingestellt werden und zeigte sich auch wesentlich stabiler als der eingesetzte Bohrmaschinenständer für die erste Versuchsreihe.

Für die größeren Kerben wurde wieder der gleiche 10 mm-Fräskopf verwendet wie bei der ersten Versuchsreihe. Für die kleineren Kerben wurde aber anstelle des wenig dauerhaften 7,8 mm-Fräskopfes ein Fräskopf vom selben Typ wie für die größeren Kerben mit einem Durchmesser von 6 mm gewählt. Dieser Durchmesser war der gegenüber dem 7,8 mm-Fräskopf nächstkleinere verfügbare Fräskopf dieses Typs. Um die Ergebnisse vergleichbarer zu machen wurde der nächstkleinere statt des nächstgrößeren gewählt.



**Abbildung 5-32: Gefräste Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und dem Fräskopf mit 6,0 mm Durchmesser gefräst (links), einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 6,0 mm Durchmesser gefräst (Mitte) und einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 10 mm Durchmesser gefräst (rechts)**

Diese Änderungen erlaubten eine wesentlich genauere und präzisere Herstellung der Stäbe. Die hergestellten Wendelgeometrien sind in Tabelle 5-4 aufgelistet.

Tabelle 5-4: Gemessene Wendelabmessungen der verwendeten Stäbe (\*aus Wendelabmessungen rückgerechnet)

Schalung Nr.	Würfelgröße [mm]	Stab DN [mm]	Fräskopf DN [mm]	Kerbenbreite* [mm]	Kerbtiefe [mm]	Wendelsteigung [°]	Ganghöhe [mm]
G1	150	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
G2	150	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
G3	150	8	0,0	0,00	0,00	0	0,00
4	150	8	6,0	3,16	0,45	20	9,15
5	150	8	6,0	3,16	0,45	20	9,15
6	150	8	6,0	3,16	0,45	20	9,15
7	150	8	6,0	3,16	0,45	20	9,15
8	150	8	6,0	3,16	0,45	20	9,15
9	150	8	6,0	3,16	0,45	15	6,73
10	150	8	6,0	3,16	0,45	15	6,73
11	150	8	6,0	3,16	0,45	15	6,73
12	150	8	6,0	3,16	0,45	15	6,73
13	150	8	6,0	3,32	0,50	15	6,73
14	150	8	10,0	5,27	0,75	15	6,73
15	150	8	10,0	5,27	0,75	15	6,73
16	150	8	10,0	5,27	0,75	15	6,73
17	150	8	10,0	5,27	0,75	15	6,73
18	150	8	10,0	5,27	0,75	15	6,73
B19	150	8	Beklebt	≈5,10	≈0,70	25,5	≈12,00
B20	150	8	Beklebt	≈5,10	≈0,70	25,5	≈12,00
B21	150	8	Beklebt	≈5,10	≈0,75	25,5	≈12,00
T22	150	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70
T23	150	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70
T24	150	10	9,0*	5,0	0,75	22	12,70

Zu den beklebten Stäben ist anzumerken, dass die Ganghöhe, Breite und Tiefe der Wendel über die Länge des Stabs variierte und keine genauen repräsentativen Abmessungen angegeben werden konnten.

Zur Isolierung der Stäbe vom Beton in der Schalung wurden für diese Versuchsreihe Stahlrohre verwendet, um eine unerwünschte Reaktion des Aluminiums mit dem Frischbeton zu vermeiden. Die Rohre wurden wiederum passend zugeschnitten und in ihrer Länge auf  $\pm 0,1$  mm genau zugeschliffen, um eine Verbundlänge von 40 mm bzw. 50 mm zu erreichen.

Für die beklebten Stäbe wurde der fünffache Durchmesser des durchlaufenden Stabs als Verbundlänge gewählt, diese wurden daher wie die selbst gefrästen Stäbe mit einer Verbundlänge von 40 mm geprüft.

Die Stäbe wurden in die Schalungen horizontal eingebaut und der Ansatz des Isolierrohres mit Gewebekband abgedichtet. Die Stäbe wurden am Anfang und Ende der Verbundlänge mit Gewebekband umwickelt, um das Bohrloch in der Schalung und das innere Ende des Isolierrohres abzudichten. Eine der Schalungen ist beispielhaft in Abbildung 5-6 zu sehen.



**Abbildung 5-33: Schalung mit eingebautem Stab für die zweite Versuchsreihe**

Der UHPC wurde wieder am Institut für Werkstofftechnologie der TU Wien in einem Intensivmischer Typ R08 der Firma Eirich mit Stiftenwirbler hergestellt, vergossen und dort einen Tag lang unter Kunststoffplanen abgedeckt gelagert. Danach wurden die Prüfkörper an der Universität für Bodenkultur wiederum unter Kunststofffolien gelagert, bevor sie nach fünf Wochen ausgeschalt wurden. Die Versuche wurden dann aufgrund von Schwierigkeiten mit dem Versuchsaufbau (siehe Kapitel 5.2.3) über die folgenden 13 Wochen verteilt durchgeführt. Eine genaue zeitliche Abfolge der Versuche ist Tabelle 5-5 zu entnehmen.

Tabelle 5-5: Alter der Prüfkörper bei der Versuchsdurchführung

Versuchskörper	Stabart*	Prüfung (erste/zweite)	Endeinfassung Stab	Betonalter bei Prüfung [d]
V1	DN8 - Glatt	1	Blank	47
V2	DN8 - Glatt	1	Blank	47
V3	DN8 - Glatt	1	Blank	48
V4	DN8 - D6 20°	1	Blank	48
V14	DN8 - D10 15°	1	Epoxidmuffe	63
V15	DN8 - D10 15°	1	Fischer-Muffe kurz	70
V10	DN8 - D6 15°	1	Fischer-Muffe kurz	70
V5	DN8 - D6 20°	1	Fischer-Muffe kurz	70
V9	DN8 - D6 15°	1	Epoxidmuffe	72
V14	DN8 - D10 15°	2	Epoxidmuffe	72
V4	DN8 - D6 20°	2	Fischer-Muffe lang	122
V10	DN8 - D6 15°	2	Fischer-Muffe lang	122
V6	DN8 - D6 20°	1	Fischer-Muffe lang	122
V7	DN8 - D6 20°	1	Fischer-Muffe lang	122
V8	DN8 - D6 20°	1	Fischer-Muffe lang	122
V11	DN8 - D6 15°	1	Fischer-Muffe lang	122
V12	DN8 - D6 15°	1	Fischer-Muffe lang	126
V13	DN8 - D6 15°	1	Fischer-Muffe lang	126
V16	DN8 - D10 15°	1	Fischer-Muffe lang	126
V17	DN8 - D10 15°	1	Fischer-Muffe lang	126
V18	DN8 - D10 15°	1	Fischer-Muffe lang	126
V19	DN8 - beklebt	1	Fischer-Muffe lang	126
V20	DN8 - beklebt	1	Fischer-Muffe lang	126
V21	DN8 - beklebt	1	Fischer-Muffe lang	127
V22	DN10 - C4R	1	Fischer-Muffe lang	127
V23	DN10 - C4R	1	Fischer-Muffe lang	127
V24	DN10 - C4R	1	Fischer-Muffe lang	127
V23	DN10 - C4R	2	Fischer-Muffe lang	128

\*DN<x> bezeichnet den Stabdurchmesser des unbearbeiteten Stabes. Für die selbst gefrästen Stäbe bezeichnet D<x> den Durchmesser des verwendeten Fräskopfes und die Angabe in [°] die Wendelsteigung.



Abbildung 5-34: Prüfkörper 24 Stunden nach dem Betonieren (links) und nach dem Ausschalen (rechts)

## 5.2.2 Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften des UHPC wurden hinsichtlich seiner Druckfestigkeit mit vier 100 mm-Würfeln und seiner Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und seines E-Moduls mit drei 40×40×160 mm-Prismen geprüft.

Die Versuche ergaben die in Tabelle 5-6 aufgelisteten Materialkennwerte.

Tabelle 5-6: Mittlere Materialkennwerte aus der Prüfung des UHPC für die zweite Versuchsreihe

Mittlere Druckfestigkeit (100 mm Würfel × 4):	176,70 MPa
Mittlere Druckfestigkeit (40×40×160 mm-Prisma nach Biegezugversuch × 3):	180,72 MPa
Mittlerer E-Modul (40×40×160 mm-Prisma × 3):	45.616 MPa
Mittlere Biegezugfestigkeit (40×40×160 mm-Prisma × 3):	15,16 MPa

Die Bewehrungsstäbe mit eingefräster Wendel wurden aus glatten CFK-Stäben der Firma DPP hergestellt. Laut Hersteller wiesen diese Stäbe parallel zur Stabachse eine Zugfestigkeit von 2350 MPa und einen E-Modul von 153 GPa auf. Die Kunststoffmatrix bestand aus Epoxidharz mit einer Zugfestigkeit von 83-93 MPa und einem E-Modul von 3100-3300 MPa.

Für die beklebten Stäbe konnten vom Hersteller keine Angaben zur Herstellung oder den Materialien in Erfahrung gebracht werden.

Die C4R-Stäbe der Firma Thyssen wiesen laut Hersteller eine Zugfestigkeit von 1650 MPa, eine Bruchdehnung von 1,1 % und einen E-Modul von 151 GPa auf. Die Kunststoffmatrix bestand ebenfalls aus Epoxidharz.

## 5.2.3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die zweite Versuchsreihe war dem der ersten Reihe ähnlich, jedoch wurde eine kleinere Prüfmaschine verwendet und es wurde zusätzliche Messtechnik eingesetzt. Zusätzlich wurden für die späteren Versuche der Reihe die freien Stabenden mit Muffen eingefasst, um das Zerdrücken, Spalten oder sonstige Beschädigungen der Stäbe zwischen den Klemmbanken zu vermeiden.

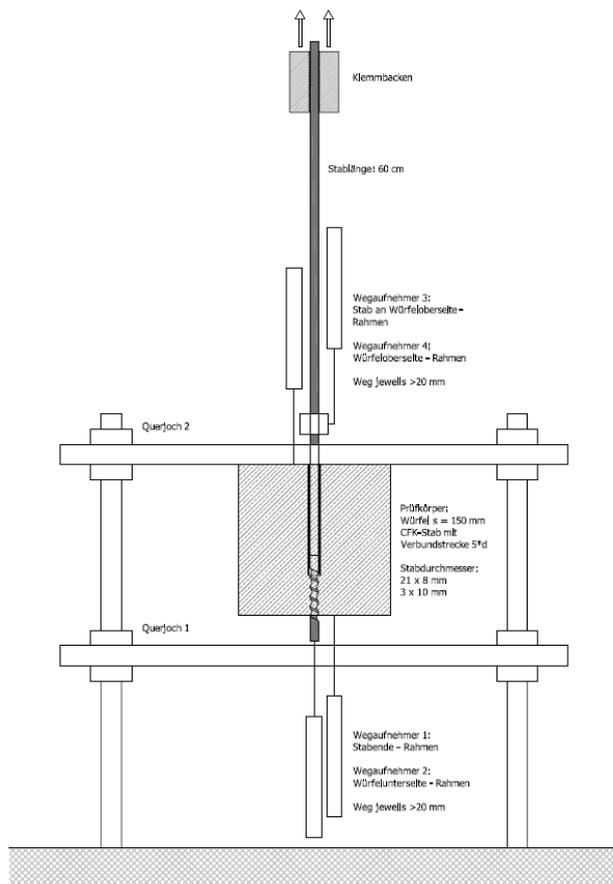


Abbildung 5-35: Versuchsaufbau für die zweite Versuchsreihe

Während die Messung der eingeleiteten Kraft wiederum durch eine in der Maschine eingebaute Kraftmessdose erfolgte, wurde der Auszug des Stabs über zwei Wegaufnehmer an der Unterseite des Prüfkörpers gemessen. Diese wurden am Sockel des Prüfrahmens aufgestellt und jeweils auf das freie Stabende beziehungsweise die Würfelunterseite neben dem Stabende montiert. Der Auszug bzw. Schlupf des Stabes konnte somit aus der Differenz der beiden Verschiebungsmessungen ermittelt werden, anstatt nur aus der Verschiebung des freien Stabendes alleine. Diese Maßnahme wurde getroffen, um eine Beeinflussung des Messergebnisses durch den vergleichsweise verschiebungsweichen Versuchsaufbau zu vermeiden. Des Weiteren wurden ebenfalls zwei Wegaufnehmer auf der den Klemmbacken zugewandten Seite des Prüfkörpers zur Messung der Verschiebung des Stabes knapp über dem Prüfkörper und der Prüfkörperoberfläche eingesetzt. Der Aufbau ist in Abbildung 5-35 dargestellt.

Die Versuche wurden über die Verschiebung des Stabes auf der den Klemmbacken näheren Seite knapp über dem Prüfkörper weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min durchgeführt.

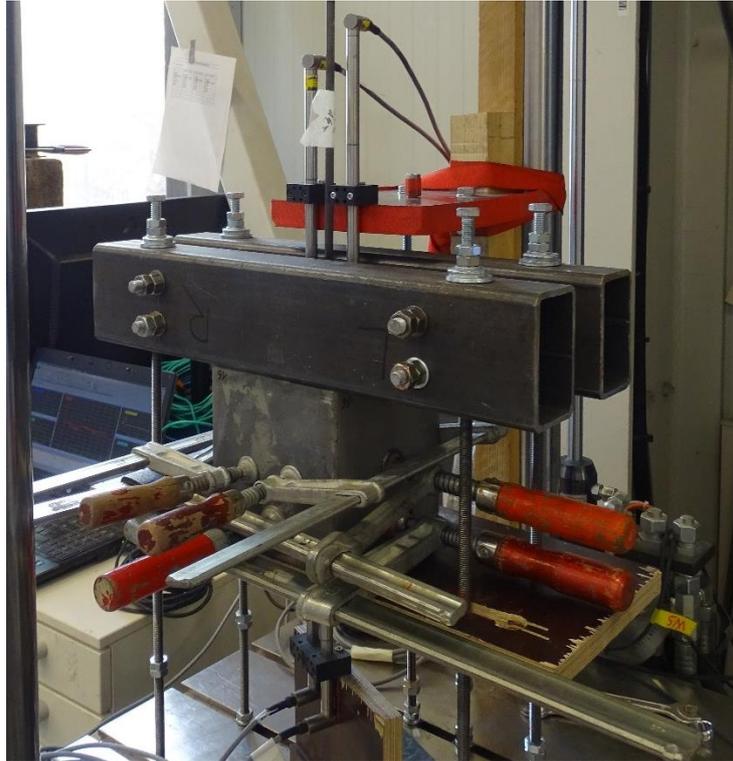
Für die ersten vier Versuche wurde das Zugende des Stabes direkt durch die Klemmbacken gehalten.



**Abbildung 5-36: Zerdrücktes, gespaltenes Stabende nach dem ersten Versuch mit Prüfkörper 4, bei dem das Stabende direkt in die Klemmbanken gespannt wurde**

Nachdem, anschließend an die Prüfung der drei Versuchskörper mit glatten Stäben (Versuchskörper 1 bis 3), der erste Versuch mit einem profilierten Stab (Versuchskörper 4) wegen des Versagens des Stabs zwischen den Klemmbanken abgebrochen werden musste, wurden in den folgenden Versuchen alternative Konfigurationen gesucht und erprobt. Das zerdrückte Stabende ist in Abbildung 5-36 zu sehen.

Zusätzlich zur Beschädigung des Stabs durch den Querdruck der Klemmbanken war ein Spaltriss im Prüfkörper vorhanden. Daraufhin wurden bei späteren Versuchen zusätzlich Schraubzwingen in den beiden zum Stab orthogonalen Richtungen auf die Prüfkörper gespannt, um zusätzlichen Querdruck aufzubringen (Abbildung 5-37).



**Abbildung 5-37: Zusätzliche Schraubzwingen zur Verhinderung eines Spaltens des Prüfkörpers beispielhaft am Prüfkörper 16**

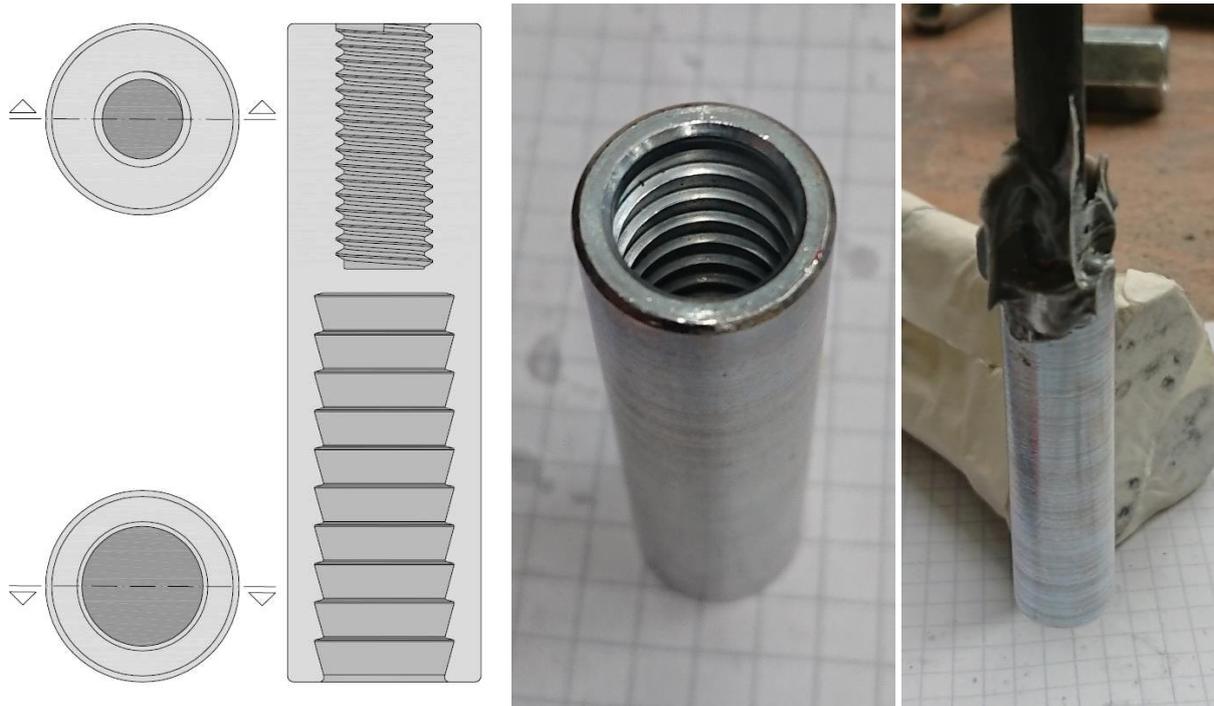
Zunächst wurde eine Einfassung des Stabendes aus zusammengeschweißten Langmuttern mit einer Epoxidharzfüllung erprobt. Hierfür wurden drei Langmuttern aneinander geschweißt. Die dadurch hergestellte Muffe wurde außen abgeschliffen, um sie zwischen die Klemmbacken spannen zu können. Die Zugenden der CFK-Stäbe wurden mit einer Metallsäge eingeritzt um den Halt des Epoxidharzes zu verbessern. Die Einfassung wurde auf den stehenden Prüfkörper aufgesetzt und mit Epoxidharz befüllt. Dieser Prozess ist in Abbildung 5-38 dargestellt.

Diese Variante war einerseits aufwendig in der Herstellung und andererseits unzuverlässig aufgrund der schwierigen Herstellung dicker Schweißnähte, die der Belastung standhalten würden, eine gerade Einfassung erzeugten und gleichzeitig nicht in den Innenraum der Muffe ragten. Bei der ersten Prüfung des Versuchskörpers 14 wurde statt eines Überlastens der Einfassung selbst das Epoxidharz im Inneren der Muffe abgeschert und der Stab aus der Muffe gezogen. Versuchskörper 9 und 14 wurden jeweils zwei Mal mit solchen Muffen getestet, da die Muffen jeweils beim ersten Versuch versagt hatten.



**Abbildung 5-38: Aus zusammengeschweißten Langmuttern hergestellte Muffe, vor und nach dem Befüllen mit Epoxidharz und im ausgehärteten Zustand**

Als nächstes wurden neu entwickelte FVK-zu-Gewinde-Muffen mit spezieller Geometrie der Firma Fischer eingesetzt. Diese Prototypen waren aus Automatenstahl-Zylindern hergestellte Drehteile, welche an einem Ende mit einem metrischen Gewinde und am anderen Ende mit einer Bohrung versehen waren. Die Wände dieser Bohrung wiesen eine abgetreppt-konische Profilierung auf. Eine schematische Skizze und zwei Fotos dieser Muffe sind in Abbildung 5-39 dargestellt. Das Innere der Bohrung war mit Epoxidmörtel FIS-EM der Firma Fischer auszufüllen. Laut Hersteller war die Innenseite der Bohrung mit einer PE-Beschichtung versehen, welche ein Abgleiten des Mörtels mit dem enthaltenen Stabende an den Bohrungswänden ermöglichen sollte. Damit sollte der Mörtel Gewölbe zwischen den konischen Rippen bilden, ohne dabei eine so starke Rissbildung aufzuweisen, wie dies ohne die Beschichtung der Fall wäre.



**Abbildung 5-39: Links: Schematische Darstellung der Fischer-Muffe  
Mitte und rechts: Fotos der Muffe vor und nach dem Anbringen an einen Stab**

Drei dieser Muffen wurden für die Prüfkörper 5, 10 und 15 verwendet und hielten in zwei von drei Versuchen stand. Bei dieser ersten Prüfung des Versuchskörpers 10 wurde der Epoxidmörtel abgeschert und der Stab aus der Muffe gezogen. Daraufhin wurden die übrigen Versuche mit abgeänderten Varianten dieser Muffen durchgeführt. Diese zweiten Versionen der Muffen wiesen eine größere Länge auf, mit einer entsprechend längeren Bohrung und damit größeren Verbundlänge des Stabes in der Muffe. Außerdem wurde der Durchmesser der Bohrung besser an die Stabdurchmesser angepasst. Die gefrästen Stäbe mit einem Durchmesser von 8 mm wurden mit Muffen mit einem Bohrungsdurchmesser von 10 mm versehen. Die beklebten Stäbe sowie die C4R-Stäbe wurden mit Muffen mit einem Bohrungsdurchmesser von 12 mm versehen. Bei den dickeren Muffen wurde eine hochfeste Schraube in das Gewinde der Muffen eingeschraubt und in die Klemmbacken gespannt, da der Muffendurchmesser größer als die Öffnungsweite der Klemmbacken war (Abbildung 5-40).

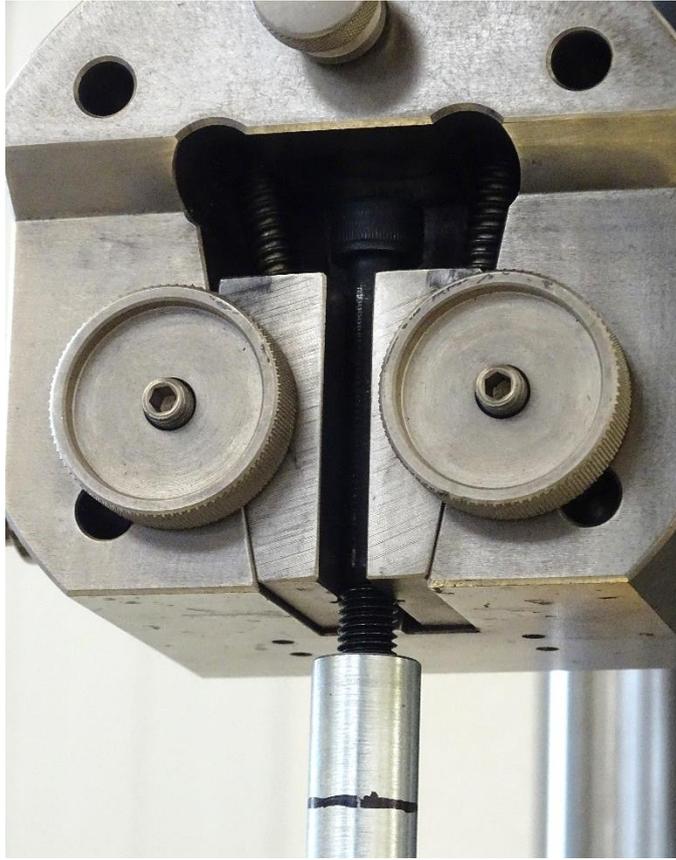


Abbildung 5-40: Hochfeste Schraube als schlankere Verlängerung der Muffe zwischen den Klemmblocken

#### 5.2.4 Ergebnisse

Die maximal erreichten mittleren Verbundspannungen der zweiten Versuchsreihe sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst. Der rot hinterlegte Wert für Versuchskörper 9 wurde nicht bei der Berechnung des Durchschnitts für diesen Stabtyp berücksichtigt, da eine Beeinträchtigung der geplanten Verbundlänge durch eingedrungenen Beton in das Isolierrohr vermutet wurde und das Ergebnis deutlich von den übrigen Ergebnissen dieses Stabtyps abweicht.

Tabelle 5-7: Maximale mittlere Verbundspannungen aus der zweiten Versuchsreihe

	glatt V1-V3	D6 20° V4-8	D6 15° V9-13	D10 15° V14-18	beklebt V19-21	C4R V22-24
$\bar{\sigma}_{\tau_{\max}}$ [MPa]	<b>2,976</b>	<b>24,541</b>	<b>21,813</b>	<b>22,218</b>	<b>19,018</b>	<b>31,561</b>
1	3,07	24,20	29,16	22,63	14,62	33,17
2	3,28	24,10	20,94	22,53	18,57	34,76
3	2,57	27,72	21,10	20,40	23,87	26,75
4		22,80	22,08	22,93		
5		23,88	23,13	22,60		

Die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 1-3 mit den glatten Stäben sind in Abbildung 5-41 zu sehen.

Verbundspannungsdiagramm - glatte Stäbe

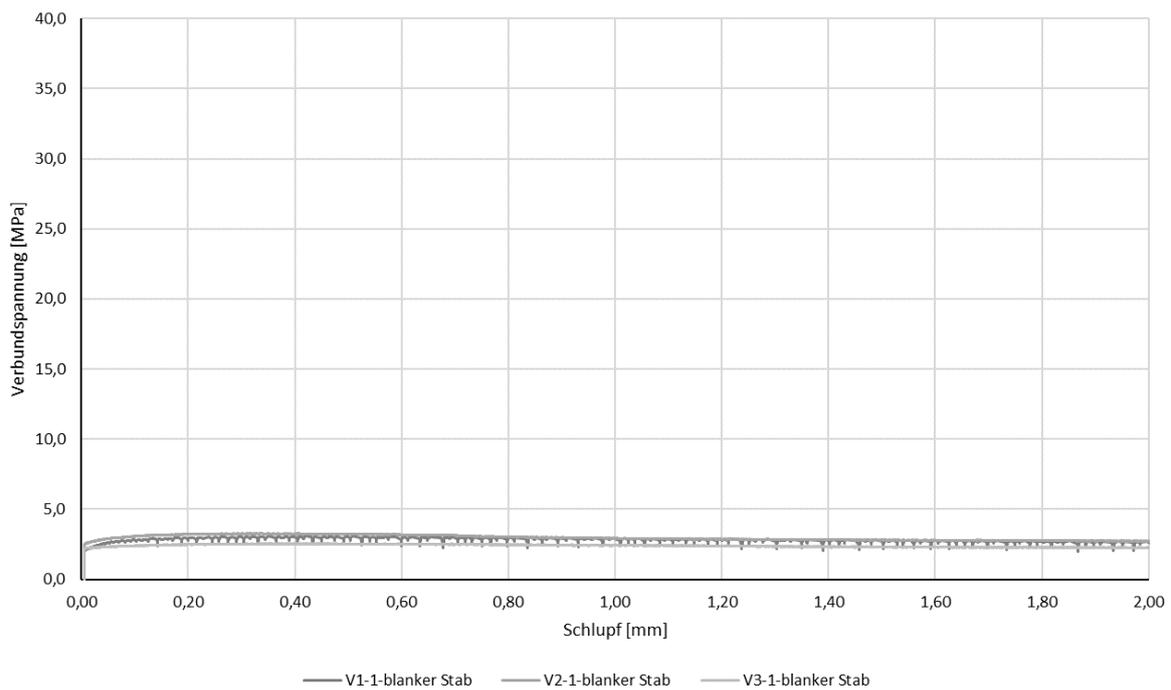


Abbildung 5-41: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 1 bis 3 der zweiten Versuchsreihe

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert liegt bei 13,6 % oder 0,46 MPa.

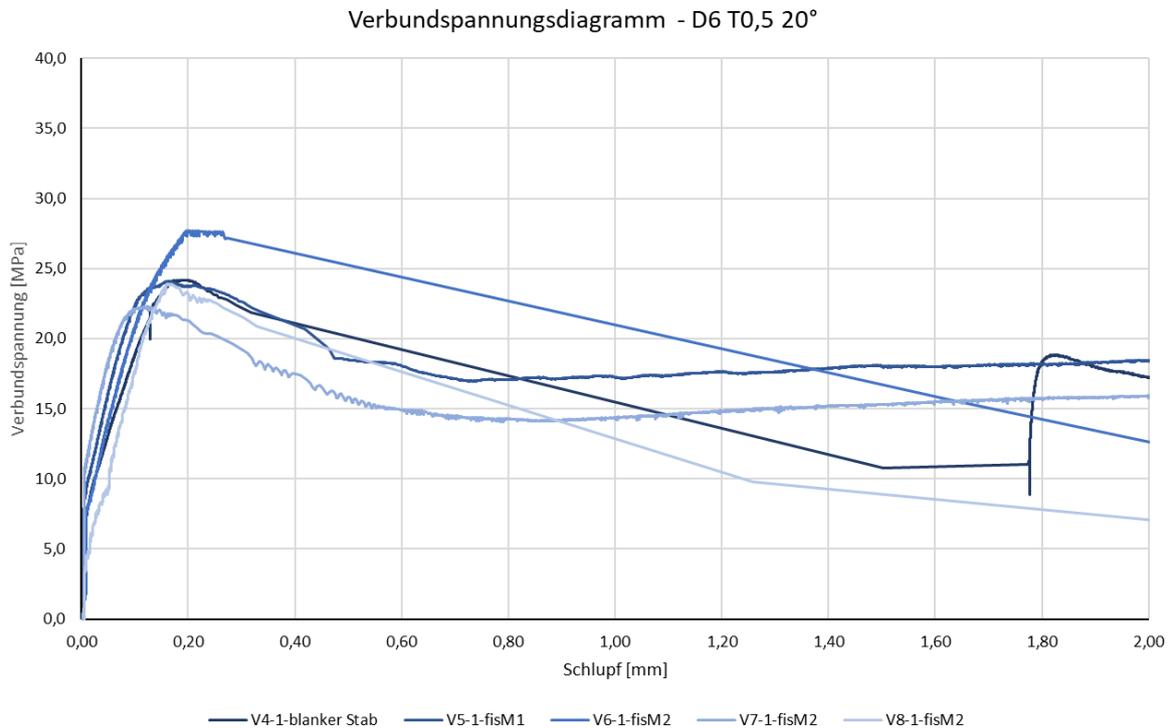
Alle drei Stäbe wurden aus den Versuchskörpern ausgezogen, ohne diese zu beschädigen.



Abbildung 5-42: Versuchskörper 1 mit ausgezogenem Stab nach dem ersten Versuch

Die Kurven der glatten Stäbe in dieser Versuchsreihe weisen im Vergleich zur ersten Versuchsreihe etwas niedrigere Maximalwerte von durchschnittlich 2,98 MPa auf.

In Abbildung 5-43 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 4 bis 8 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von 20° und der kleineren gefrästen Kerbe zu sehen.



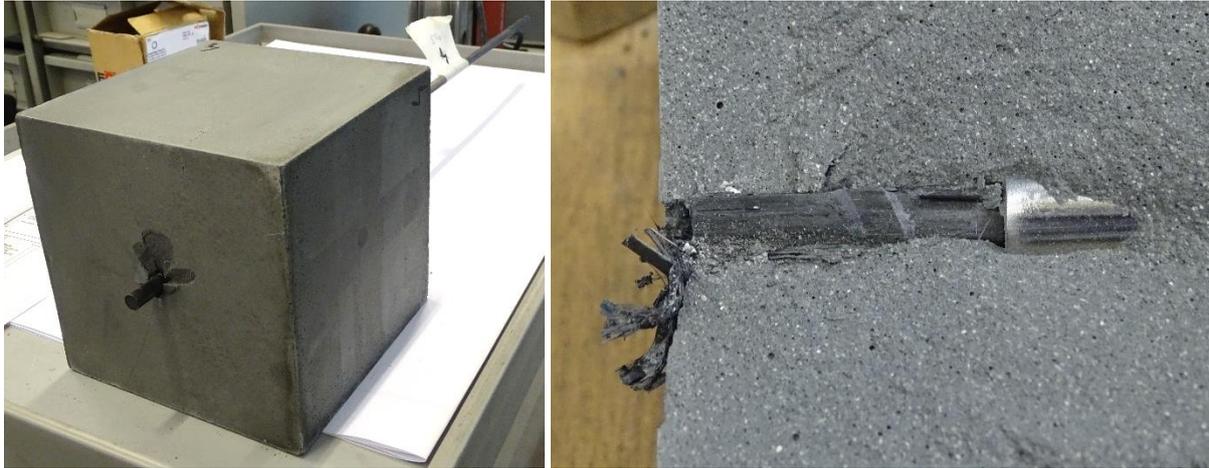
**Abbildung 5-43: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 4 bis 8 der zweiten Versuchsreihe**

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert liegt bei 13,0 % oder 3,18 MPa.

Versuchskörper 4 wurde zuerst mit einem blanken Zugende des Stabes geprüft, dann ein zweites Mal mit einem durch eine Muffe geschütztes Stabende. Im ersten Versuch trat allerdings ein Spaltriss im Prüfkörper auf und im zweiten Versuch wurde nur mehr eine wesentlich geringere maximale Verbundspannung von 11,45 MPa (nach einer maximalen Verbundspannung von 24,20 MPa im ersten Versuch) erreicht. Da die Verbundspannungskurve des ersten Versuchs gut mit den folgenden Versuchen übereinstimmte, wurden die Ergebnisse des ersten Versuchs in die weitere Auswertung miteinbezogen.

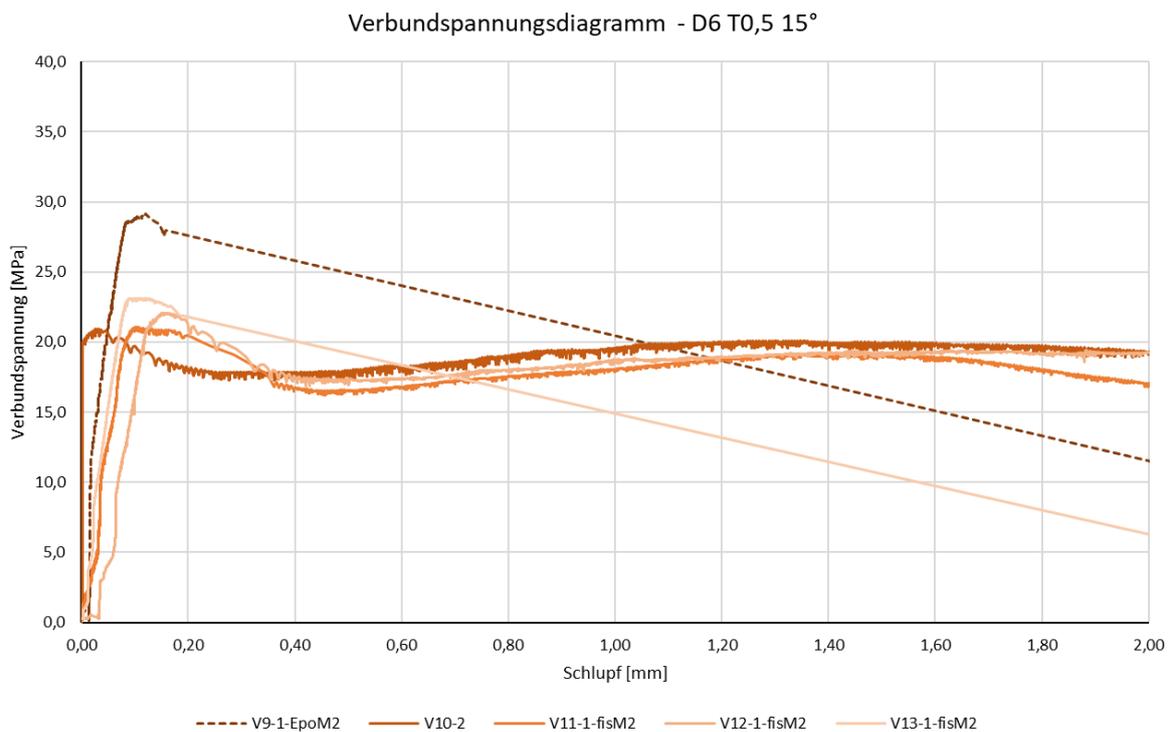
In dieser Versuchsgruppe wurde nur der Prüfkörper 4 ohne zusätzliche Schraubzwingen zur Reduktion der Spaltgefahr getestet.

Bei den Prüfkörpern 4, 5, 6 und 8 wurde der Prüfkörper im Versuch gespalten, bei Prüfkörper 7 wurde der Stab ausgezogen ohne ein Spalten hervorzurufen. Bei allen Prüfkörpern dieser Gruppe wurde die Stabwendel abgeschert.



**Abbildung 5-44: Prüfkörper 4 mit Spaltrissen und Abplatzungen nach dem ersten Versuch (links) und die abgeschnittene Wendel im Inneren nach dem Aufbrechen des Prüfkörpers nach dem zweiten Versuch (rechts)**

In Abbildung 5-45 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 9 bis 13 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von 15° und der kleineren gefrästen Kerbe dargestellt.



**Abbildung 5-45: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 9 bis 13 der zweiten Versuchsreihe**

Bei Prüfkörper 9 war durch die Fuge zwischen Isolierrohr und Schalung etwas Frischbeton in das Isolierrohr eingedrungen, welcher bestmöglich entfernt wurde. Da aber nicht sicher war, ob der gesamte Beton aus dem Isolierrohr entfernt werden konnte und die maximale Verbundspannung bei diesem Versuchskörper wesentlich höher lag als bei den anderen Versuchskörpern dieser Gruppe, wurden die Ergebnisse dieses Prüfkörpers nicht in die Auswertung einbezogen.

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom Mittelwert liegt in dieser Gruppe bei 6,04 % oder 1,32 MPa.

In dieser Gruppe wurde nur der Prüfkörper 9 ohne zusätzliche Schraubzwingen zur Reduktion der Spaltgefahr getestet.

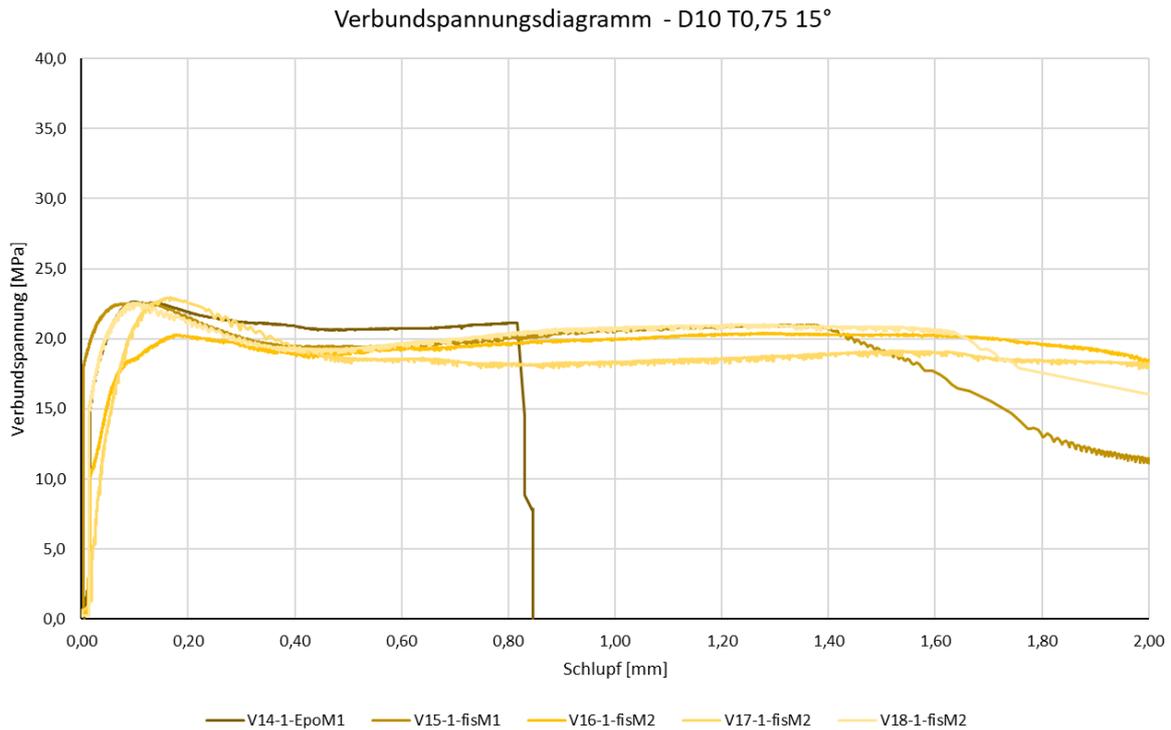
Der Prüfkörper 10 wurde zwei Mal getestet, da beim ersten Versuch bei einer mittleren Verbundspannung von 16,39 MPa der Stab aus der verwendeten Muffe gerissen wurde. Der zweite Versuch mit demselben Prüfkörper lieferte ähnliche Ergebnisse wie die anderen Prüfkörper der Gruppe und wurde daher in die Auswertung aufgenommen.

Die Prüfkörper 10 bis 13 wiesen am Ende der Versuche vergleichsweise feine Spaltrisse auf, die nicht über den gesamten Prüfkörper sichtbar verliefen. Im Inneren war bei allen Prüfkörpern dieser Gruppe die Wendel der Stäbe abgeschert.



**Abbildung 5-46: Abgescherter Stabwendel bei Prüfkörper 12**

In Abbildung 5-47 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 14 bis 18 mit den Stäben mit einer Wendelsteigung von  $15^\circ$  und der größeren gefrästen Kerbe dargestellt.



**Abbildung 5-47: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 14 bis 18 der zweiten Versuchsreihe**

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert liegt in dieser Gruppe bei 8,18 % oder 1,82 MPa.

In dieser Gruppe wurde der Prüfkörper 14 ohne zusätzliche Schraubzwingen zur Reduktion der Spaltgefahr getestet.

Der Prüfkörper 14 wurde zwei Mal geprüft, da beim ersten Versuch die verwendete Muffe versagt hatte. Beide Versuche lieferten annähernd gleiche maximale Verbundspannungen von 22,63 MPa und 22,07 MPa, die höheren Ergebnisse des ersten Versuchs wurden in die Auswertung einbezogen.

In dieser Versuchsgruppe wiesen nach den Versuchen ebenfalls alle Prüfkörper Spaltrisse auf und die Rippen der Stäbe waren abgeschert.



Abbildung 5-48: Abgescherte Wendel des Stabs in Prüfkörper 14 mit einem unbeschädigten Stab zum Vergleich

In Abbildung 5-47 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 19 bis 21 mit den Stäben mit einem als Rippe aufgeklebten Roving der Firma S&P dargestellt.

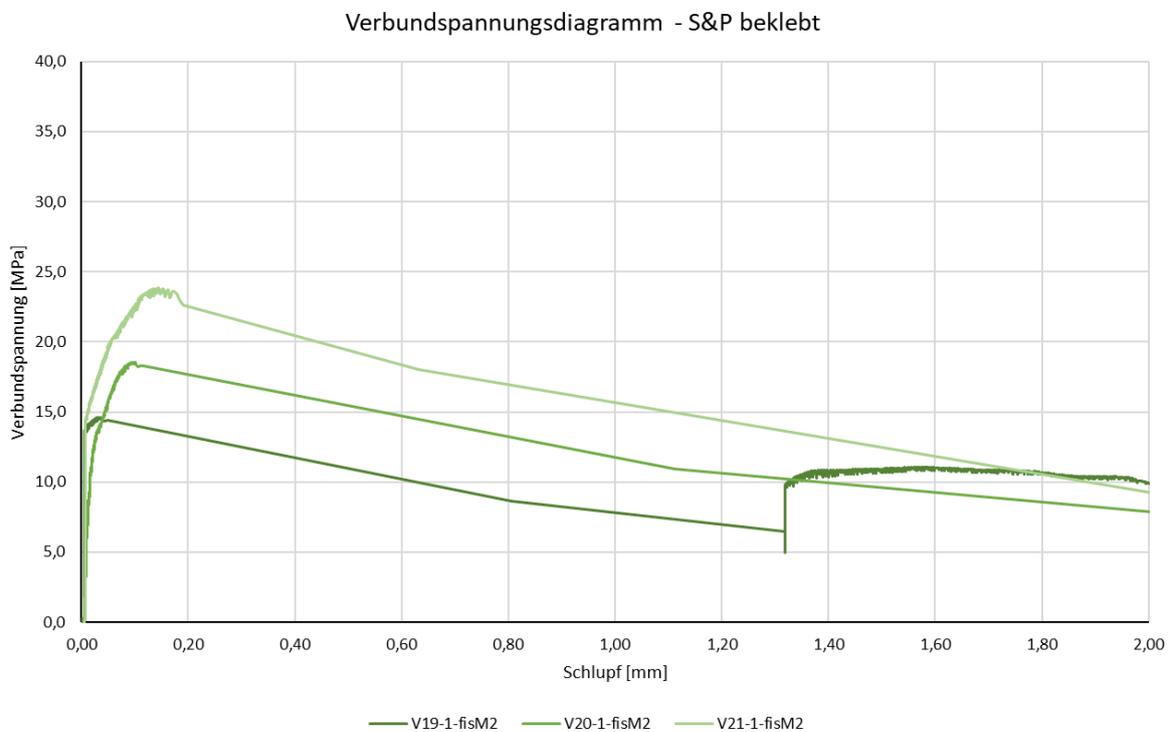


Abbildung 5-49: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 19 bis 21 der zweiten Versuchsreihe

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert liegt in dieser Gruppe bei 25,5 % oder 4,85 MPa.

Prüfkörper 19-21 wurden alle mit zusätzlichen Schraubzwingen zur Reduktion der Spaltgefahr getestet und das Versagen erfolgte bei allen über das Abscheren der aufgeklebten Rippe, die am Zugende der Verbundlänge abgerissen wurde.

Bei Prüfkörper 19 wurde der Stab vor dem Beginn des Versuchs versehentlich durch ein Aufsitzen der Klemmbacken auf dem Stabende druckbelastet und dadurch möglicherweise beschädigt. Eine Beschädigung oder deren Ausmaß konnte aber nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Die Ergebnisse des Versuchs mit diesem Prüfkörper wurden in die Auswertung aufgenommen, in den nachfolgenden Diagrammen sind aber Mittelwertkurven aller drei Versuche dieses Stabtyps sowie nur der Prüfkörper 20 und 21 dargestellt, um den Einfluss dieses Prüfkörpers sehen zu können.



Abbildung 5-50: Abgelöste und am oberen Ende der Verbundlänge abgerissene Rippe am Stab in Prüfkörper 21

Zu den Stäben dieser Gruppe ist anzumerken, dass der Verlauf der aufgeklebten Rippe sehr unregelmäßig war und die Stäbe somit eine variable Rippenhöhe, Rippenbreite und Rippenganghöhe aufwiesen. Die Verläufe innerhalb der Verbundlängen der drei verwendeten Stäbe sind in Abbildung 5-51 zu sehen.



Abbildung 5-51: Vergleich der Rippen in der Verbundlänge der Stäbe 19 (oben), 20 (Mitte) und 21 (unten)

In Abbildung 5-52 sind die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven für die Versuchskörper 22 bis 24 mit den C4R-Stäben der Firma Thyssen dargestellt.

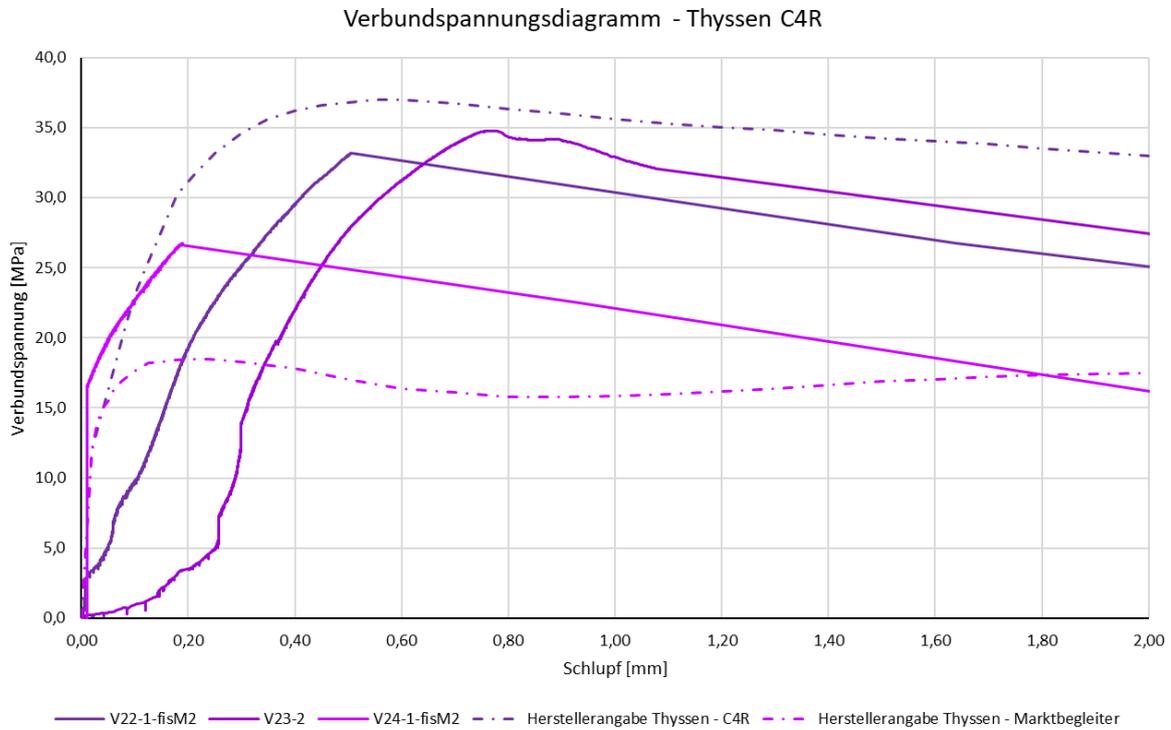
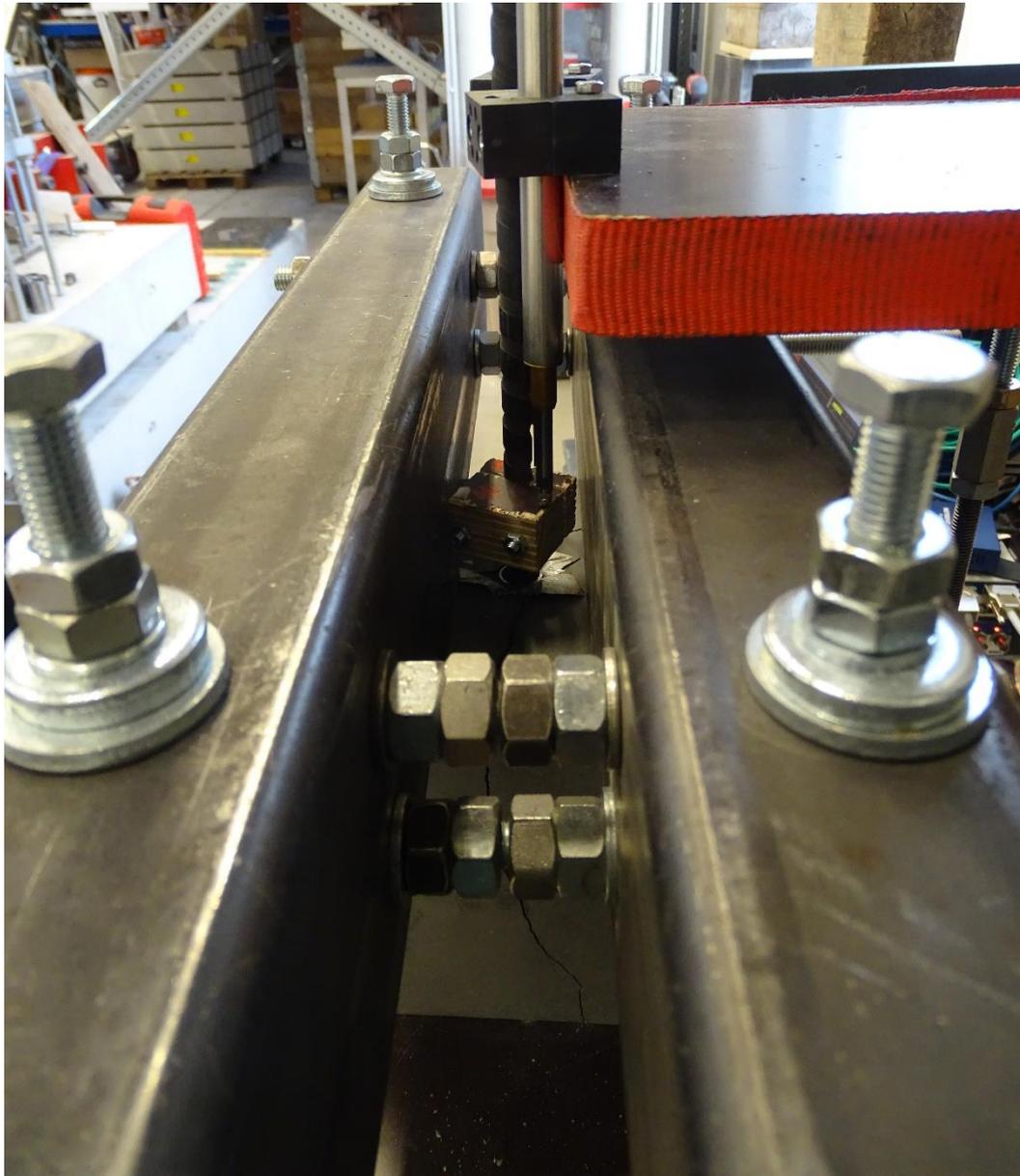


Abbildung 5-52: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich

Die größte Abweichung der Maximalwerte vom mittleren Maximalwert dieser Gruppe liegt bei 15,2 % oder 4,81 MPa.

Diese Prüfkörper wurden ebenfalls alle mit zusätzlichen Schraubzwingen zur Reduktion der Spaltgefahr getestet.

Alle drei Prüfkörper versagten schlagartig durch ein Spalten der Prüfkörper, wobei nur Prüfkörper 23 davor seine Maximallast erreicht hatte. Bei Prüfkörper 22 und 24 trat das Spalten bei der höchsten erreichten Last auf. Bei allen Versuchskörpern wurde außerdem beim Versagen der gesamte CFK-Stab entlang seiner Wendel verdreht, wie in Abbildung 5-53 an der Schrägstellung der Aufsatzklemme für den oberen Wegaufnehmer zu sehen ist.



**Abbildung 5-53: Schräggestellte Aufsatzklemme für den oberen Stab-Wegaufnehmer durch die Drehung des Stabs beim Spalten des Prüfkörpers 22**

Bei Prüfkörper 22 und 24 waren die Stäbe und Betonkonsolen im Inneren der Prüfkörper nahezu unbeschädigt, bei Prüfkörper 23 war die erste Rippe am Zugende der Verbundlänge abgeschert, wie in Abbildung 5-55 zu sehen ist.



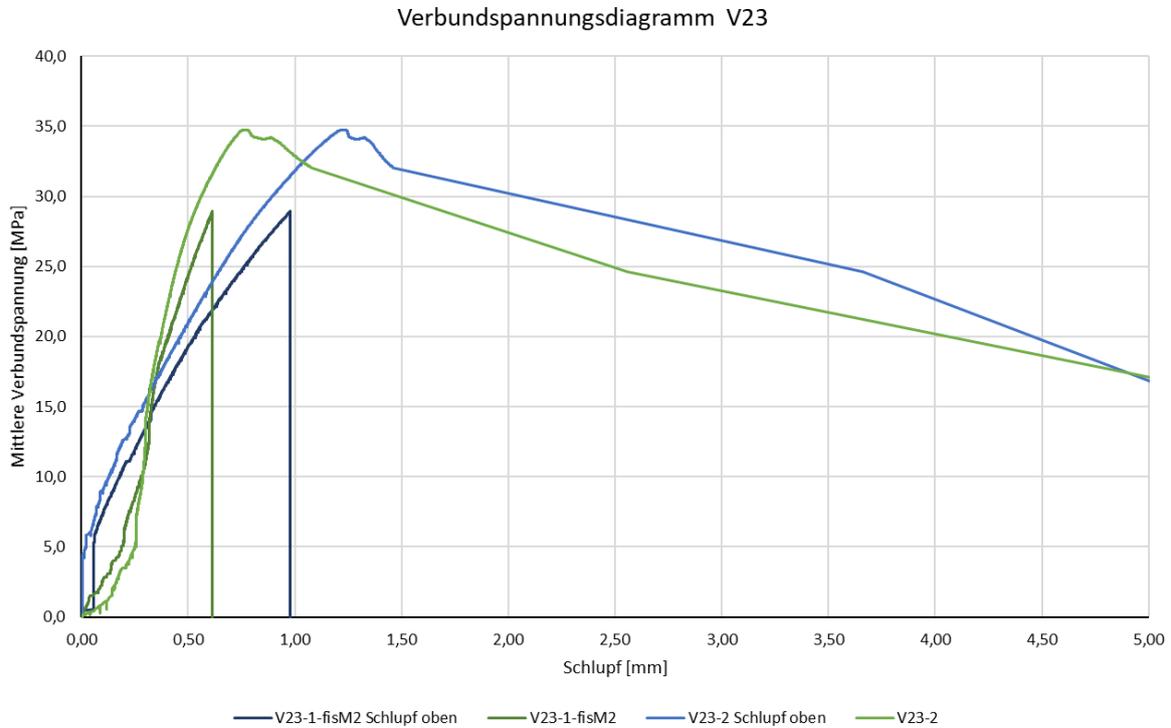
**Abbildung 5-54: Nahezu unbeschädigter Stab und intakte Betonkonsolen im Inneren des beim Versuch gespaltenen Prüfkörpers 22**



**Abbildung 5-55: Abgeschnittene erste Rippe des Stabs in Prüfkörper 23 mit unbeschädigtem Stab zum Vergleich**

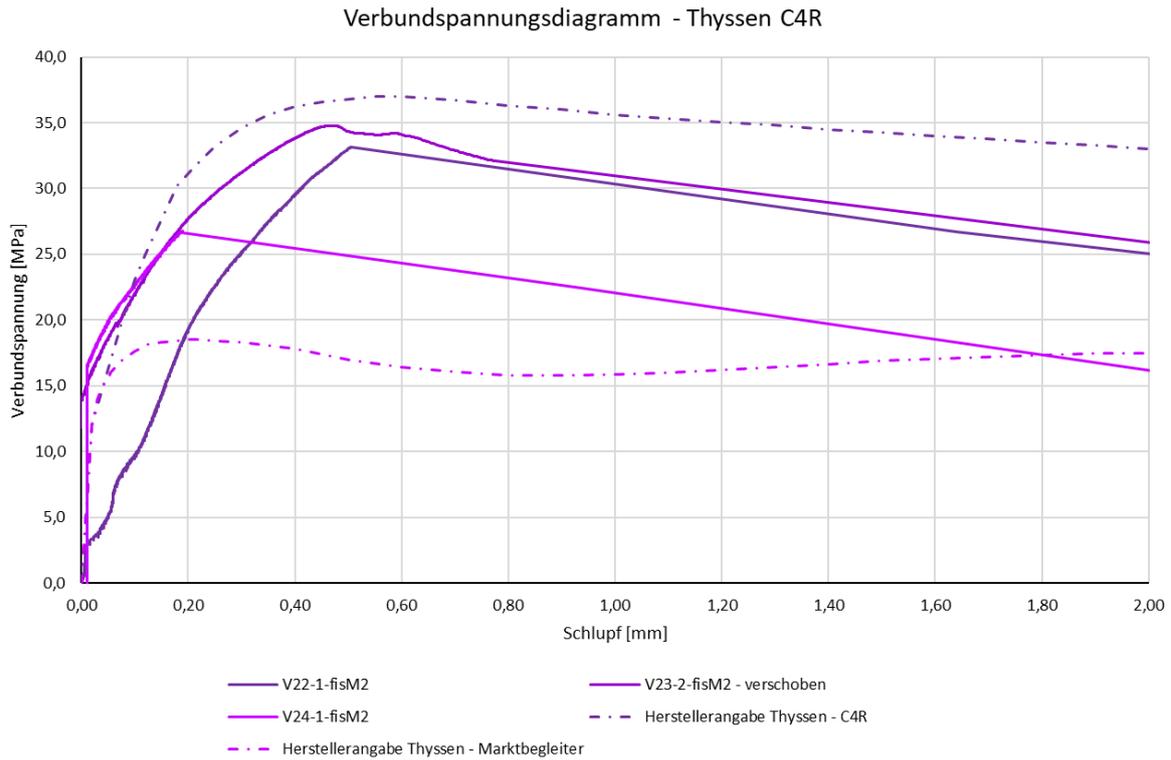
Prüfkörper 23 wurde zwei Mal getestet, da beim ersten Versuch das Zugende des Stabes bei einer mittleren Verbundspannung von 28,94 MPa aus der verwendeten Muffe gezogen wurde. Der zweite

Versuch zeigte am freien Stabende eine etwas niedrigere Verbundsteifigkeit als im ersten Versuch, aber eine schnellere Verschiebungszunahme an der Zugseite des Stabes, wie in Abbildung 5-56 dargestellt ist.



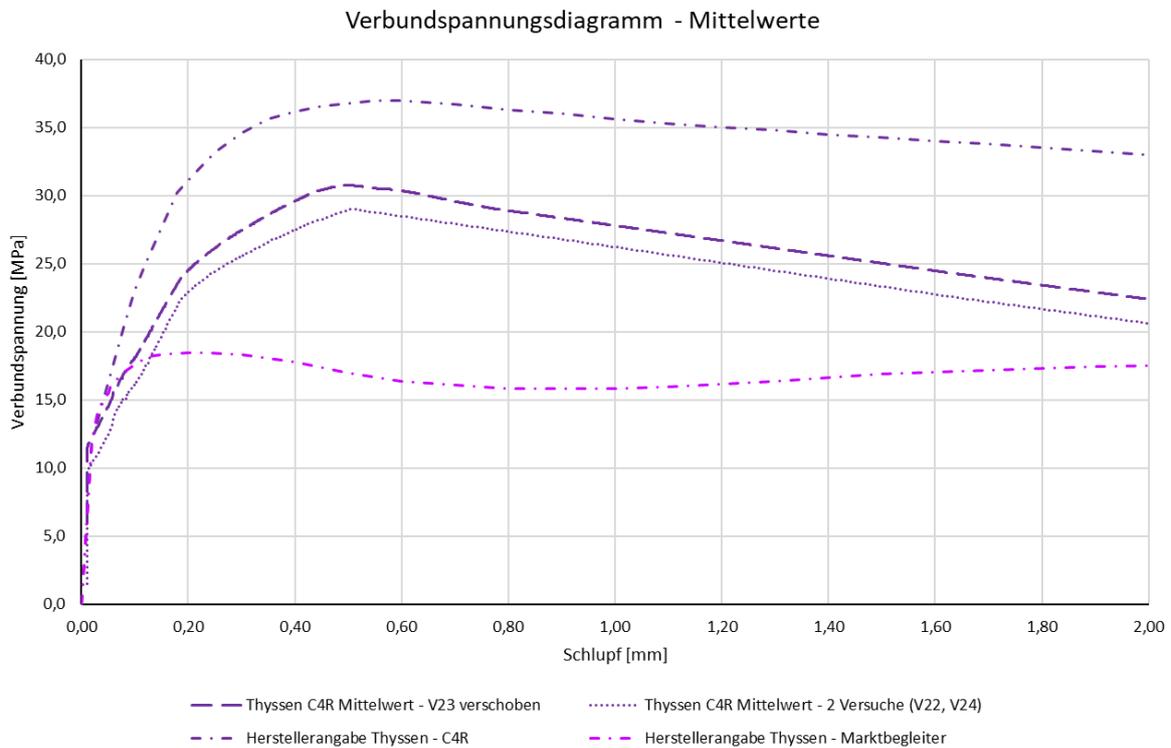
**Abbildung 5-56: Verbundspannungsdiagramm für den Versuchskörper 23 der zweiten Versuchsreihe für den ersten und zweiten Versuch mit dem Schlupf an der Zugseite zum Vergleich**

Verschiebt man die Verbund-Schlupf-Kurve des zweiten Versuchs mit Prüfkörper 23 um den Anfangsschlupf von 0,3 mm, der in beiden Versuchen ähnlich auftrat, nähert sich die erhaltene Versuchskurve der vom Hersteller angegebenen Kurve, wie in Abbildung 5-57 zu sehen ist.



**Abbildung 5-57: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit einem Versatz der Kurve für Versuchskörper 23 um -0,3 mm Schlupf**

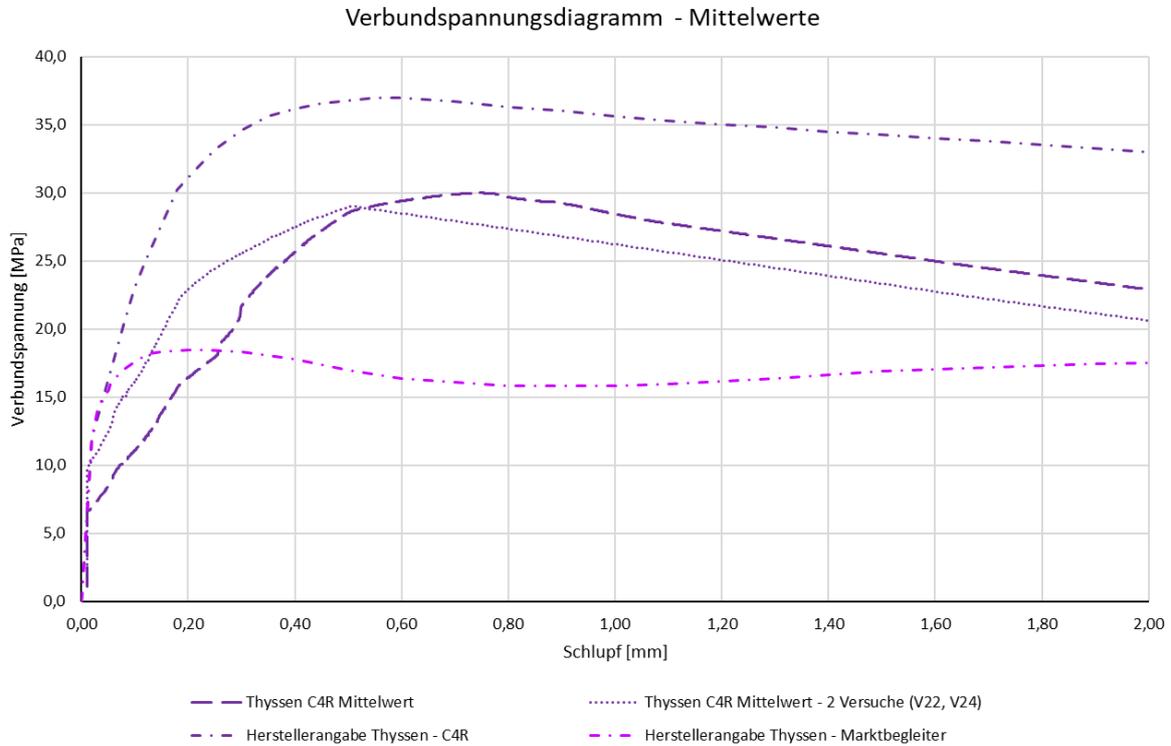
Die gemittelte Kurve für Versuchskörper 22 und 24 und die gemittelte Kurve für Versuchskörper 22, 24 und die verschobene Kurve von Versuchskörper 23 sind in Abbildung 5-58 dargestellt.



**Abbildung 5-58: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit einem Versatz der Kurve von Versuchskörper 23 um -0,3 mm Schlupf**

Worauf dieser erhöhte Anfangsschlupf zurückzuführen ist, ist nicht bekannt. Für die folgende Auswertung wurden nur die gemessenen Kurven verwendet. Um den Einfluss des Versuchskörpers 23 sehen zu können, wurden aber beide gemittelten Kurven in den Diagrammen inkludiert.

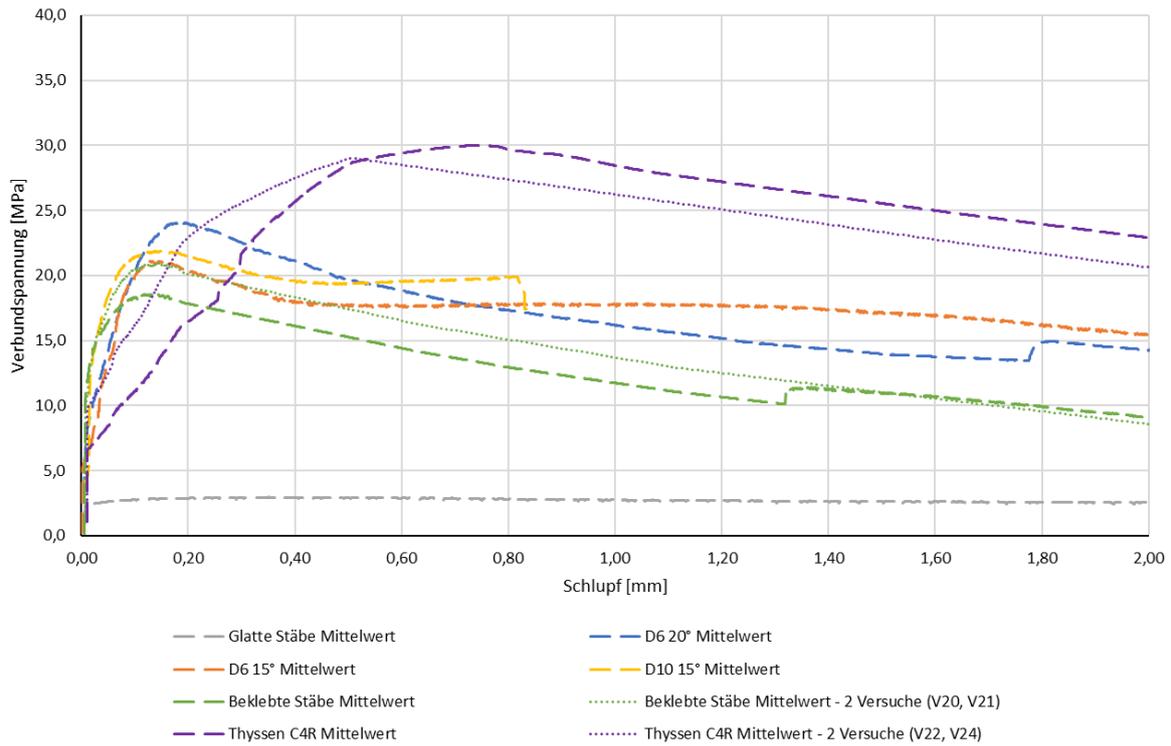
In Abbildung 5-59 sind die beiden Mittelwertkurven mit den Herstellerangaben verglichen.



**Abbildung 5-59: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich**

Die gemittelten Verbundspannungs-Schlupf-Kurven aller Versuchsgruppen sind in Abbildung 5-60 dargestellt.

Verbundspannungsdiagramm - Mittelwerte



**Abbildung 5-60: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der verschiedenen Stabtypen der zweiten Versuchsreihe**

Die für die Versuche hergestellten gefrästen Stäbe und die Stäbe mit der aufgeklebten Rippe zeigen im Durchschnitt ähnliche Steifigkeiten, aber unterschiedliche Maximalwerte. In dieser Versuchsreihe entspricht die Reihung der Stabtypen nach den mittleren Maximalwerten der Reihung nach den Maximalwerten der gemittelten Verbundkurven. Die Stäbe mit der größeren Wendelsteigung von 20° und der kleineren Fräsung erreichten höhere Maximalwerte als jene mit der kleineren Wendelsteigung und größeren Fräsung lagen dazwischen. Die C4R-Stäbe zeigten eine geringere Steifigkeit, aber höhere Maximalwerte.

Die Beklebten Stäbe wiesen die höchsten Verbundsteifigkeiten, ähnlich derer der eingefrästen Stäbe mit der größten Fräsung auf, aber niedrige Verbundfestigkeiten im Bereich der eingefrästen Stäbe mit kleinerer Ganghöhe und kleinerer Einfräsung oder darunter.

In Abbildung 5-61 bis Abbildung 5-66 werden die Maximalwerte der Verbundspannung aus den Versuchen den verschiedenen möglichen Vergleichswerten, die in Kapitel 4.3 untersucht wurden, gegenübergestellt. Allerdings zeigen wiederum keine dieser Vergleiche offensichtliche Tendenzen.

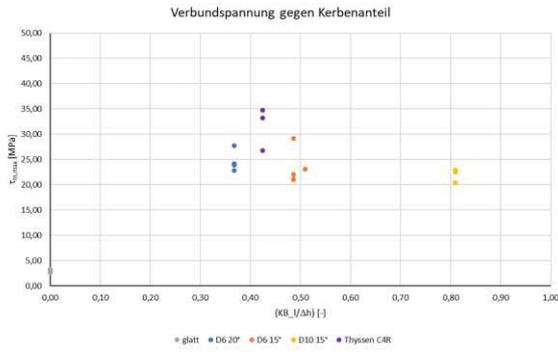


Abbildung 5-61: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Kerbenanteil

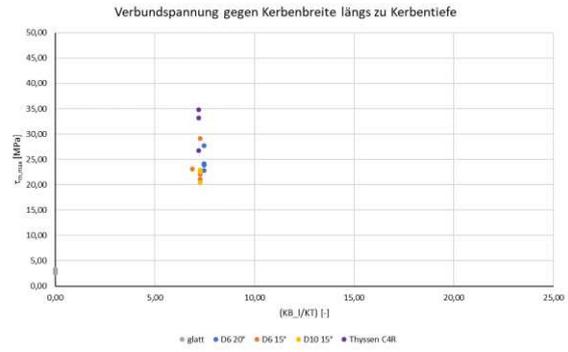


Abbildung 5-62: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Verhältnis von Kerbenbreite längs zur Kerbentiefe

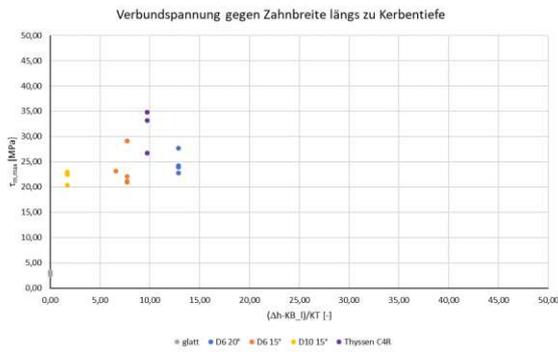


Abbildung 5-63: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Verhältnis von Zahnbreite längs zur Kerbentiefe

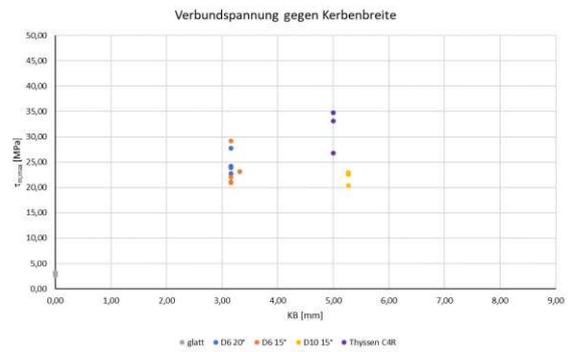


Abbildung 5-64: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbenbreite

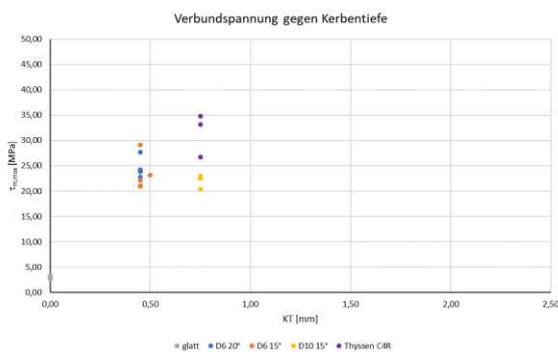


Abbildung 5-65: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbentiefe

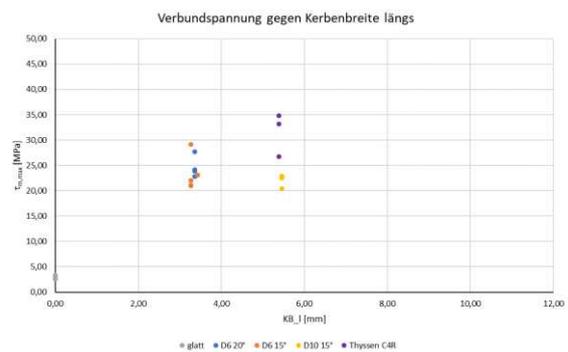


Abbildung 5-66: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbenbreite längs

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 6 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden verschiedene Vergleiche der Berechnungs- und Versuchsergebnisse präsentiert. Zu diesen ist Folgendes anzumerken:

- In den Berechnungsmodellen wurden typische Materialparameter aus Literaturquellen verwendet und in den Versuchen kamen verschiedene CFK-Stäbe unterschiedlicher Hersteller zum Einsatz. Diese sind, wie in Kapitel 3.4 erwähnt, nicht direkt vergleichbar, da sie sich in ihrer Festigkeit, Steifigkeit, Fasergehalt, Tränkung und Oberflächenbeschaffenheit unterscheiden. [5] Diese Unterschiede betreffen insbesondere auch die Scherfestigkeit der Kunststoffmatrix der Stäbe, für die in den Berechnungen ein hoher Wert angenommen wurde (siehe Kapitel 4.4).
- Das Spalten der Prüfkörper ist zumindest bei jenen Versuchen, bei denen die Maximallast vor dem Spalten erreicht wurde und die Stabrippen abgeschert wurden, wahrscheinlich auf das freie Stabende zurückzuführen. Bei diesen Versuchskörpern war weniger als eine vollständige Ganghöhe der eingefrästen Wendel unterhalb der Verbundlänge vorhanden, sodass der unbearbeitete Teil des Stabes als zusätzliche, an die Verbundlänge angrenzende, sehr breite Rippe wirken konnte. Dieser Vorgang wurde für ähnliche Versuche in [3] beschrieben. In den meisten Verbundkurven ist der Zeitpunkt des Spaltens gut erkennbar und tritt erst nach einem Abfall der Verbundspannung auf. Für diese Erklärung spricht auch, dass jene Versuche der zweiten Versuchsreihe, bei denen keine Schraubzwingen zur Minderung des Spaltrisikos verwendet wurden, keine signifikant anderen Ergebnisse oder Maximallasten lieferten, als jene bei denen die Schraubzwingen angebracht wurden. Die Verläufe der Verbundspannungskurven bei kleinem Auszug sind von diesem Effekt aber jedenfalls nicht betroffen.
- Durch diese bei größerem Auszug wirkende zusätzliche sehr breite Rippe sind auch die vermeintlich hohen Duktilitätsreserven des Verbunds bei höherem Auszug wahrscheinlich nicht in diesem Ausmaß gegeben. Das Abscheren dieses äußeren Teils des Stabendes führte bei höherem Auszug zu höheren gemessenen Kräften, die bei einem freigefrästen oder mit einer durchgehenden Wendel versehenen Stabende nicht aufgetreten wären.
- Einige der Stäbe der zweiten Versuchsreihe wurden mehrmals belastet, teilweise nach einer schlagartigen Entlastung. Wie genau sich dieser Umstand auf die Verläufe der Verbundspannungskurven ausgewirkt hat, ist nicht bekannt.
- Für die erste und zweite Versuchsreihe wurde der Schlupf des Stabes unterschiedlich gemessen. Während für die zweite Versuchsreihe der Schlupf über die Differenz der Verschiebungen des freien Stabendes und des Prüfkörpers knapp neben dem Stab gemessen wurde, wurde bei der ersten Versuchsreihe nur die Verschiebung des Stabendes gemessen, ohne die Verschiebung des Prüfkörpers zu berücksichtigen. Dadurch kann die geringere gemessene Steifigkeit in den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe erklärt werden. Hierzu ist anzumerken, dass die an der TU Wien im Versuchsaufbau verwendeten Gewindestangen einen wesentlich größeren Durchmesser aufwiesen und damit auch wesentlich steifer waren. Wie stark sich dieser Einfluss auf die Ergebnisse ausgewirkt hat, ist nicht bekannt.

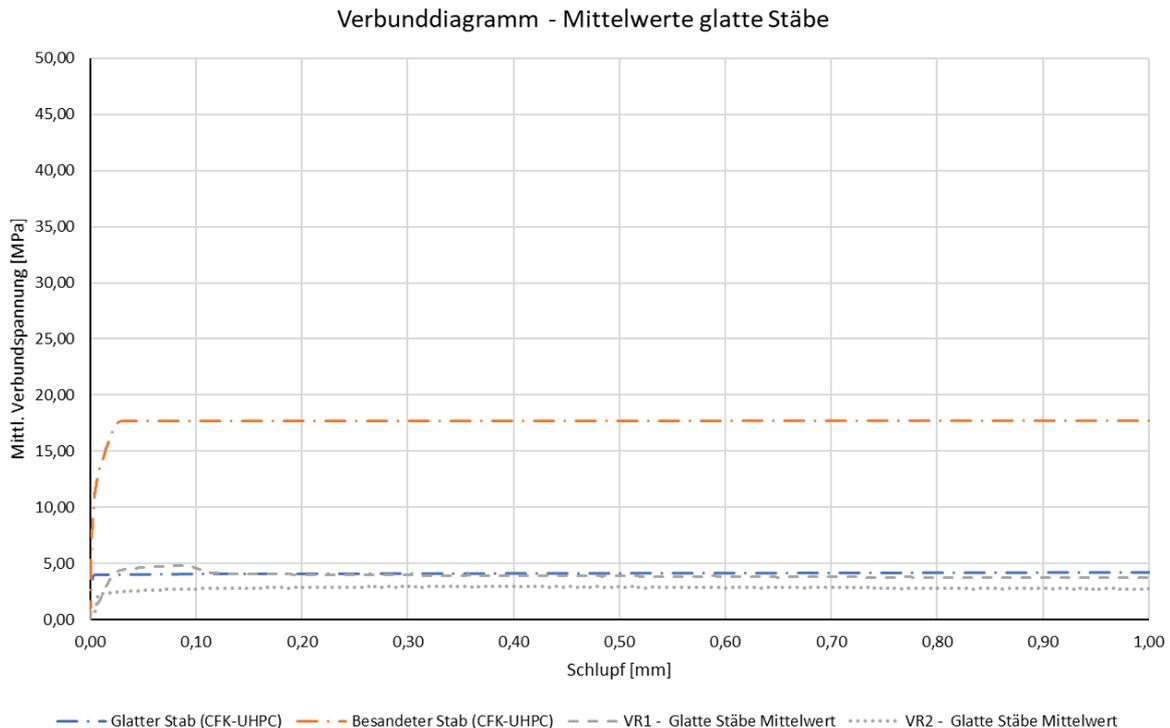
In den Verbunddiagrammen dieses Abschnitts sind zusätzlich zu den Ergebnissen aus den Versuchsreihen die mittleren Verbundkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] zu Vergleichszwecken dargestellt. In diesen Versuchen wurde derselbe Stabtyp und UHPC derselben

Rezeptur verwendet, der auch für die Prüfkörper der ersten Versuchsreihe dieser Arbeit verwendet wurde. Die Rezeptur des UHPC war für die zweite Versuchsreihe dieser Arbeit ebenfalls dieselbe.

## 6.1 Vergleich der ersten und zweiten Versuchsreihe

### 6.1.1 Glatte Stäbe

In Abbildung 6-1 sind die mittleren Verbundkurven für glatte Stäbe aus den beiden Versuchsreihen dargestellt.



**Abbildung 6-1: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für glatte Stäbe, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

Die mittlere Verbundkurve für die Stäbe der ersten Versuchsreihe gleicht annähernd der Referenzkurve für glatte Stäbe, was aufgrund desselben verwendeten Stabtyps und Betons zu erwarten war.

Die Maximalwerte der mittleren Verbundspannungskurven liegen bei 4,85 MPa und 2,96 MPa für die Kurven der ersten und zweiten Versuchsreihe.

Die mittlere Verbundkurve für die glatten Stäbe der zweiten Versuchsreihe liegt etwas unterhalb der beiden erwähnten Kurven, was auf eine andere Oberflächenbeschaffenheit der Stäbe schließen lässt.

### 6.1.2 Stäbe mit $\alpha_W=20^\circ$ , kleinerer Fräsung

In Abbildung 6-2 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von  $20^\circ$  und der jeweils kleineren Fräsung mit einer Tiefe von 0,5 mm aus den beiden Versuchsreihen dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte 20° mit kleinerer Fräsung

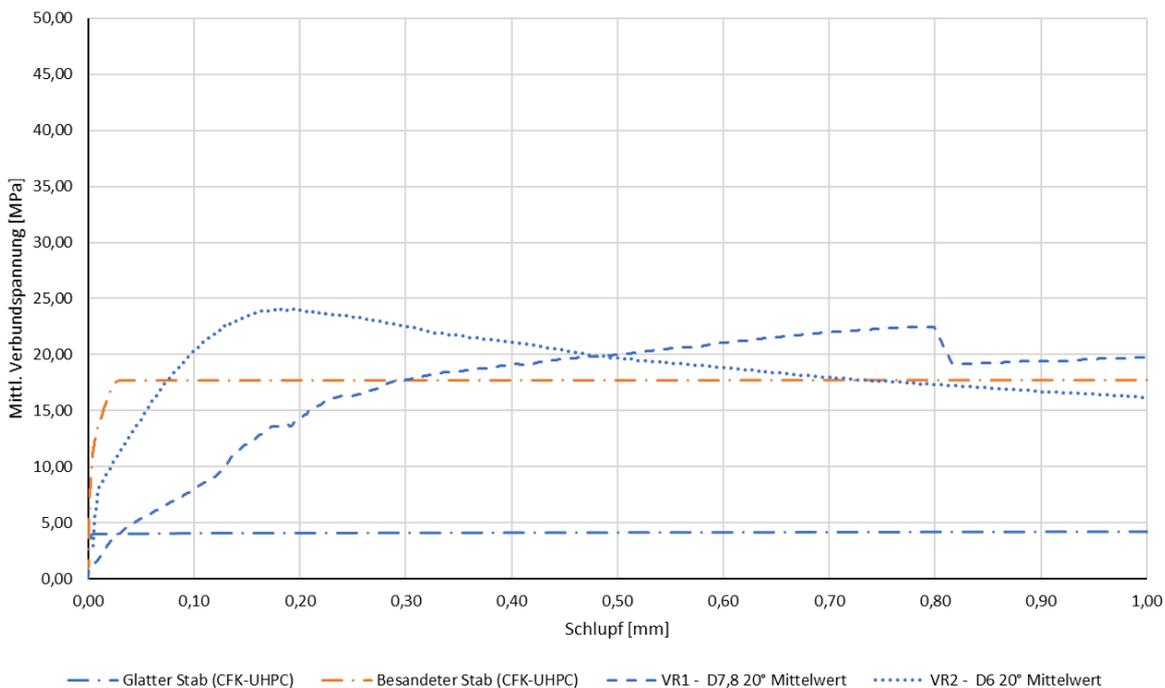


Abbildung 6-2: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]

Die Verbundkurve der ersten Versuchsreihe zeigt eine wesentlich geringere Verbundsteifigkeit als die der zweiten Versuchsreihe, die Maximalwerte der mittleren Kurven von 22,6 MPa und 24,1 MPa unterscheiden sich um 6,2 %.

Die Stäbe dieser Gruppe hatten in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 3,58 mm und 3,16 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,44 mm und 0,45 mm.

Beide gemittelten Kurven weisen eine geringere Steifigkeit, aber höhere Festigkeit auf als die Kurve für die besandeten Stäbe.

### 6.1.3 Stäbe mit $\alpha_W=15^\circ$ , kleinerer Fräsung

In Abbildung 6-3 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung mit einer Tiefe von 0,5 mm aus den beiden Versuchsreihen dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte 15° mit kleinerer Fräsung

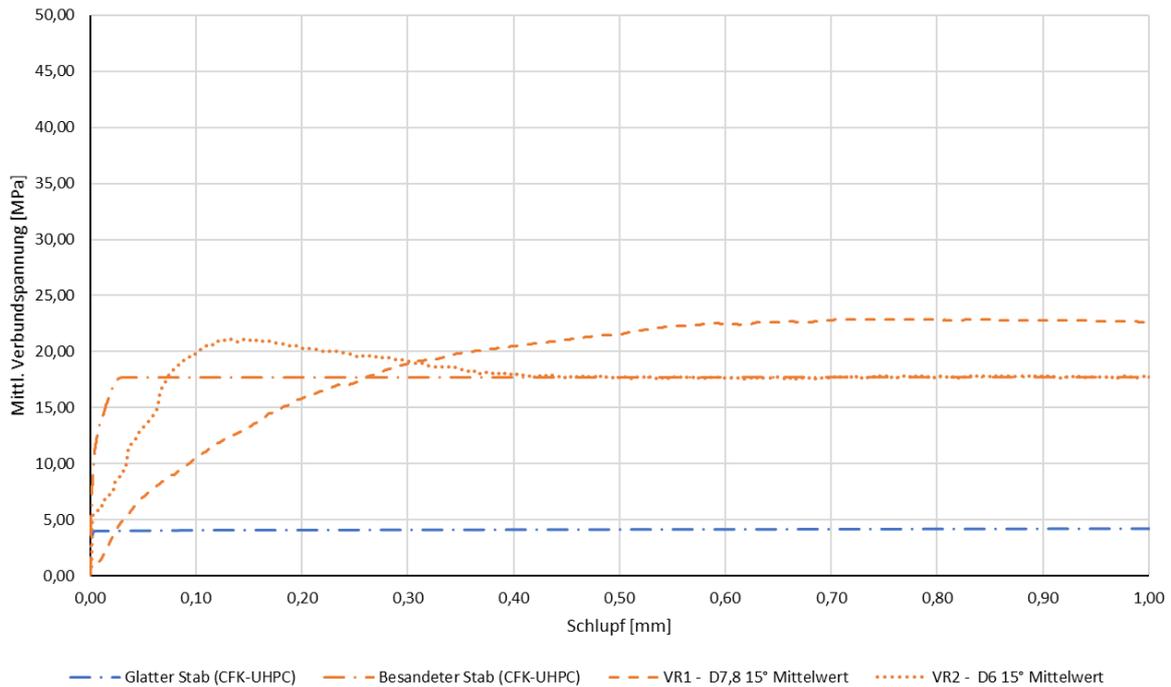


Abbildung 6-3: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]

Die Verbundkurve der ersten Versuchsreihe zeigt auch bei dieser Stabvariante eine geringere Verbundsteifigkeit als die der zweiten Versuchsreihe, die Maximalwerte der mittleren Kurven von 22,9 MPa und 21,1 MPa unterscheiden sich um 8,5 %.

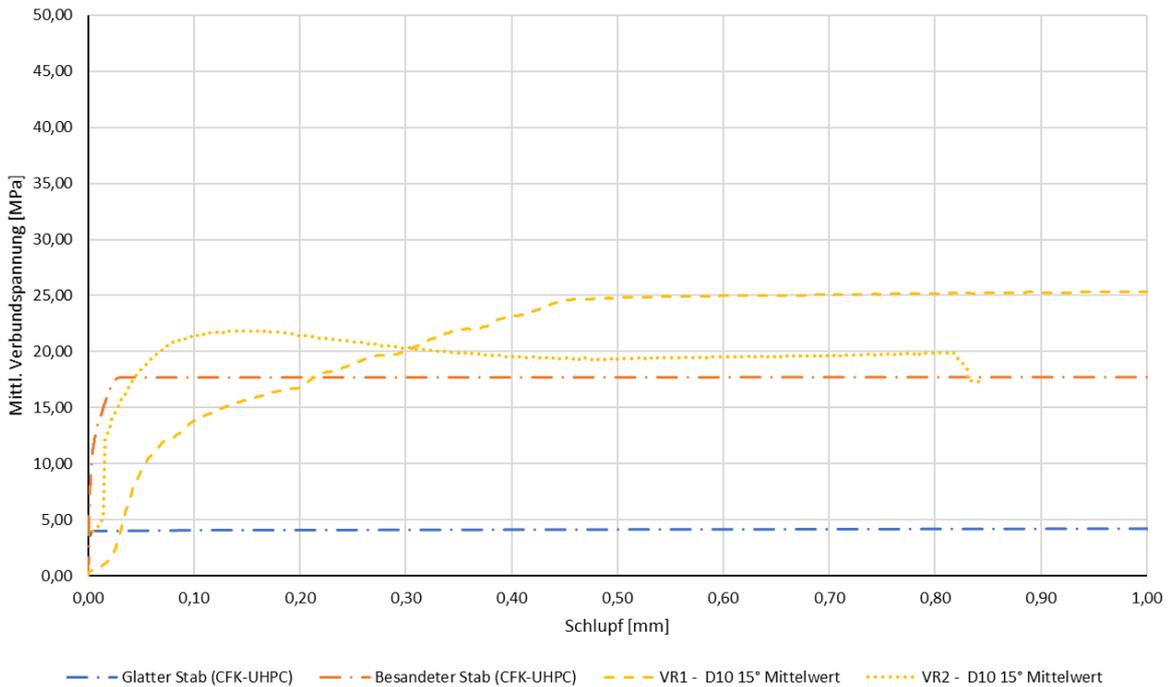
Die Stäbe dieser Gruppe hatten in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 3,29 mm und 3,20 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,37 mm und 0,46 mm.

Auch für diese Gruppe zeigen beide gemittelten Kurven eine geringere Steifigkeit, aber höhere Festigkeit als die Kurve für die besandeten Stäbe.

#### 6.1.4 Stäbe mit $\alpha_w=15^\circ$ , größerer Fräsung

In Abbildung 6-4 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung mit einer Tiefe von 0,75 mm aus den beiden Versuchsreihen dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte 15° mit größerer Fräsung



**Abbildung 6-4: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

Die Verbundkurve der ersten Versuchsreihe zeigt wiederum eine geringere Verbundsteifigkeit als die der zweiten Versuchsreihe, die Maximalwerte der mittleren Kurven von 25,5 MPa und 21,9 MPa unterscheiden sich um 16,4 %.

Die Stäbe dieser Gruppe hatten in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 4,78 mm und 5,27 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,61 mm und 0,75 mm.

Auch für diese Gruppe zeigen beide gemittelten Kurven eine geringere Steifigkeit, aber höhere Festigkeit auf als die Kurve für die besandeten Stäbe. Hierbei weist die Kurve der zweiten Versuchsreihe bereits eine der Kurve für die besandeten Stäbe ähnliche Steigung auf, aber auch einen Anfangsschlupf, den die besandeten Stäbe nicht zeigen. Dieser Unterschied könnte aber durch den wiederum anderen Versuchsaufbau dieser Versuche erklärt werden.

### 6.1.5 Beklebte Stäbe

In Abbildung 6-5 ist die mittlere Verbundkurve für die Stäbe mit einer aufgeklebten Rippe aus der zweiten Versuchsreihe dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte beklebte Stäbe

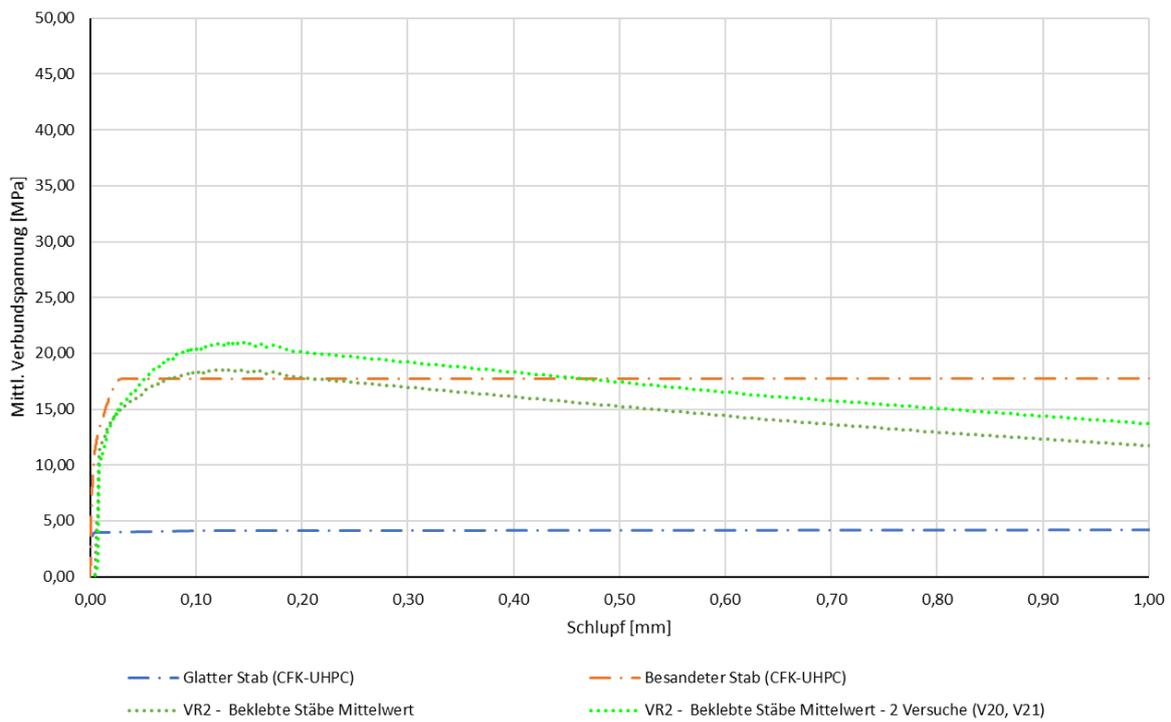


Abbildung 6-5: Vergleich der mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer aufgeklebten Rippe mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]

Die Verbundkurven der beklebten Stäbe sind der der besandeten Stäbe ähnlich, mit einer etwas geringeren Steifigkeit und etwas höheren Festigkeit. Der Maximalwert der gemittelten Verbundkurven liegt bei 18,5 MPa beziehungsweise 21,0 MPa.

### 6.1.6 C4R-Stäbe

In Abbildung 6-6 sind die mittleren Verbundkurven für die C4R-Stäbe aus den beiden Versuchsreihen dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte C4R

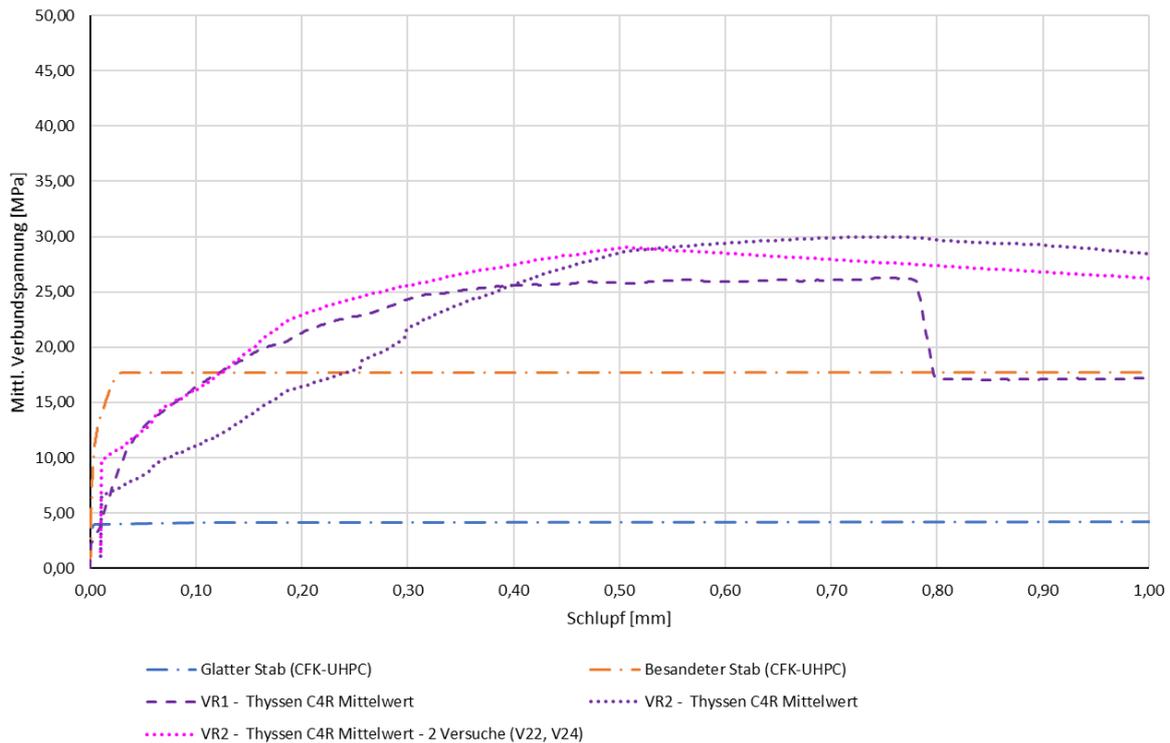


Abbildung 6-6: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für C4R-Stäbe, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]

Die Verbundkurve der ersten Versuchsreihe zeigt hier eine ähnliche Verbundsteifigkeit wie jene der zweiten Versuchsreihe. Die gemittelte Kurve aller drei Versuchskörper aus der zweiten Versuchsreihe zeigt eine niedrigere Steifigkeit, aber höhere Festigkeit als die beiden anderen Kurven. Die Maximalwerte der Kurven von 26,4 MPa der ersten Versuchsreihe und 30,0 MPa beziehungsweise 29,0 MPa der zweiten Versuchsreihe unterscheiden sich um 12,0 % beziehungsweise 9,0 %.

Auch für diese Gruppe zeigen beide gemittelten Kurven eine geringere Steifigkeit, aber höhere Festigkeit als die Kurve für die besandeten Stäbe.

### 6.1.7 Schlussfolgerungen

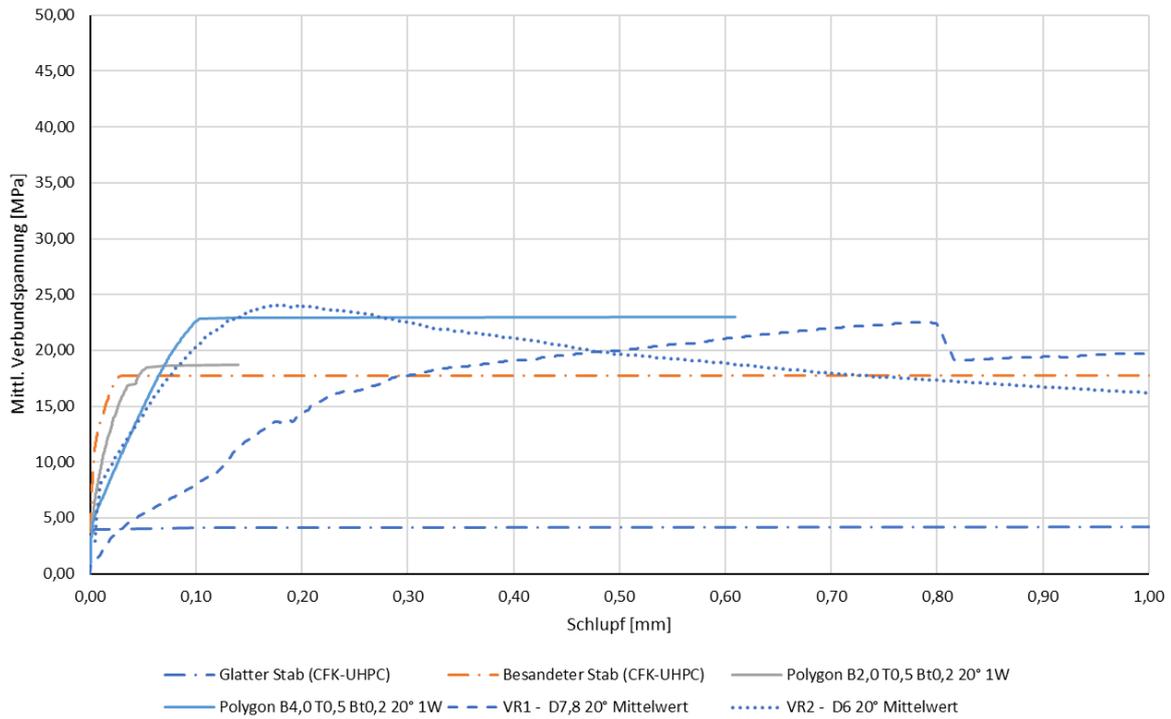
Da bei allen Stabgruppen außer jener der C4R-Stäbe vorwiegend die CFK-Wendel der Stäbe abgesichert wurde, ist bei dieser Versuchskonfiguration die Scherfestigkeit der Kunststoffmatrix dieser Stäbe als der limitierende Parameter zu sehen. Die C4R-Stäbe scheinen zusätzlich zu ihren breiteren Rippen mit einer wesentlich höherfesten Kunststoffmatrix hergestellt worden zu sein und neigen daher eher zu einem Spalten der Prüfkörper bevor die Scherfestigkeit Stabwendel erreicht wird. Folglich sollten diese Stäbe nur mit sehr großer Betondeckung oder Spaltzugbewehrung verwendet werden, da das Spaltversagen in den Versuchen im Gegensatz zu den anderen Stabgruppen schlagartig stattfand und danach keine signifikante Kraft mehr über den Stab übertragen werden konnte.

## 6.2 Vergleich der Versuchsergebnisse und Berechnungsergebnisse

### 6.2.1 Stäbe mit $\alpha_w=20^\circ$ , kleinerer Fräsung

In Abbildung 6-7 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von  $20^\circ$  und der jeweils kleineren Fräsung mit einer Tiefe von 0,5 mm aus den beiden Versuchsreihen und die berechneten Kurven für die am ähnlichsten modellierten Stäbe dargestellt.

Verbunddiagramm - Mittelwerte 20° kleinere Fräsung



**Abbildung 6-7: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

Für diese Stabgruppe stimmen die Versuchsergebnisse gut mit den Ergebnissen der Berechnungen überein, insbesondere die Kurve aus der zweiten Versuchsreihe. Die Maximalwerte stimmen bei beiden Versuchsreihen gut überein, die Verbundsteifigkeit wurde in der ersten Versuchsreihe wesentlich niedriger gemessen.

Die relativen Abweichungen der Versuchsergebnisse von den Ergebnissen der ähnlichsten Berechnungsmodelle sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

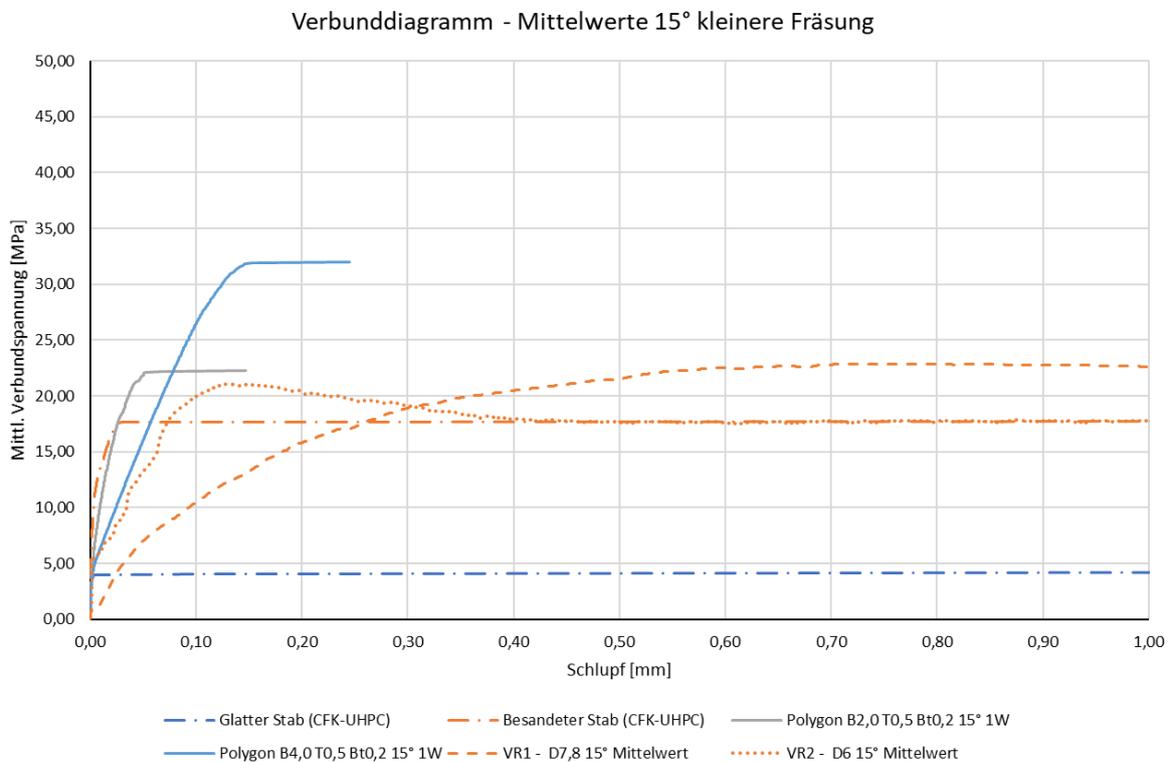
Die Stäbe dieser Gruppe wiesen in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 3,58 mm und 3,16 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,44 mm und 0,45 mm auf.

**Tabelle 6-1: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung**

Wendelsteigung 20°, kleinere Fräsung			
		Ergebnisse der ähnlichsten Berechnungsmodelle [MPa]	
		Polygon 20° B2,0 T0,5	Polygon 20° B4,0 T0,5
Versuchsergebnisse [MPa]		18,70	22,90
<u>Versuchsreihe 1</u>			
Mittlerer Maximalwert	24,71	+24,3%	+7,3%
Maximalwert Mittelkurve	22,56	+17,1%	-1,5%
<u>Versuchsreihe 2</u>			
Mittlerer Maximalwert	24,54	+23,8%	+6,7%
Maximalwert Mittelkurve	24,05	+22,2%	+4,8%

## 6.2.2 Stäbe mit $\alpha_w=15^\circ$ , kleinerer Fräsung

In Abbildung 6-8 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von  $15^\circ$  und der jeweils kleineren Fräsung mit einer Tiefe von 0,5 mm aus den beiden Versuchsreihen und die berechneten Kurven für die am ähnlichsten modellierten Stäbe dargestellt.



**Abbildung 6-8: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von  $15^\circ$  und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

Für diese Stabgruppe liegen die erreichten Verbundspannungen in den Versuchsergebnissen unter jenen aus den Berechnungsergebnissen. Die Maximalwerte aus den Versuchen erreichen nur in etwa den Maximalwert der nächstkleineren berechneten Stabvariante.

Die relativen Abweichungen der Versuchsergebnisse von den Ergebnissen der ähnlichsten Berechnungsmodelle sind in Tabelle 6-2 aufgelistet.

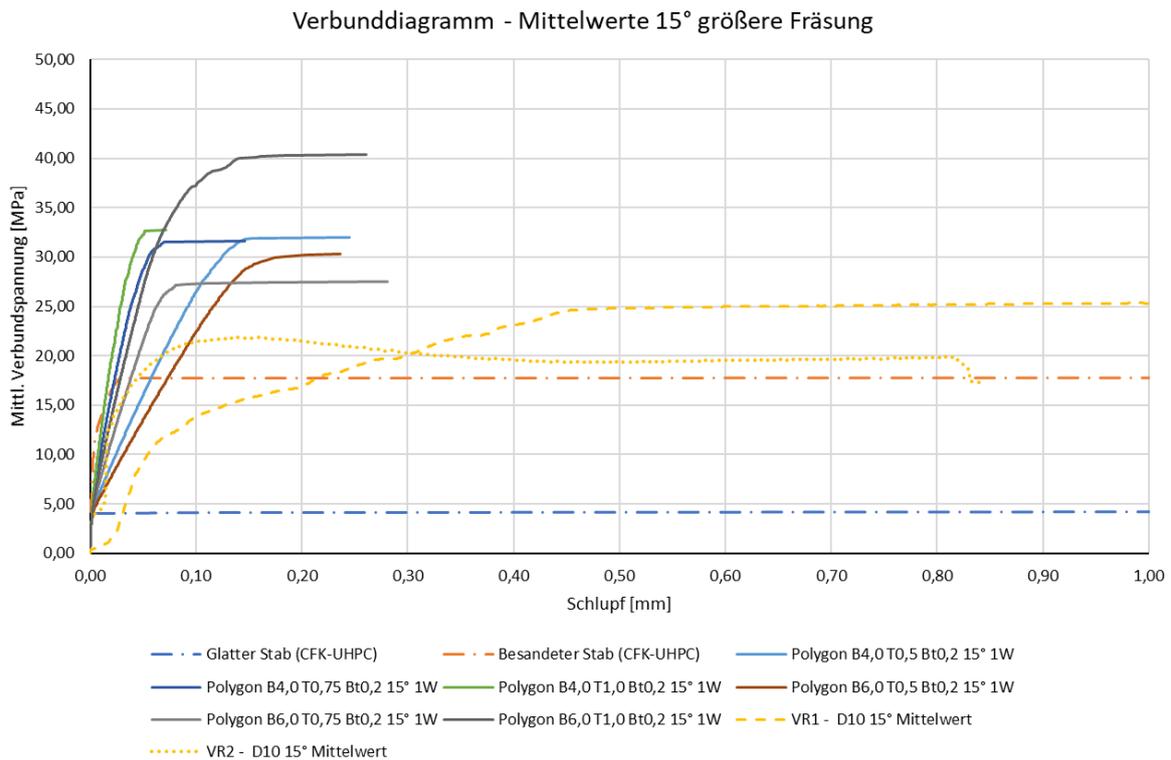
Die Stäbe dieser Gruppe wiesen in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 3,29 mm und 3,20 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,37 mm und 0,46 mm auf.

**Tabelle 6-2: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung**

Wendelsteigung 15°, kleinere Fräsung			Ergebnisse der ähnlichsten Berechnungsmodelle [MPa]	
			Polygon 15° B2,0 T0,5	Polygon 15° B4,0 T0,5
Versuchsergebnisse [MPa]			22,3	32,0
<b>Versuchsreihe 1</b>				
Mittlerer Maximalwert	23,93	+6,8%	-33,7%	
Maximalwert Mittelkurve	22,93	+2,7%	-39,6%	
<b>Versuchsreihe 2</b>				
Mittlerer Maximalwert	21,81	-2,2%	-46,7%	
Maximalwert Mittelkurve	21,10	-5,7%	-51,7%	

### 6.2.3 Stäbe mit $\alpha_w=15^\circ$ , größerer Fräsung

In Abbildung 6-9 sind die mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung mit einer Tiefe von 0,75 mm aus den beiden Versuchsreihen und die berechneten Kurven für die am ähnlichsten modellierten Stäbe dargestellt.



**Abbildung 6-9: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

Für diese Stabgruppe liegen die in den Versuchen erreichten Verbundspannungen ebenfalls unter jenen aus den Berechnungsergebnissen. Die Kurve der zweiten Versuchsreihe zeigt zwar eine der

Mehrheit der Berechnungskurven ähnliche Steifigkeit, die Maximalwerte der Versuche liegen aber unter jenen aller Berechnungsergebnisse ähnlicher Stabvarianten.

Die relativen Abweichungen der Versuchsergebnisse von den Ergebnissen der ähnlichsten Berechnungsmodelle sind in Tabelle 6-3 aufgelistet.

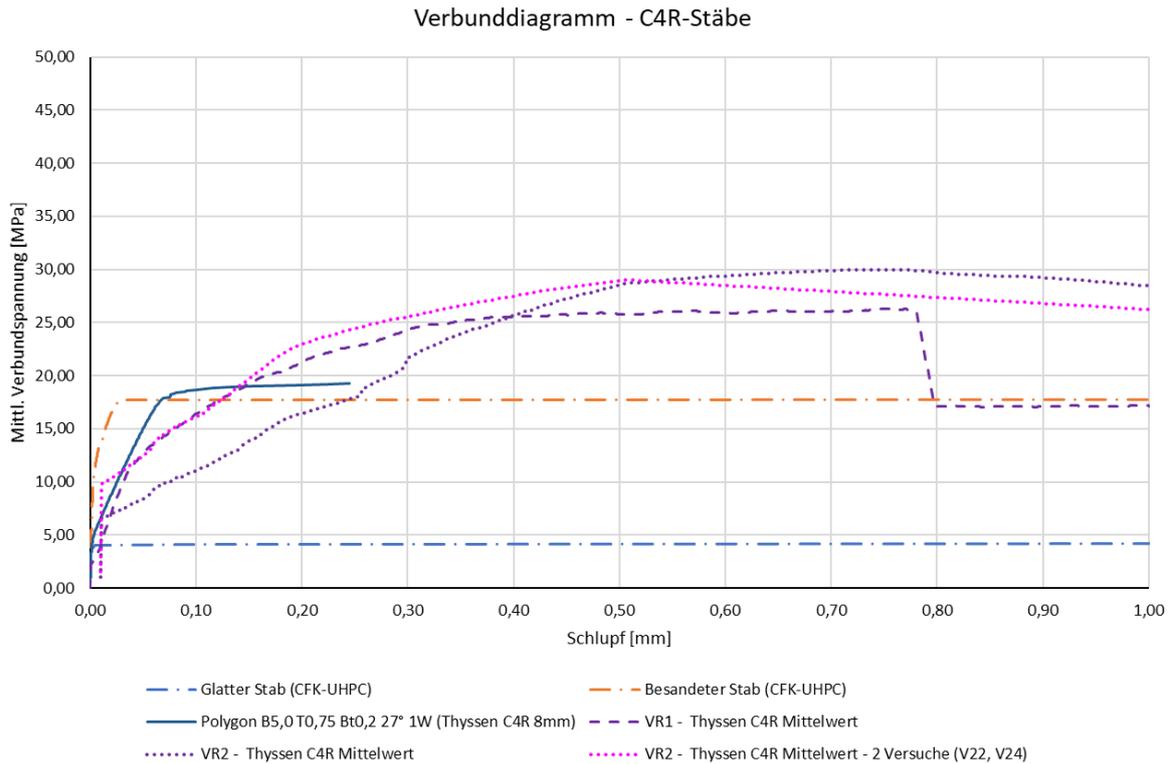
Die Stäbe dieser Gruppe wiesen in der ersten und zweiten Versuchsreihe eine mittlere Kerbenbreite von jeweils 4,78 mm und 5,27 mm und eine mittlere Kerbtiefe von 0,61 mm und 0,75 mm auf.

**Tabelle 6-3: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung**

		Wendelsteigung 15°, größere Fräsung			
		Ergebnisse der ähnlichsten Berechnungsmodelle [MPa]			
Versuchsergebnisse [MPa]		Polygon 15° B4,0 T0,5	Polygon 15° B4,0 T0,75	Polygon 15° B6,0 T0,5	Polygon 15° B6,0 T0,75
		32,0	31,6	30,3	27,5
<u>Versuchsreihe 1</u>					
Mittlerer Maximalwert	25,78	-24,1%	-22,6%	-17,5%	-6,7%
Maximalwert Mittelkurve	25,46	-25,7%	-24,1%	-19,0%	-8,0%
<u>Versuchsreihe 2</u>					
Mittlerer Maximalwert	22,22	-44,0%	-42,2%	-36,4%	-23,8%
Maximalwert Mittelkurve	21,87	-46,3%	-44,5%	-38,5%	-25,7%

#### 6.2.4 C4R-Stäbe

In Abbildung 6-10 sind die mittleren Verbundkurven für die C4R-Stäbe aus den beiden Versuchsreihen und die berechnete Verbundkurve für den C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser dargestellt.



**Abbildung 6-10: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für die C4R-Stäbe dem Berechnungsergebnis des modellierten C4R-Stabs und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

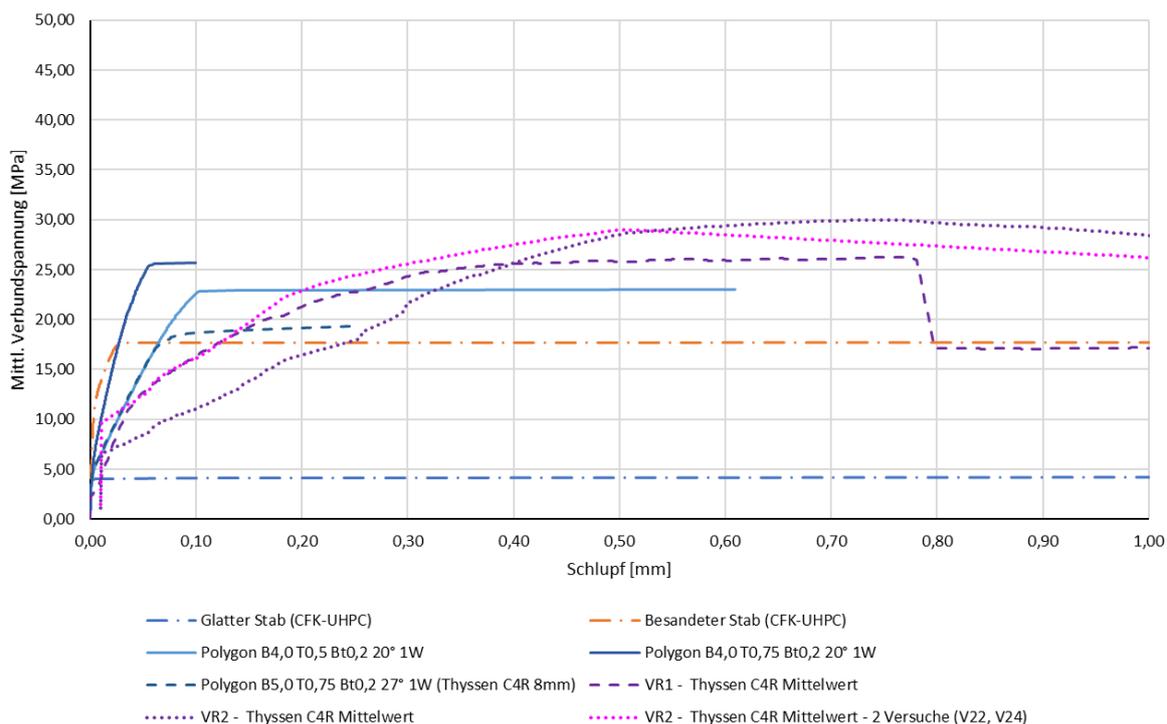
Für die C4R-Stäbe zeigt sich ein umgekehrtes Bild zu den anderen Stabgruppen. Hier liegen die erreichten Verbundspannungen des Berechnungsmodells deutlich unter jenen der Versuchsergebnisse.

Vergleicht man die Versuchsergebnisse nicht mit dem Modell der 8 mm-Version des C4R-Stabs, sondern mit einem Modell, das annähernd einer um 20 % skalierten Version des 10 mm-C4R-Stabs und dessen Prüfkörper entspricht, ist die Übereinstimmung wesentlich besser.

Eine Skalierung des 10 mm-C4R Stabs auf 80 % seiner Größe würde einen Stab mit einem Durchmesser von 8 mm statt 10 mm, einer Ganghöhe von 10,16 mm statt 12,70 mm (bzw. jeweils einer Wendelsteigung von 22°), einer Kerbenbreite von 4,0 mm statt 5,0 mm und einer Kerbtiefe von 0,6 mm statt 0,75 mm ergeben.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe ist in Abbildung 6-11 dargestellt.

Verbunddiagramm - C4R-Stäbe



**Abbildung 6-11: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für die C4R-Stäbe dem Berechnungsergebnis des modellierten C4R-Stabs mit einem Durchmesser von 8 mm, den ähnlichsten modellierten Stäben zu einer direkten Skalierung des C4R-Stabs mit einem Durchmesser von 10 mm und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]**

In Tabelle 6-3 sind die relativen Abweichungen der Versuchsergebnisse von den Ergebnissen der erwähnten ähnlichsten Berechnungsmodelle aufgelistet.

**Tabelle 6-4: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die C4R Stäbe**

C4R-Stäbe		Ergebnisse der ähnlichsten Berechnungsmodelle [MPa]		
		Polygon 27° B5,0 T0,75	Polygon 20° B4,0 T0,5	Polygon 20° B4,0 T0,75
Versuchsergebnisse [MPa]		19,3	22,9	25,7
<u>Versuchsreihe 1</u>				
Mittlerer Maximalwert	27,82	+30,6%	+17,7%	+7,6%
Maximalwert Mittelkurve	26,39	+26,9%	+13,2%	+2,6%
<u>Versuchsreihe 2</u>				
Mittlerer Maximalwert	31,56	+38,8%	+27,4%	+18,6%
Maximalwert Mittelkurve	30,00	+35,7%	+23,7%	+14,3%

### 6.2.5 Schlussfolgerungen

Sofern die teilweise großen Unterschiede zwischen den Versuchs- und Berechnungsergebnissen nicht auf andere Ungenauigkeiten zurückzuführen sind, wurde die Scherfestigkeit der Kunststoffmatrix der CFK-Stäbe in den Berechnungsmodellen überschätzt. Eine Überprüfung dieser Annahme und mögliche Rückrechnung einer ungefähren Scherfestigkeit war aber im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich.

Weiters könnte eine Überprüfung des Modells des dünneren C4R-Stabs mit einem Ausziehversuch an einem Stab dieser Größe und ein Modell des dickeren Stabs Gegenstand weiterer Nachforschungen sein.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Versuchsergebnissen kann geschlossen werden, dass eingefräste Stäbe höhere Verbundspannungen entwickeln können als beklebte, besonders wenn man die vorangegangenen Versuche berücksichtigt, die in [15] und [19] beschrieben wurden. Diese Stäbe haben allerdings den Nachteil einer geringeren Verbundsteifigkeit und eines reduzierten Kernquerschnitts, der für das Abtragen von Zugkräften genutzt werden kann.

Bei hohen Verbundspannungen besteht die Gefahr eines schlagartigen Versagens der Stabverankerung, wenn keine Spaltzugbewehrung oder ausreichend große Betondeckung vorhanden ist. Bei einem Versagen durch Stabauszug zeigen sowohl die eingefrästen als auch die beklebten Stäbe ein duktileres Verhalten, bei dem der Stab allerdings irreversibel beschädigt wird bevor die Maximallast erreicht wird. Somit können Verbundbauteile aus UHPC und CFK mit einem sich ankündigenden Versagen konzipiert werden, trotz des spröden Verhaltens der beiden Materialien. Weiters hat diese Versagensform den Vorteil, dass bei Abscheren der Rippen weder der Stabkernquerschnitt, der die Zugfestigkeit des Stabs bestimmt noch das Betongefüge rund um den Stab beeinträchtigt werden.

Für alle Stäbe ist die Bedeutung der Limitierung der maximalen Verbundspannung durch den inneren Verbund der Stäbe anzumerken. In den durchgeführten Versuchen wurden bei der überwiegenden Mehrheit der Stäbe die Rippen abgeschert. Die C4R-Stäbe der Firma Thyssen, die scheinbar eine wesentlich höhere Scherfestigkeit ihrer Kunststoffmatrix aufwiesen, erreichten die höchsten Verbundspannungen und versagten aber ebenfalls entweder durch ein Spalten der Prüfkörper, das mit umlaufender Bewehrung verhindert werden könnte, oder durch ein Abscheren ihrer Wendel. Anders betrachtet waren die erreichbaren Verbundspannungen in keinem der Versuche durch die Druckfestigkeit des Betons begrenzt, wobei anzumerken ist, dass alle Versuche mit UHPC mit einer Druckfestigkeit über 165 MPa durchgeführt wurden. Somit kann bei anderer Ausführung der Prüfkörper, bei der der Beton besser ausgenutzt wird, ein besseres Verhältnis aus gutem Verbund zu hoher Materialausnutzung (großer Restquerschnitt) erreicht werden. Maßnahmen zur Verhinderung des Versagens des inneren Verbundes der Stäbe und des Spaltens des Betons wären die Verwendung von Matrixmaterial mit höherer Festigkeit sowie die Verwendung von Spaltbewehrung. Die beklebten Stäbe der Firma S&P, die nur eine wesentlich kleinere Scherfläche zwischen Rippen und Stab aufwiesen, zeigen auch, dass höhere Scherfestigkeiten für Epoxidharze für solche Anwendungen möglich sind.

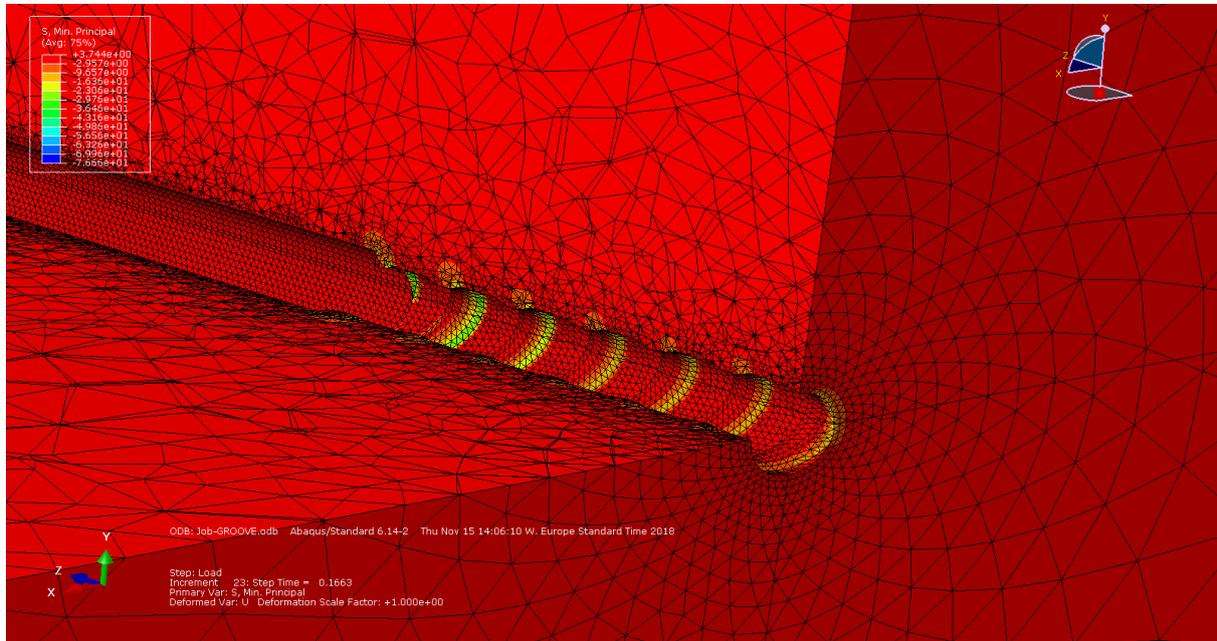
Da flache Rippenflanken das Spalten der Prüfkörper begünstigen und Querdruck die Schubsteifigkeit der Kunststoffmatrix der CFK-Stäbe aufgrund von Mikroschädigungen verringern kann [8], wäre eine Untersuchung kleinerer, enger gestufter runder Einfräsungen mit selber Tiefe interessant. Solche Rippen hätten relativ steile Flanken, die die Spaltkräfte im umliegenden Beton niedrig halten und würden durch die Abrundung der Einschnitte die größtmögliche innere Scherfläche aufweisen. Welche Rippenabstände am günstigsten wären und wie sich Spannungsspitzen am Beginn und Ende jeder Rippe auf die erreichbare Verbundspannung auswirken, könnte ebenfalls noch Gegenstand weiterer Forschung sein.

Weiters kann die Verbesserung des Verbunds zwischen CFK und UHPC sehr schlanke und effiziente Bauteile ermöglichen, die durch eine Einsparung von Zement, Eigengewicht, Stahl und Transportwegen auch sehr viel umweltschonender und ressourceneffizienter sind.

Vor allem die Möglichkeit UHPC mit CFK-Stäben vorzuspannen, würde die größten Nachteile von FVK-Bewehrung, nämlich die großen Auslenkungen und großen Rissbreiten gegenüber Stahlbewehrung,

sofern keine speziellen Maßnahmen getroffen werden, stark vermindern und diese Konstruktionsmethode wirtschaftlich interessant machen.

Um die Berechnungsergebnisse besser bewerten zu können wäre auch eine genauere Betrachtung des Verbunds mit dreidimensionalen FE-Modellen, besserer Auflösung und exakteren Materialmodellen (Abbildung 7-1) ein interessantes Gebiet für weitere Forschung.



## Literaturverzeichnis

- [1] H. V. S. GangaRao, N. Taly und P. V. Vijay, *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [2] A. Nanni, A. De Luca und H. J. Zadeh, *Reinforced Concrete with FRP Bars*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [3] A. Pritschow, „Dissertation: Zum Verbundverhalten von CFK-Bewehrungsstäben in Bauteilen aus ultrahochfestem Beton,“ Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [4] S. Ortlepp, K. Zernsdorf, F. Schladitz und T. Bösche, „Stabbewehrung aus Carbonfaserverstärktem Beton (CFB) für den Betonbau,“ *Beton und Stahlbetonbau*, Bd. 7, Nr. 113, pp. 551-557, 2018.
- [5] A. Stark und J. Hegger, „Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrung in UHPFRC,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 10, Nr. 108, pp. 701-710, 2013.
- [6] F. Leonhardt und E. Mönning, *Vorlesungen über Massivbau - Teil 1 Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau*, Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [7] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, *Ultra-High Performance Concrete UHPC - Fundamentals, Design, Examples*, Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- [8] AVK - Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V., *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*, 4. Auflage Hrsg., A. - I. v. K. e.V., Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [9] H. Schürman, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Darmstadt: Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [10] H. H. Abrishani und D. Mitchell, „Analysis of Bond Stress Distributions in Pullout Specimens,“ *Journal of Structural Engineering*, pp. 255-261, 1996.
- [11] G. Rehm, „Über die Grundlagen des Verbunds zwischen Stahl und Beton,“ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, München, 1961.
- [12] M. Schlaich, B. Zwingmann, Y. Liu und R. Goller, „Zugelemente aus CFK und ihre Verankerungen,“ *Bautechnik* 89, Nr. Heft 12, pp. 841-850, 2012.
- [13] J. Hegger und G. Bertram, „Verbundverhalten von vorgespannten Litzen in UHPC Teil 1: Versuche zur Verbundfestigkeit und zur Übertragungslänge,“ *Beton- und Stahlbetonbau* 105, Nr. Heft 6, pp. 379-389, 2010.
- [14] G. Bertram und J. Hegger, „Verbundverhalten von vorgespannten Litzen in UHPC Teil 2: Ableitung eines Verbundmodells zur Berechnung der Übertragungslänge,“ *Beton- und Stahlbetonbau* 107, Nr. Heft 1, pp. 23-31, 2012.
- [15] P. Preinstorfer, B. Kromoser und J. Kollegger, „Development of prestressed T-beams made of textile reinforced UHPC,“ in *39th IABSE Symposium – Engineering the Future*, Vancouver, 2017.

- [16] M. Henke und O. Fischer, „Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke,“ *Leicht bauen mit Beton - Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 Förderphase 1*, pp. 48-59, 2014.
- [17] G. Wypych, „EP - epoxy resin,“ in *Handbook of Polymers*, ChemTec Publishing, 2016, pp. 117-121.
- [18] A. Windisch, „A modified Pull-Out Test and new evaluation methods for a more real bond-slip relationship,“ in *Materials and Structures*, Bordas-Gauthier-Villars, 1985, pp. 181-184.
- [19] N. Markunovic, „Diplomarbeit: Untersuchungen zum Vorspannen filigraner UHPC-Bauteile mit CFK-Stäben,“ TU Wien - Institut für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau, Wien, 2017.
- [20] B. Kromoser, P. Preinstorfer und J. Kollegger, „Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components,“ *Structural Concrete*, pp. 730-744, April 2019.
- [21] V. Červenka, L. Jendele und J. Červenka, „ATENA Program Documentation Part 1 - Theory,“ Červenka Consulting s.r.o., Prag, 2018.

## Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1-1: CFK-Stäbe mit aufgeklebtem Filamentgarn von S&P (links) und CFK-Bewehrungsstäbe C4R mit eingefräster Wendel von ThyssenKrupp (rechts) .....	7
Abbildung 2-1: Arbeitslinien unterschiedlich fester Betone [7] [6] .....	9
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des Strangzieh- oder Pultrusionsverfahrens [8] [1] .....	12
Abbildung 3-1: Verwendete Abmessungen an gerippten Stahlstäben und Bruchflächen bei verschiedenen bezogenen Rippenflächen nach [11], [6] .....	17
Abbildung 3-2: Scherkräfte an der Mantelfläche des Nettoquerschnitts in einem eingefrästen Stab. 19	
Abbildung 3-3: Vergleich verschiedener Prüfkörper für Ausziehversuche [6] [11].....	20
Abbildung 4-1: Beispiel eines verwendeten FE-Modells in ATENA 2D.....	21
Abbildung 4-2: Biaxiale Spannungs-Hüllkurve des ATENA Sbeta2-Materialmodells .....	24
Abbildung 4-3: Ansicht des geteilten CFK-Zahns und der als Polygon approximierten Einfräsung .....	26
Abbildung 4-4: Verwendete Abmessungen an Stäben mit eingefräster Wendel .....	29
Abbildung 4-5: Beispiel eines Modells mit einer Einzelkerbe .....	29
Abbildung 4-6: Beispiel eines Modells mit einem Einzelzahn .....	30
Abbildung 4-7: Verlauf der äquivalenten mittleren Verbundspannung bei Erreichen der Zugtragfähigkeit des Kernquerschnitts des Stabs .....	32
Abbildung 4-8: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 10°.....	35
Abbildung 4-9: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 15°.....	35
Abbildung 4-10: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 20°.....	36
Abbildung 4-11: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 30°.....	36
Abbildung 4-12: Ergebnisse für die berechnete maximale Verbundspannung für eine Wendelsteigung von 45°.....	37
Abbildung 4-13: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite parallel zur Stabachse zur Kerbtiefe.....	37
Abbildung 4-14: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite parallel zur Stabachse zur Ganghöhe der Wendel.....	38
Abbildung 4-15: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite .....	38
Abbildung 4-16: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbtiefe .....	38
Abbildung 4-17: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite parallel zur Stabachse.....	39
Abbildung 4-18: Vergleich der berechneten maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Zahnbreite parallel zur Stabachse zur Kerbtiefe .....	39
Abbildung 4-19: Berechnungsergebnis für einen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser .....	39
Abbildung 4-20: Minimale Hauptspannungen beim Erreichen der maximalen Last für den C4R-Stab [MPa] .....	40
Abbildung 4-21: Vergleich des berechneten Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für einen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser mit den Herstellerangaben für den C4R-Stab und dessen Marktbegleiter .....	40

Abbildung 4-22: Vergleich der maximal möglichen mittleren Verbundspannungen aufgrund der Tragfähigkeit des Stabnettoquerschnitts und verschiedener Scherfestigkeiten bei kleiner werdender Mantelfläche des Kernquerschnitts .....	41
Abbildung 4-23: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 2 [MPa] .....	42
Abbildung 4-24: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 2 (hier bezeichnet als „Polygon B4,0 T0,5 Bt0,2 15° 1W“) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15], [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser.....	43
Abbildung 4-25: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 3 [MPa] .....	43
Abbildung 4-26: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 3 (hier bezeichnet als „Polygon B6,0 T0,75 Bt0,2 15° 1W“) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15], [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser.....	44
Abbildung 4-27: Minimale Hauptspannungen bei Erreichen der maximalen Last für den Stab der Variante 1 .....	44
Abbildung 4-28: Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Kurve für den Stab der Variante 1 (hier als „Polygon B4,0 T0,5 Bt0,2 20° 1W“ bezeichnet) mit berechneten, aber an Versuchsergebnisse angepassten Kurven für die glatten und besandeten Stäbe aus [15] und [19] sowie der berechneten Kurve für einen Thyssen C4R-Stab mit 8 mm Durchmesser.....	45
Abbildung 5-1: Führungsrohre mit Stift für die Herstellung der gewendelten CFK-Stäbe.....	46
Abbildung 5-2: Gewendelte C4R-Stäbe der Firma Thyssen (oben) und beklebte Stäbe der Firma S&P (unten).....	46
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der verwendeten Fräsvorrichtung für die Stäbe der ersten Versuchsreihe.....	47
Abbildung 5-4: Vergleich des benutzten Fräskopfes mit 10 mm Durchmesser (jeweils links) mit dem benutzen 7,8 mm-Fräskopf (jeweils in der Mitte) und einem neuen 7,8 mm Fräskopfs(jeweils rechts) .....	47
Abbildung 5-5: Hergestellte gewendelte Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 10 mm Durchmesser gefräst (links), einer Wendelsteigung von 20° und dem Fräskopf mit 7,8 mm Durchmesser gefräst (Mitte) und einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 7,8 mm Durchmesser gefräst (rechts) .....	48
Abbildung 5-6: Schalung mit eingebautem Stab für die erste Versuchsreihe .....	49
Abbildung 5-7: Zwangsmischer des Instituts für Werkstofftechnologie der TU Wien (links) und die ausgeschalteten Prüfkörper im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen .....	49
Abbildung 5-8: Aufgewölbte Oberseite der Prüfkörper (links) durch Gasblasenbildung an den Isolierrohren aus Aluminium und ein aufgeschnittener Prüfkörper mit mehreren sichtbaren Blasen über dem Isolierrohr (rechts) .....	50
Abbildung 5-9: Versuchsaufbau für die erste Versuchsreihe.....	52
Abbildung 5-10: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 1-6 der ersten Versuchsreihe.....	53
Abbildung 5-11: Zerdrücktes Zugende des CFK-Stabs in Versuchskörper 6.....	54
Abbildung 5-12: Gespaltener Prüfkörper 3 (oben) und beschädigter Stab 3 (unten) nach dem Versuch .....	54
Abbildung 5-13: Gespaltener Prüfkörper 4 mit großen Gasblasen (oben) und beschädigter Stab 4 (unten) nach dem Versuch .....	55

Abbildung 5-14: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 7-12 der ersten Versuchsreihe .....	55
Abbildung 5-15: Spaltriss in Prüfkörper 7 nach dem Versuch (links) und der nahezu unbeschädigte CFK-Stab im Inneren (rechts).....	56
Abbildung 5-16: Nachträglich gespaltener Prüfkörper 9 mit abgescherten Stabrippen.....	57
Abbildung 5-17: Im Versuch gespaltener Prüfkörper 10 mit abgescherten Rippen .....	57
Abbildung 5-18: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 13-18 der ersten Versuchsreihe .....	58
Abbildung 5-19: Bruchfläche des Prüfkörpers 13 (oben) und beschädigter Stab 13 (unten) .....	59
Abbildung 5-20: Vollständig abgescherte Stabrippen in Prüfkörper 14.....	59
Abbildung 5-21: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 20 und 21 der ersten Versuchsreihe.....	60
Abbildung 5-22: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper T1 bis T3 der ersten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich .....	61
Abbildung 5-23: Spaltrisse im Prüfkörper T1 (links) und nahezu unbeschädigter Stab im Inneren (rechts) .....	61
Abbildung 5-24: Zerdrücktes Zugende (oben) und teilweise abgescherte Rippe am Verbundene (unten) des Stabs in Prüfkörper T3 .....	62
Abbildung 5-25: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven für verschiedene Stabtypen in der ersten Versuchsreihe .....	62
Abbildung 5-26: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Kerbenanteil.....	63
Abbildung 5-27: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Kerbenbreite längs zur Kerbtiefe .....	63
Abbildung 5-28: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zum Verhältnis von Zahnbreite längs zur Kerbtiefe.....	63
Abbildung 5-29: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite .....	63
Abbildung 5-30: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbtiefe .....	63
Abbildung 5-31: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung zur Kerbenbreite längs.....	63
Abbildung 5-32: Gefräste Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und dem Fräskopf mit 6,0 mm Durchmesser gefräst (links), einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 6,0 mm Durchmesser gefräst (Mitte) und einer Wendelsteigung von 15° und dem Fräskopf mit 10 mm Durchmesser gefräst (rechts).....	64
Abbildung 5-33: Schalung mit eingebautem Stab für die zweite Versuchsreihe.....	66
Abbildung 5-34: Prüfkörper 24 Stunden nach dem Betonieren (links) und nach dem Ausschalen (rechts) .....	68
Abbildung 5-35: Versuchsaufbau für die zweite Versuchsreihe .....	69
Abbildung 5-36: Zerdrücktes, gespaltene Stabende nach dem ersten Versuch mit Prüfkörper 4, bei dem das Stabende direkt in die Klemmbacken gespannt wurde.....	70
Abbildung 5-37: Zusätzliche Schraubzwingen zur Verhinderung eines Spaltens des Prüfkörpers beispielhaft am Prüfkörper 16 .....	71
Abbildung 5-38: Aus zusammengeschweißten Langmuttern hergestellte Muffe, vor und nach dem Befüllen mit Epoxidharz und im ausgehärteten Zustand .....	72
Abbildung 5-39: Links: Schematische Darstellung der Fischer-Muffe Mitte und rechts: Fotos der Muffe vor und nach dem Anbringen an einen Stab.....	73
Abbildung 5-40: Hochfeste Schraube als schlankere Verlängerung der Muffe zwischen den Klemmbacken.....	74

Abbildung 5-41: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 1 bis 3 der zweiten Versuchsreihe.....	75
Abbildung 5-42: Versuchskörper 1 mit ausgezogenem Stab nach dem ersten Versuch .....	75
Abbildung 5-43: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 4 bis 8 der zweiten Versuchsreihe.....	76
Abbildung 5-44: Prüfkörper 4 mit Spaltrissen und Abplatzungen nach dem ersten Versuch (links) und die abgescherte Wendel im Inneren nach dem Aufbrechen des Prüfkörpers nach dem zweiten Versuch (rechts) .....	77
Abbildung 5-45: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 9 bis 13 der zweiten Versuchsreihe.....	77
Abbildung 5-46: Abgescherter Stabwendel bei Prüfkörper 12 .....	78
Abbildung 5-47: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 14 bis 18 der zweiten Versuchsreihe.....	79
Abbildung 5-48: Abgescherte Wendel des Stabs in Prüfkörper 14 mit einem unbeschädigten Stab zum Vergleich.....	80
Abbildung 5-49: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 19 bis 21 der zweiten Versuchsreihe.....	80
Abbildung 5-50: Abgelöste und am oberen Ende der Verbundlänge abgerissene Rippe am Stab in Prüfkörper 21 .....	81
Abbildung 5-51: Vergleich der Rippen in der Verbundlänge der Stäbe 19 (oben), 20 (Mitte) und 21 (unten).....	82
Abbildung 5-52: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich.....	82
Abbildung 5-53: Schräggestellte Aufsatzklemme für den oberen Stab-Wegaufnehmer durch die Drehung des Stabs beim Spalten des Prüfkörpers 22 .....	83
Abbildung 5-54: Nahezu unbeschädigter Stab und intakte Betonkonsolen im Inneren des beim Versuch gespaltenen Prüfkörpers 22 .....	84
Abbildung 5-55: Abgescherte erste Rippe des Stabs in Prüfkörper 23 mit unbeschädigtem Stab zum Vergleich.....	84
Abbildung 5-56: Verbundspannungsdiagramm für den Versuchskörper 23 der zweiten Versuchsreihe für den ersten und zweiten Versuch mit dem Schlupf an der Zugseite zum Vergleich .....	85
Abbildung 5-57: Verbundspannungsdiagramm für die Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit einem Versatz der Kurve für Versuchskörper 23 um -0,3 mm Schlupf.....	86
Abbildung 5-58: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit einem Versatz der Kurve von Versuchskörper 23 um -0,3 mm Schlupf.....	86
Abbildung 5-59: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der Versuchskörper 22 bis 24 der zweiten Versuchsreihe mit Herstellerangaben zum Vergleich.....	87
Abbildung 5-60: Verbundspannungsdiagramm mit mittleren Versuchskurven der verschiedenen Stabtypen der zweiten Versuchsreihe.....	88
Abbildung 5-61: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Kerbenanteil .....	89
Abbildung 5-62: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Verhältnis von Kerbenbreite längs zur Kerbtiefe .....	89
Abbildung 5-63: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit dem Verhältnis von Zahnbreite längs zur Kerbtiefe .....	89
Abbildung 5-64: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbenbreite .....	89

Abbildung 5-65: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbentiefe..... 89

Abbildung 5-66: Vergleich der maximalen mittleren Verbundspannung mit der Kerbenbreite längs . 89

Abbildung 6-1: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für glatte Stäbe, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]..... 91

Abbildung 6-2: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 92

Abbildung 6-3: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 93

Abbildung 6-4: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 94

Abbildung 6-5: Vergleich der mittleren Verbundkurven für Stäbe mit einer aufgeklebten Rippe mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]..... 95

Abbildung 6-6: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für C4R-Stäbe, mit Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]..... 96

Abbildung 6-7: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 97

Abbildung 6-8: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 98

Abbildung 6-9: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung mit den Berechnungsergebnissen der ähnlichsten modellierten Stäbe und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 99

Abbildung 6-10: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für die C4R-Stäbe dem Berechnungsergebnis des modellierten C4R-Stabs und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15] ..... 101

Abbildung 6-11: Vergleich der mittleren Verbundkurven der beiden Versuchsreihen für die C4R-Stäbe dem Berechnungsergebnis des modellierten C4R-Stabs mit einem Durchmesser von 8 mm, den ähnlichsten modellierten Stäben zu einer direkten Skalierung des C4R-Stabs mit einem Durchmesser von 10 mm und Referenzkurven für glatte und besandete Stäbe aus [19] und [15]..... 102

Abbildung 7-1: Minimale Hauptspannungen rund um einen gewendelten CFK-Stab in einem UHPC-Prüfkörper, der zu Testzwecken in ABAQUS modelliert wurde ..... 104

Tabelle 2-1: Herstellerangaben zu verschiedenen Fasertypen aus [9] ..... 12

Tabelle 2-2: Typische Eigenschaften von FVK-Stäben, aus [2] ..... 13

Tabelle 2-3: Kennwerte für eine unidirektionale Einzelschicht für typische Verbundwerkstoffe, aus [8] ..... 13

Tabelle 2-4: Rechenwerte für Grund-Elastizitätsgrößen von unidirektionalen Schichten, aus [9] ..... 14

Tabelle 3-1: Materialparameter für Epoxidharz..... 18

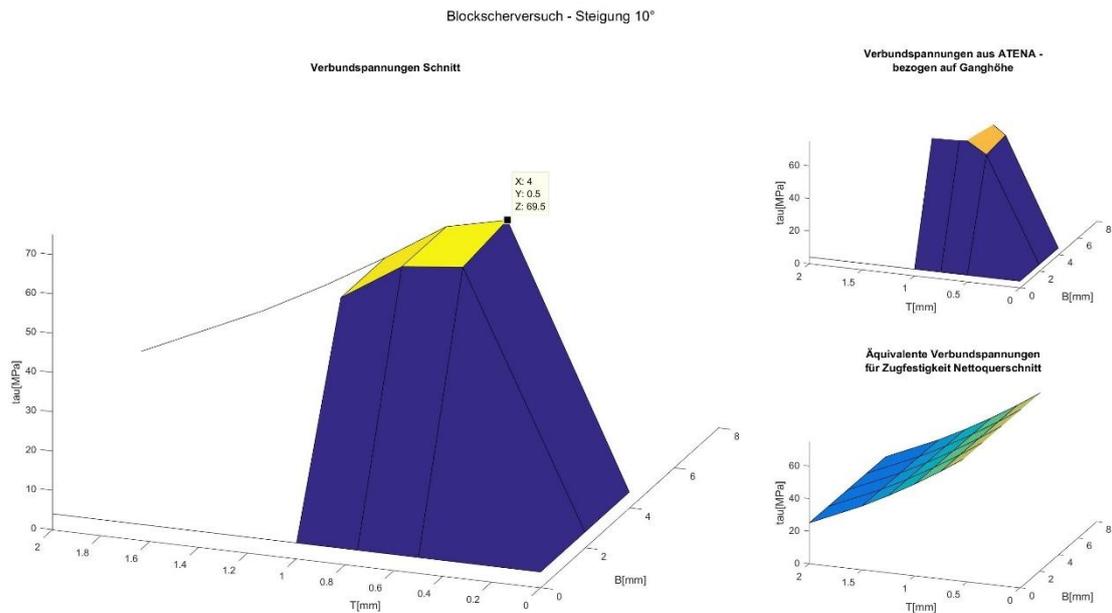
Tabelle 4-1: Zusammensetzung des verwendeten UHPC [20] .....	22
Tabelle 4-2: Modellparameter für UHPC in ATENA.....	23
Tabelle 4-3: Modellparameter für CFK (längs) in ATENA .....	24
Tabelle 4-4: Modellparameter für das Interface zwischen CFK und CFK in ATENA .....	25
Tabelle 4-5: Modellparameter für CFK (quer) in ATENA .....	26
Tabelle 4-6: Modellparameter für das Interface zwischen CFK und UHPC in ATENA .....	27
Tabelle 4-7: Modellparameter für Stahl in ATENA.....	28
Tabelle 4-8: Modellparameter für das Interface zwischen Beton und Stahl in ATENA.....	28
Tabelle 4-9: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 10° .....	30
Tabelle 4-10: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 15° .....	31
Tabelle 4-11: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 20° .....	31
Tabelle 4-12: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 30° .....	31
Tabelle 4-13: Maximale mittlere Verbundspannungen aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 45° .....	32
Tabelle 4-14: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest- Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 10° .....	33
Tabelle 4-15: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest- Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 15° .....	33
Tabelle 4-16: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 20° .....	33
Tabelle 4-17: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest- Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 30° .....	34
Tabelle 4-18: Minimum der maximalen äquivalenten mittleren Verbundspannungen für die Rest- Zugtragfähigkeit des Stabs und der Ergebnisse aus den ATENA-Modellen für eine Wendelsteigung von 45° .....	34
Tabelle 4-19: Ausgewählte Wendelgeometrien für die Ausziehversuche .....	42
Tabelle 5-1: Gemessene Wendelabmessungen der verwendeten Stäbe (*aus Wendelabmessungen rückgerechnet) .....	48
Tabelle 5-2: Mittlere Materialkennwerte aus der Prüfung des UHPC für die erste Versuchsreihe.....	51
Tabelle 5-3: Maximale mittlere Verbundspannungen aus der ersten Versuchsreihe .....	53
Tabelle 5-4: Gemessene Wendelabmessungen der verwendeten Stäbe (*aus Wendelabmessungen rückgerechnet) .....	65
Tabelle 5-5: Alter der Prüfkörper bei der Versuchsdurchführung .....	67
Tabelle 5-6: Mittlere Materialkennwerte aus der Prüfung des UHPC für die zweite Versuchsreihe ...	68
Tabelle 5-7: Maximale mittlere Verbundspannungen aus der zweiten Versuchsreihe .....	74
Tabelle 6-1: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 20° und der jeweils kleineren Fräsung .....	97
Tabelle 6-2: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils kleineren Fräsung .....	99

Tabelle 6-3: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die Stäbe mit einer Wendelsteigung von 15° und der jeweils größeren Fräsung .....	100
Tabelle 6-4: Abweichungen der Versuchs- von den Berechnungsergebnissen für die C4R Stäbe.....	102

## Anhang A – Ergebnisse der Modellberechnungen für Einzelzähne und Einzelkerben

Ein Vergleich der Höchstwerte der mittleren Verbundspannung für die Modelle der Einzelzähne (hier mit „Blockscherversuch“ betitelt) und Einzelkerben sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die mittleren Verbundspannungen wurden zu Vergleichszwecken sowohl auf die gesamte Stab-Verbundlänge von 40 mm als auch auf die jeweilige Ganghöhe der angenommenen Wendel bezogen.

Die Höchstwerte der mittleren Verbundspannungen sind den nachfolgenden Tabellen aufgelistet.



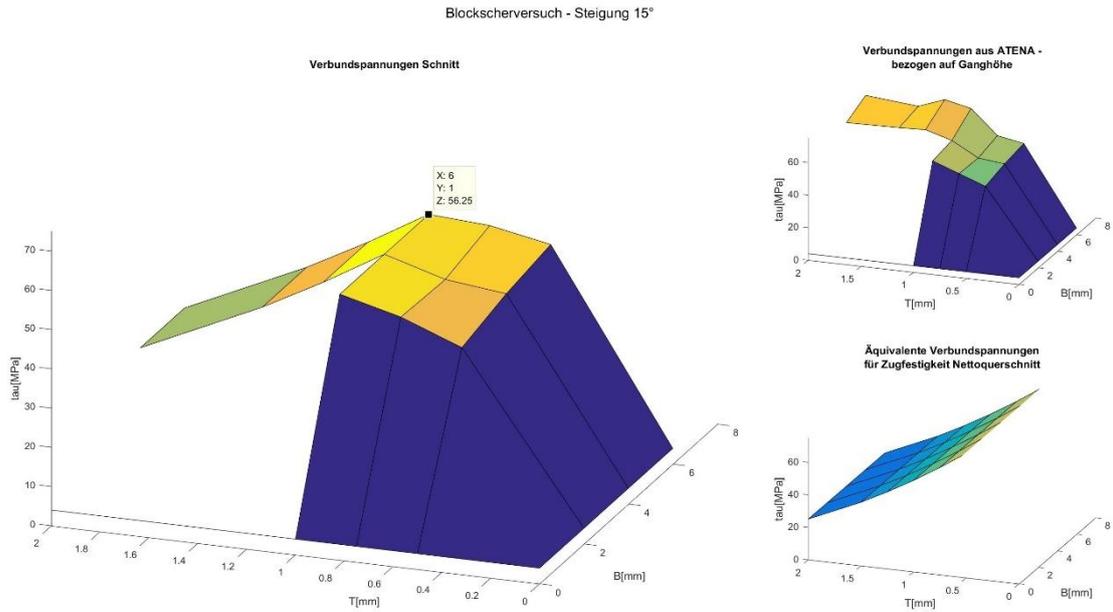


Abbildung A-2: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 15°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel

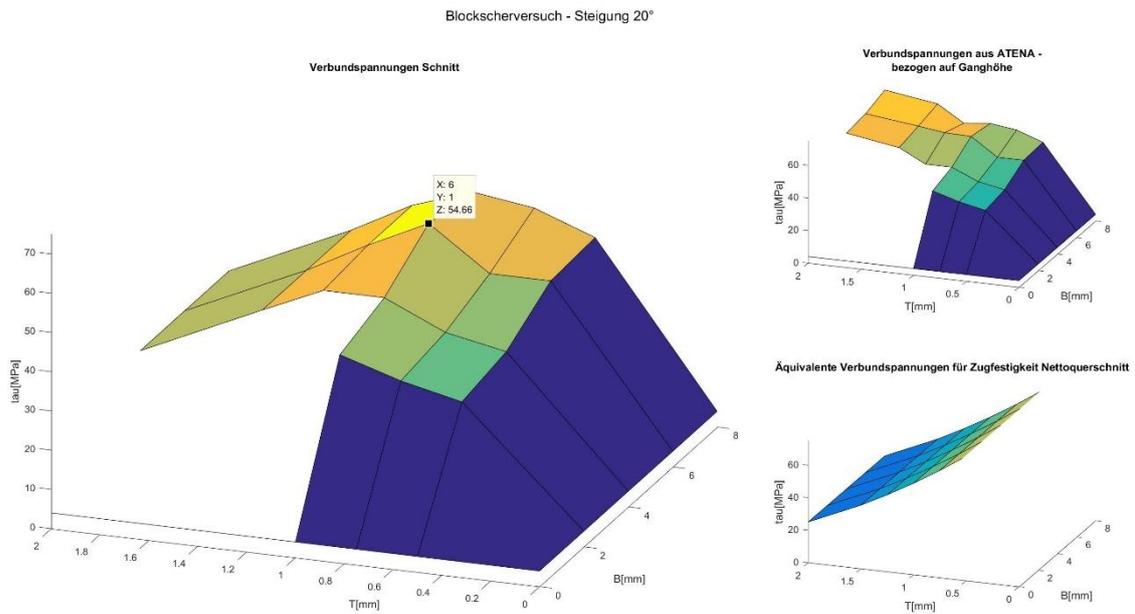


Abbildung A-3: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 20°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel

Blockscherversuch - Steigung 30°

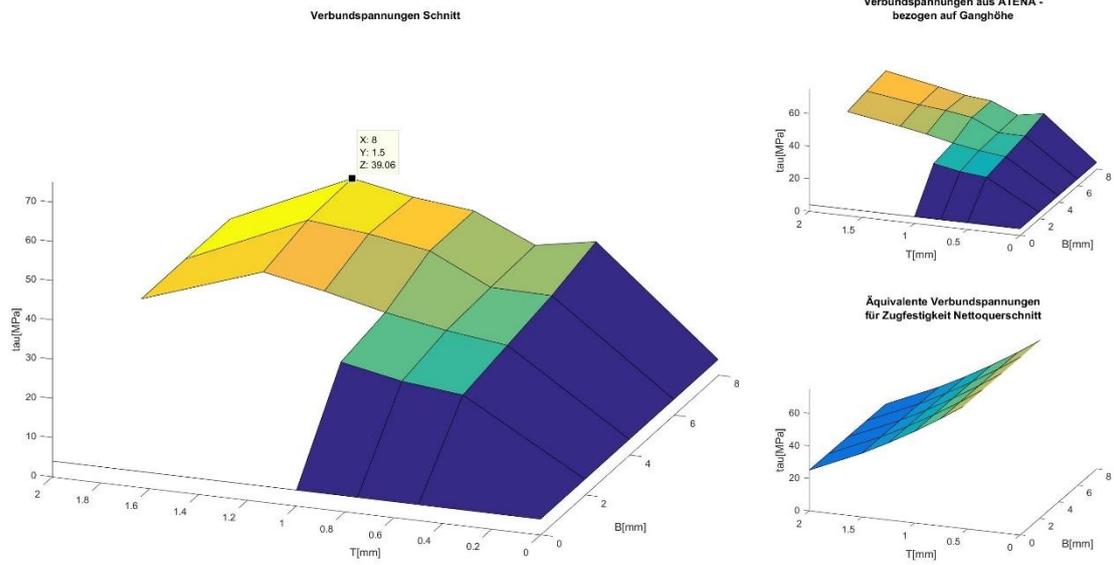


Abbildung A-4: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 30°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel

Blockscherversuch - Steigung 45°

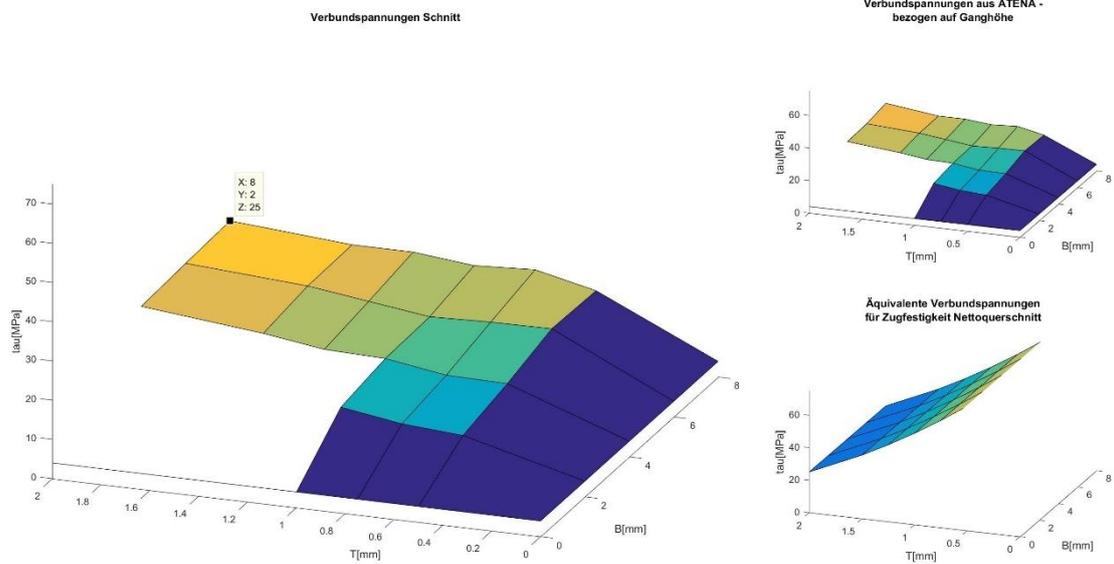


Abbildung A-5: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 45°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel

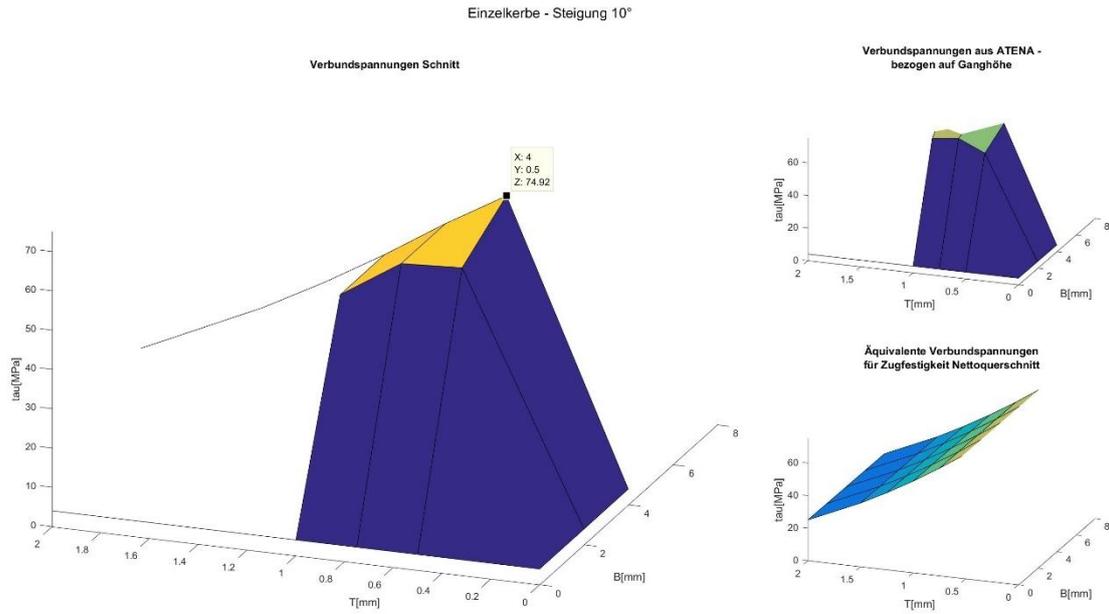


Abbildung A-6: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 10°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel

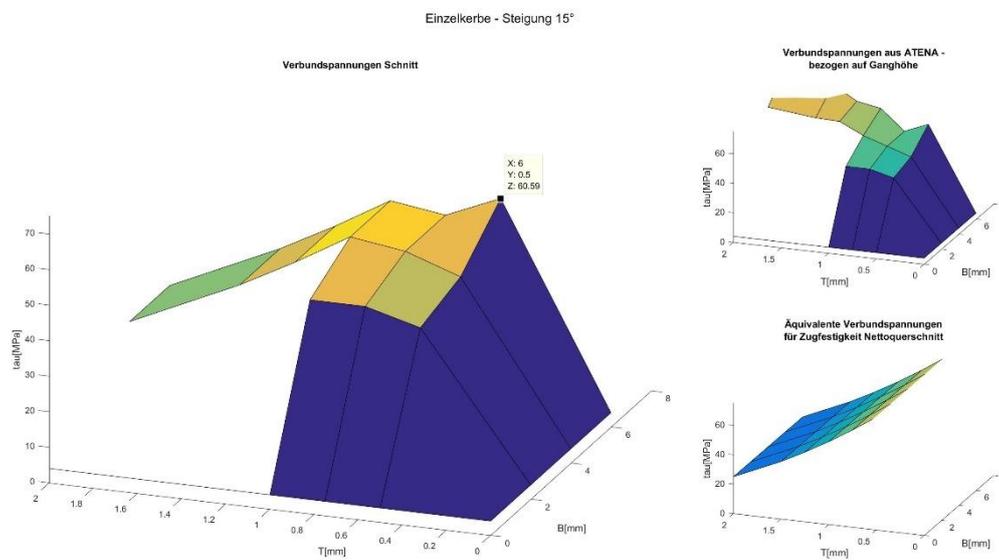
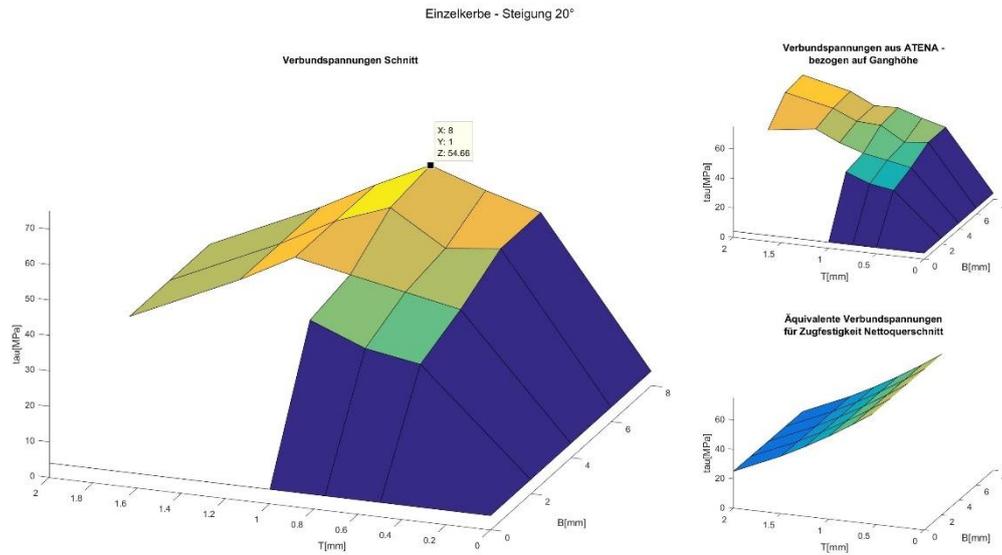
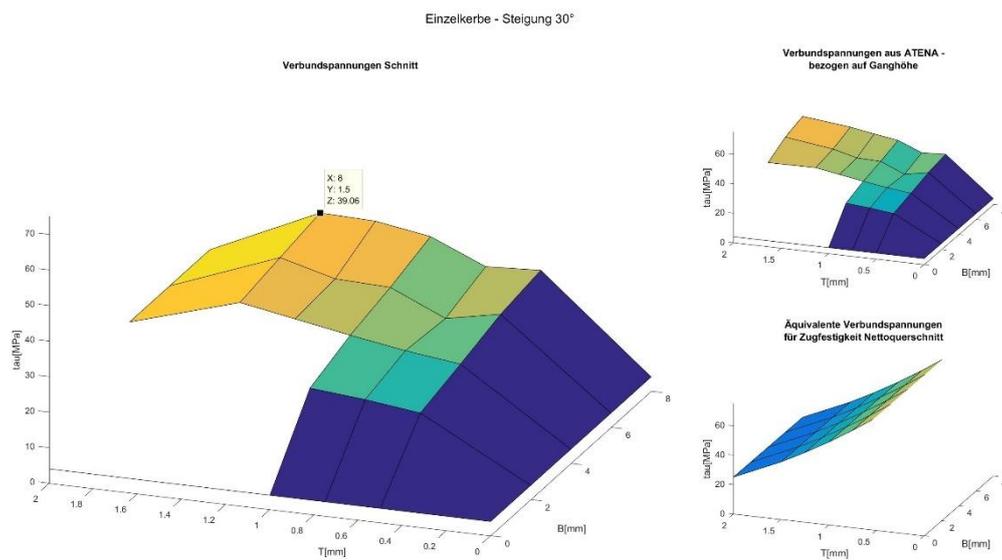


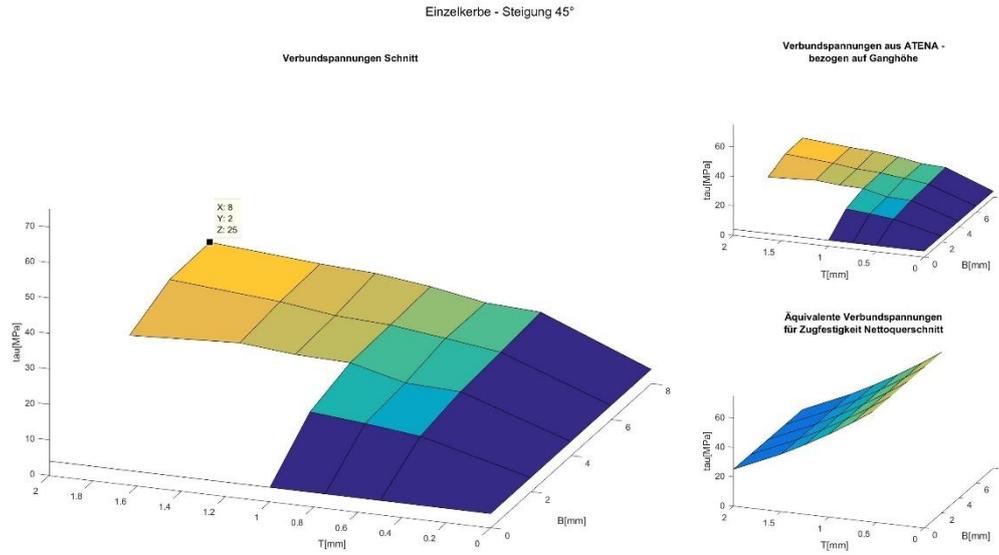
Abbildung A-7: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 15°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel



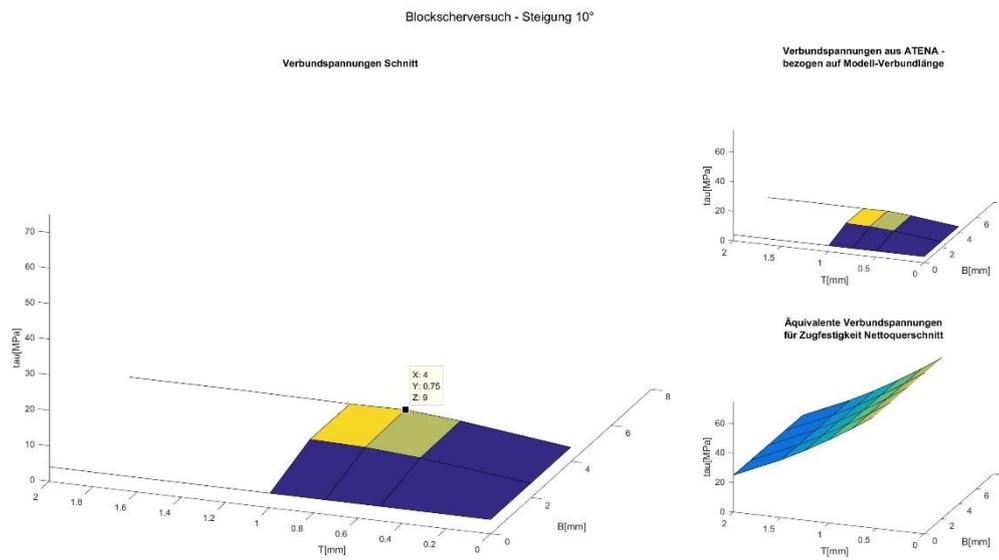
**Abbildung A-8: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 20°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel**



**Abbildung A-9: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 30°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel**

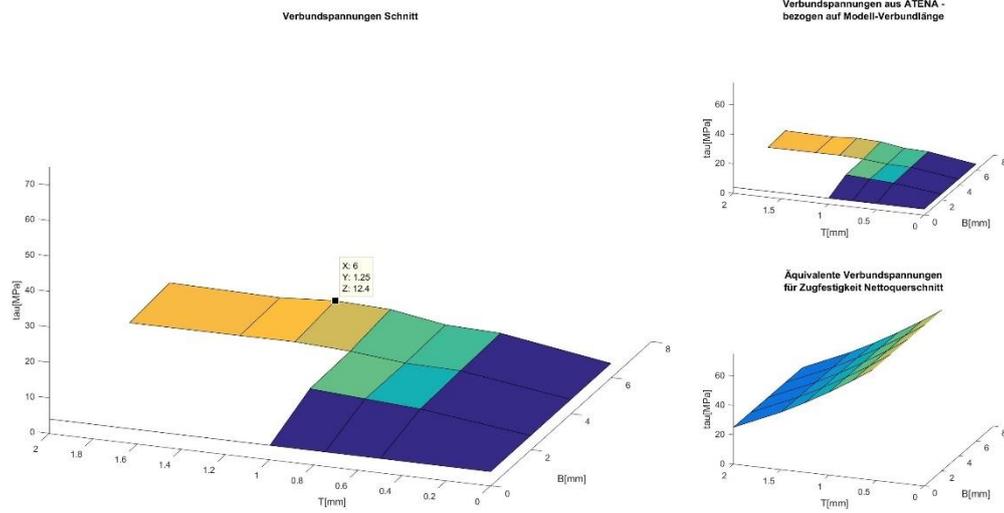


**Abbildung A-10: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 45°, bezogen auf die Ganghöhe der Wendel**



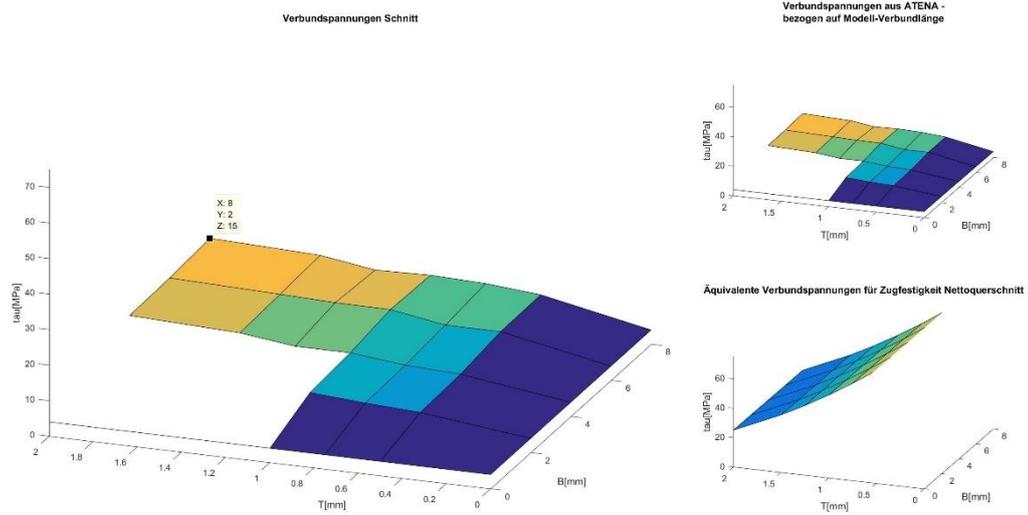
**Abbildung A-11: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 10°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

Blockscherversuch - Steigung 15°

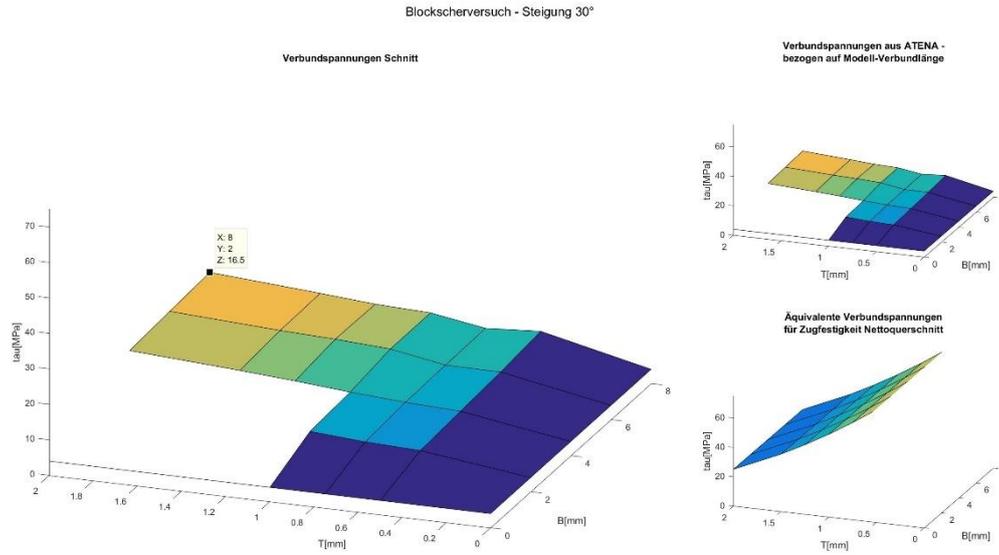


**Abbildung A-12: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 15°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

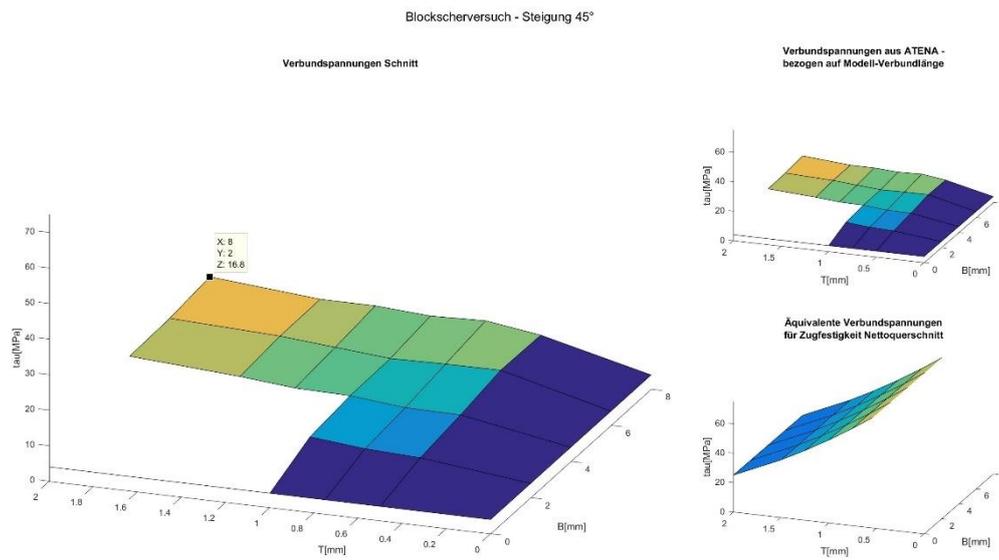
Blockscherversuch - Steigung 20°



**Abbildung A-13: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 20°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**



**Abbildung A-14: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 30°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**



**Abbildung A-15: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 45°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

Einzelkerbe - Steigung 10°

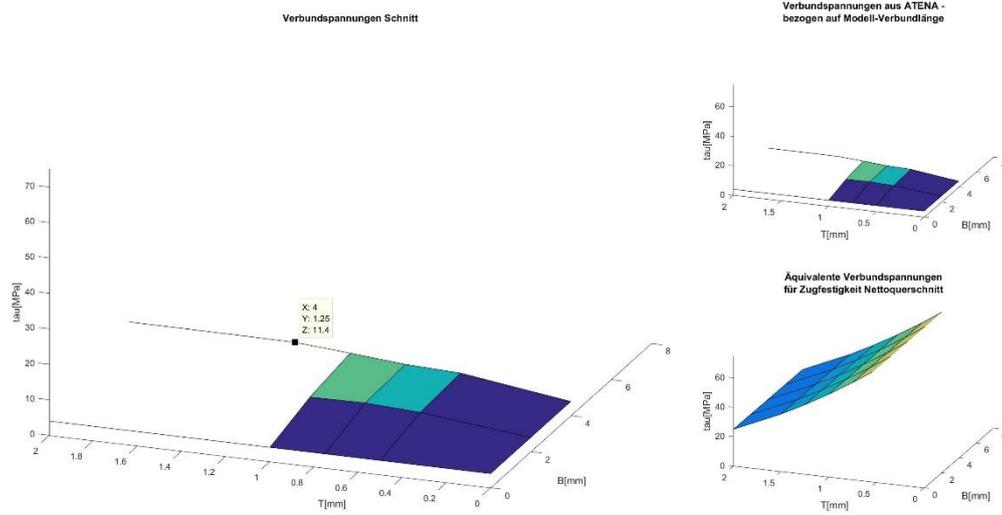


Abbildung A-16: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 10°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm

Einzelkerbe - Steigung 15°

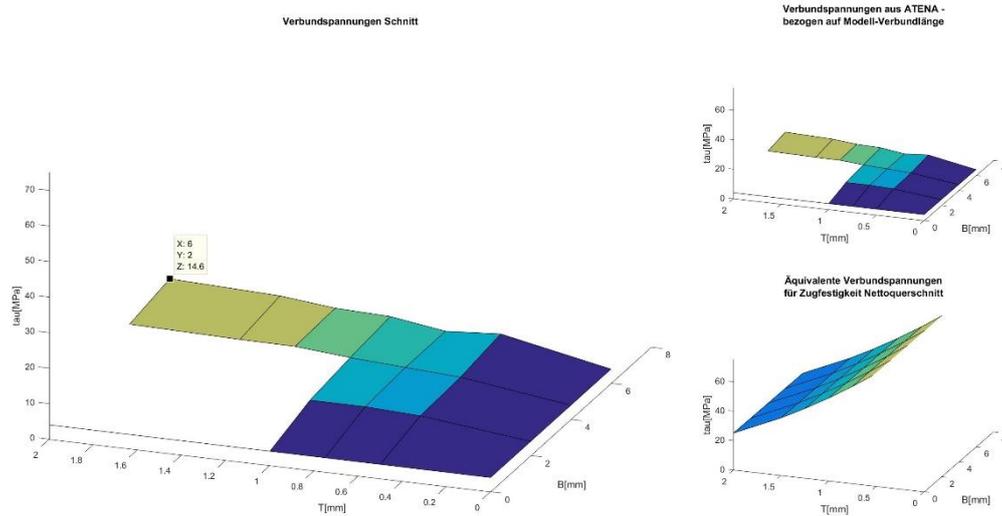
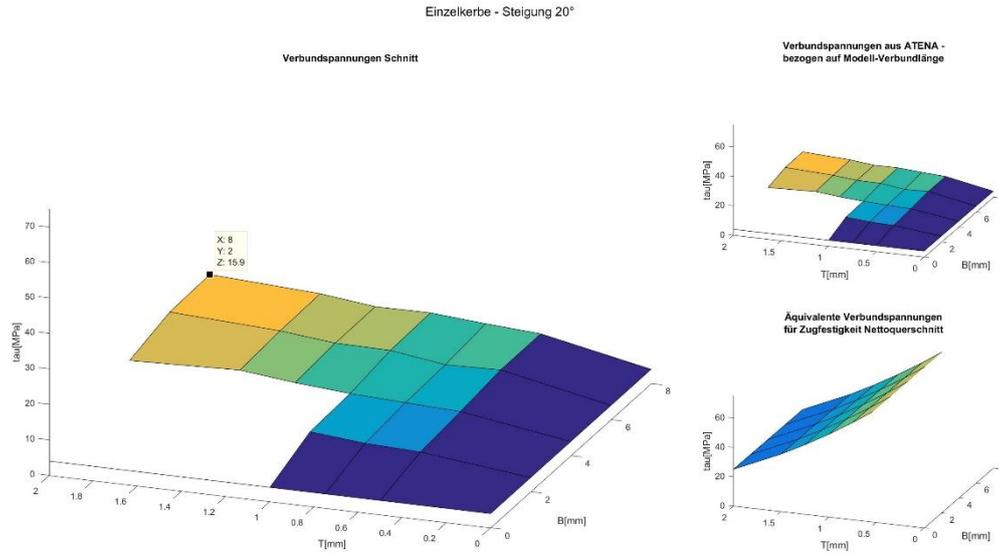
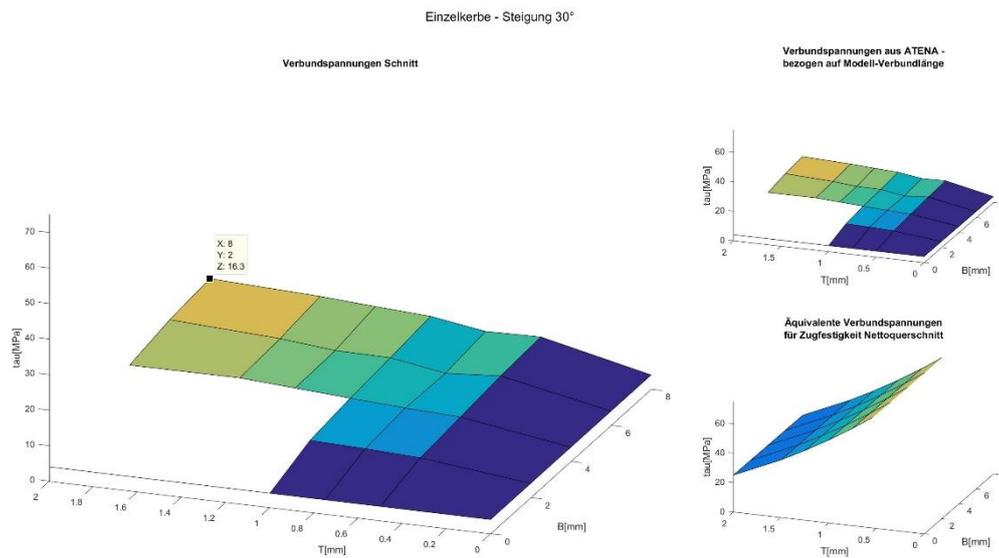


Abbildung A-17: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 15°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm

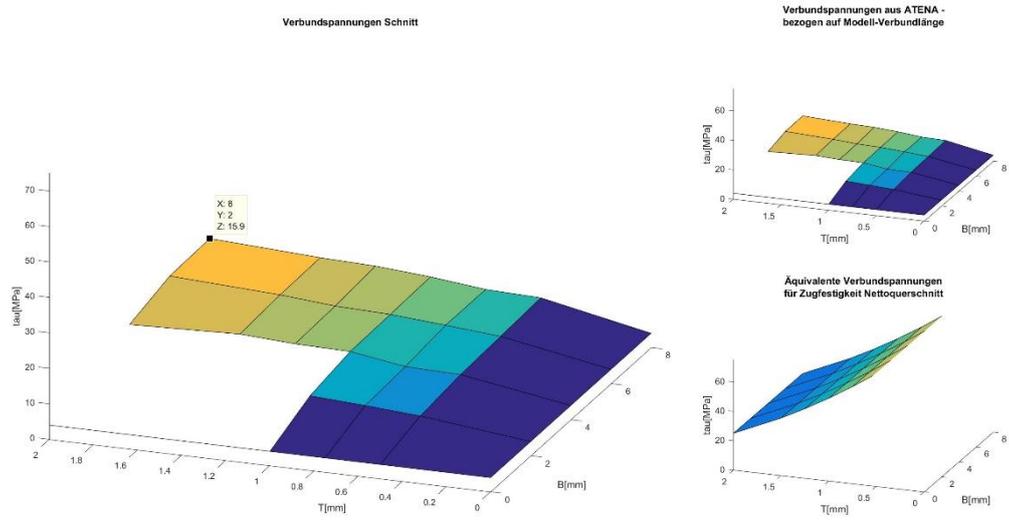


**Abbildung A-18: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 20°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**



**Abbildung A-19: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 30°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

Einzelkerbe - Steigung 45°



**Abbildung A-20: Vergleich der berechneten maximalen Verbundspannung für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 45°, bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

**Maximale mittlere Verbundspannungen aus den Berechnungsmodellen,  
bezogen auf die Ganghöhe der Wendel**

**Tabelle A-1: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 10°**

10°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	x	x
	0,50	4,00	66,79	74,92	x	x
	0,75	4,00	74,01	80,33	x	x
	1,00	4,00	72,21	92,07	x	x
	1,25	4,00	x	102,90	x	x
	1,50	4,00	x	103,80	x	x
	2,00	4,00	x	104,70	x	x

**Tabelle A-2: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 15°**

15°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	x
	0,50	4,00	44,55	48,71	60,59	x
	0,75	4,00	48,71	54,05	54,05	x
	1,00	4,00	48,71	59,40	67,71	x
	1,25	4,00	x	67,12	70,68	x
	1,50	4,00	x	67,71	80,19	x
	2,00	4,00	x	71,28	86,72	x

**Tabelle A-3: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 20°**

20°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	32,80	38,04	45,04	45,04
	0,75	4,00	35,42	41,10	43,29	49,41
	1,00	4,00	41,54	44,16	52,91	54,66
	1,25	4,00	x	49,41	53,78	54,22
	1,50	4,00	x	56,85	60,78	62,09
	2,00	4,00	x	52,47	67,78	69,53

**Tabelle A-4: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 30°**

30°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	20,67	24,26	28,12	30,32
	0,75	4,00	22,60	26,19	25,09	29,50
	1,00	4,00	23,98	28,67	31,98	36,11
	1,25	4,00	x	31,43	32,53	38,59
	1,50	4,00	x	34,18	36,66	41,35
	2,00	4,00	x	33,91	41,07	44,93

**Tabelle A-5: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 45°**

45°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	11,94	14,32	15,28	16,39
	0,75	4,00	13,69	14,96	17,35	17,19
	1,00	4,00	15,12	18,78	19,26	19,89
	1,25	4,00	x	19,26	20,05	21,80
	1,50	4,00	x	20,69	22,12	22,60
	2,00	4,00	x	19,10	24,67	25,31

**Maximale mittlere Verbundspannungen aus den Berechnungsmodellen,  
bezogen auf die Ganghöhe der Wendel**

**Tabelle A-6: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 10°**

10°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	x	x
	0,50	4,00	67,70	69,50	x	x
	0,75	4,00	77,62	81,24	x	x
	1,00	4,00	81,24	79,43	x	x
	1,25	4,00	x	80,33	x	x
	1,50	4,00	x	81,24	x	x
	2,00	4,00	x	80,33	x	x

**Tabelle A-7: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 15°**

15°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	x
	0,50	4,00	46,33	49,89	52,27	x
	0,75	4,00	52,27	51,68	55,24	x
	1,00	4,00	58,21	60,59	70,09	x
	1,25	4,00	x	65,34	73,65	x
	1,50	4,00	x	64,74	67,71	x
	2,00	4,00	x	64,15	70,68	x

**Tabelle A-8: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 20°**

20°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	33,23	35,86	43,73	44,60
	0,75	4,00	36,73	38,92	43,73	50,29
	1,00	4,00	41,54	45,91	54,66	52,47
	1,25	4,00	x	45,91	55,10	50,72
	1,50	4,00	x	54,22	57,28	60,78
	2,00	4,00	x	59,47	61,22	65,59

**Tabelle A-9: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 30°**

30°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	21,78	24,26	26,74	30,32
	0,75	4,00	23,43	26,19	27,02	27,57
	1,00	4,00	26,46	28,94	34,46	34,46
	1,25	4,00	x	32,53	36,94	36,11
	1,50	4,00	x	35,56	38,59	39,42
	2,00	4,00	x	40,80	43,28	45,48

**Tabelle A-10: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 45°**

45°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	11,94	14,96	18,78	18,30
	0,75	4,00	13,05	15,28	18,62	21,80
	1,00	4,00	15,44	17,67	18,14	21,01
	1,25	4,00	x	18,14	20,21	22,60
	1,50	4,00	x	20,37	22,28	22,60
	2,00	4,00	x	23,55	24,35	26,74

**Maximale mittlere Verbundspannungen aus den Berechnungsmodellen,  
bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

**Tabelle A-11: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 10°**

10°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	x	x
	0,50	4,00	7,40	8,30	x	x
	0,75	4,00	8,20	8,90	x	x
	1,00	4,00	8,00	10,20	x	x
	1,25	4,00	x	11,40	x	x
	1,50	4,00	x	11,50	x	x
	2,00	4,00	x	11,60	x	x

**Tabelle A-12: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 15°**

15°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	x
	0,50	4,00	7,50	8,20	10,20	x
	0,75	4,00	8,20	9,10	9,10	x
	1,00	4,00	8,20	10,00	11,40	x
	1,25	4,00	x	11,30	11,90	x
	1,50	4,00	x	11,40	13,50	x
	2,00	4,00	x	12,00	14,60	x

**Tabelle A-13: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 20°**

20°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,50	8,70	10,30	10,30
	0,75	4,00	8,10	9,40	9,90	11,30
	1,00	4,00	9,50	10,10	12,10	12,50
	1,25	4,00	x	11,30	12,30	12,40
	1,50	4,00	x	13,00	13,90	14,20
	2,00	4,00	x	12,00	15,50	15,90

**Tabelle A-14: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 30°**

30°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,50	8,80	10,20	11,00
	0,75	4,00	8,20	9,50	9,10	10,70
	1,00	4,00	8,70	10,40	11,60	13,10
	1,25	4,00	x	11,40	11,80	14,00
	1,50	4,00	x	12,40	13,30	15,00
	2,00	4,00	x	12,30	14,90	16,30

**Tabelle A-15: Maximale mittlere Verbundspannungen für einen Einzelzahn bei einer Wendelsteigung von 45°**

45°		Breite [mm]				
	$\tau_{max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,50	9,00	9,60	10,30
	0,75	4,00	8,60	9,40	10,90	10,80
	1,00	4,00	9,50	11,80	12,10	12,50
	1,25	4,00	x	12,10	12,60	13,70
	1,50	4,00	x	13,00	13,90	14,20
	2,00	4,00	x	12,00	15,50	15,90

**Maximale mittlere Verbundspannungen aus den Berechnungsmodellen,  
bezogen auf die Gesamtverbundlänge von 40 mm**

**Tabelle A-16: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 10°**

10°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	x	x
	0,50	4,00	7,50	7,70	x	x
	0,75	4,00	8,60	9,00	x	x
	1,00	4,00	9,00	8,80	x	x
	1,25	4,00	x	8,90	x	x
	1,50	4,00	x	9,00	x	x
	2,00	4,00	x	8,90	x	x

**Tabelle A-17: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 15°**

15°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	x
	0,50	4,00	7,80	8,40	8,80	x
	0,75	4,00	8,80	8,70	9,30	x
	1,00	4,00	9,80	10,20	11,80	x
	1,25	4,00	x	11,00	12,40	x
	1,50	4,00	x	10,90	11,40	x
	2,00	4,00	x	10,80	11,90	x

**Tabelle A-18: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 20°**

20°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,60	8,20	10,00	10,20
	0,75	4,00	8,40	8,90	10,00	11,50
	1,00	4,00	9,50	10,50	12,50	12,00
	1,25	4,00	x	10,50	12,60	11,60
	1,50	4,00	x	12,40	13,10	13,90
	2,00	4,00	x	13,60	14,00	15,00

**Tabelle A-19: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 30°**

30°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,90	8,80	9,70	11,00
	0,75	4,00	8,50	9,50	9,80	10,00
	1,00	4,00	9,60	10,50	12,50	12,50
	1,25	4,00	x	11,80	13,40	13,10
	1,50	4,00	x	12,90	14,00	14,30
	2,00	4,00	x	14,80	15,70	16,50

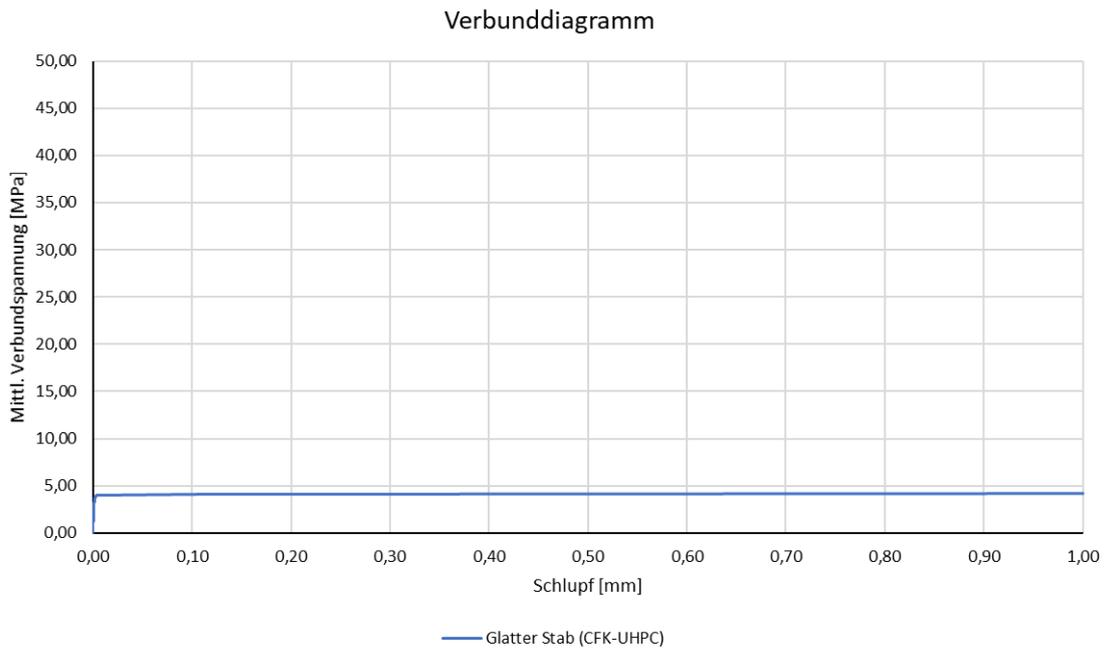
**Tabelle A-20: Maximale mittlere Verbundspannungen für eine Einzelkerbe bei einer Wendelsteigung von 45°**

45°		Breite [mm]				
	$\tau_{\max}$ [Mpa]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
Tiefe [mm]	0,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	0,50	4,00	7,50	9,40	11,80	11,50
	0,75	4,00	8,20	9,60	11,70	13,70
	1,00	4,00	9,70	11,10	11,40	13,20
	1,25	4,00	x	11,40	12,70	14,20
	1,50	4,00	x	12,80	14,00	14,20
	2,00	4,00	x	14,80	15,30	16,80

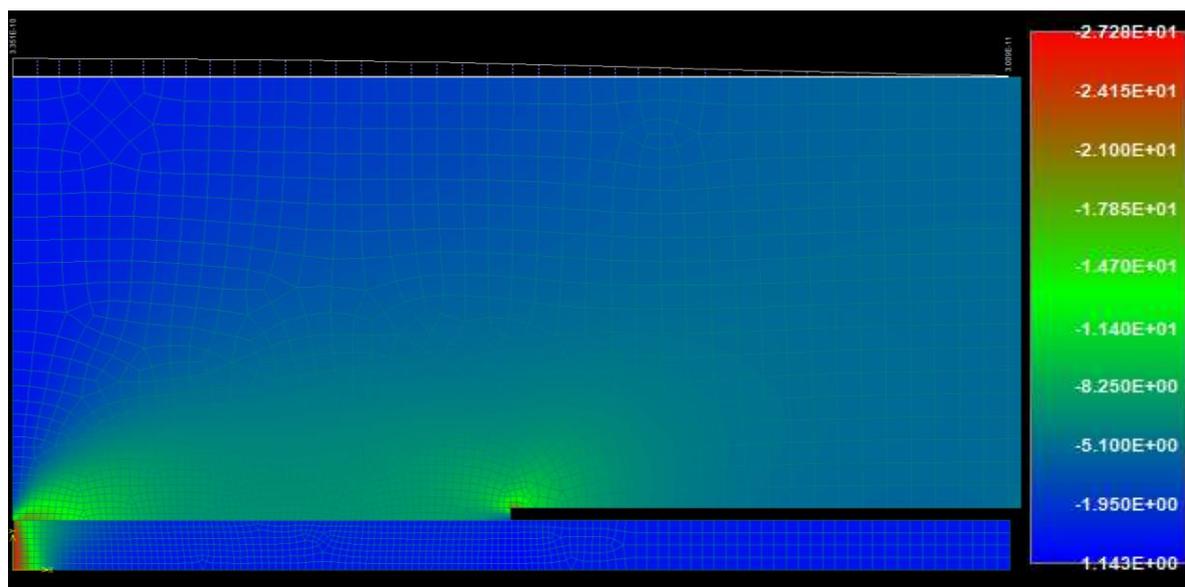
### Anhang B – Berechnungsergebnisse einzeln

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	Glatter Stab
	Kerbenbreite:	0,00 mm
	Kerbentiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>4,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,004 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



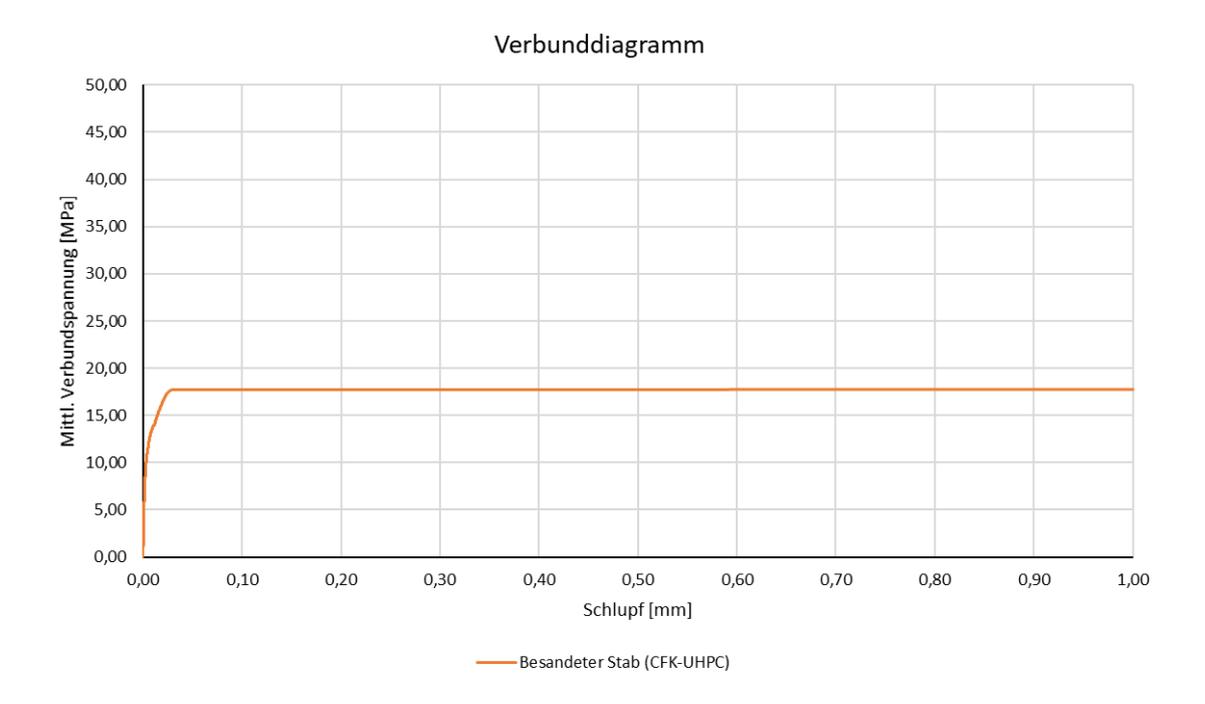
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



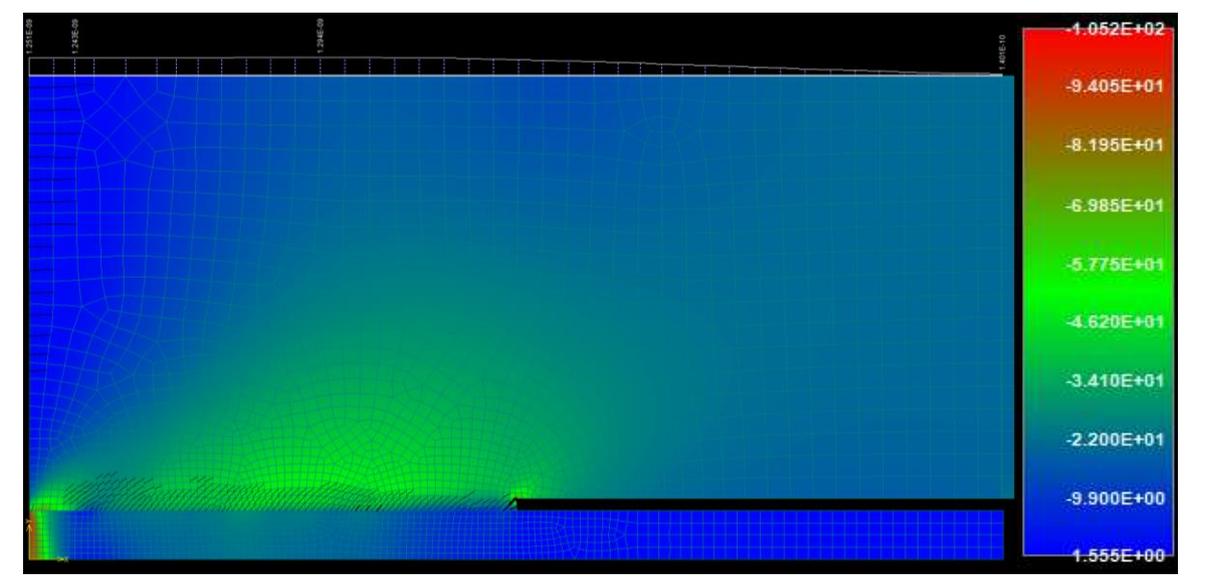
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	Besandeter Stab
	Kerbenbreite:	0,00 mm
	Kerbentiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>17,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,029 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

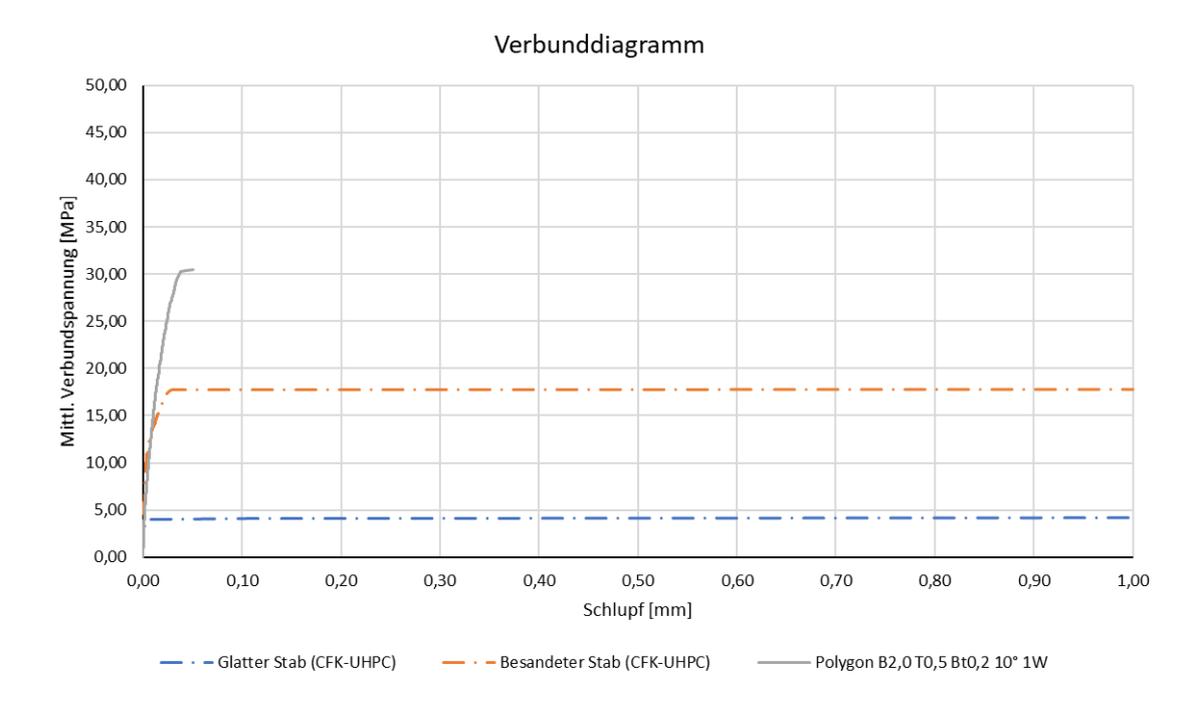


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

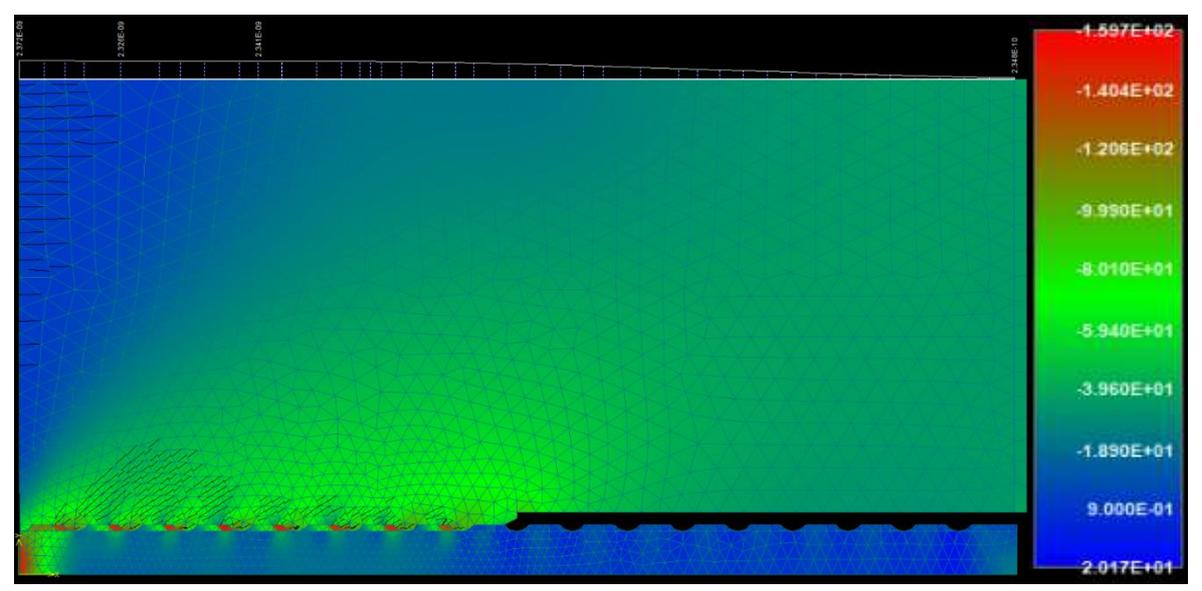


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,051 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

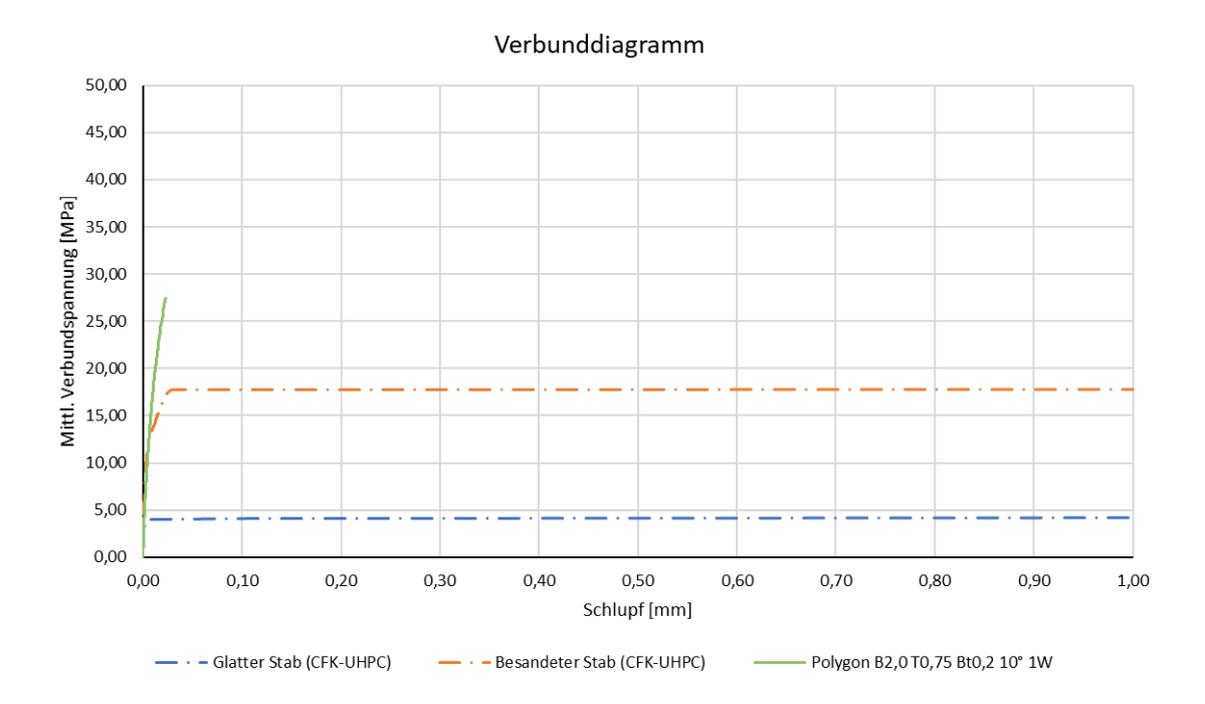


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

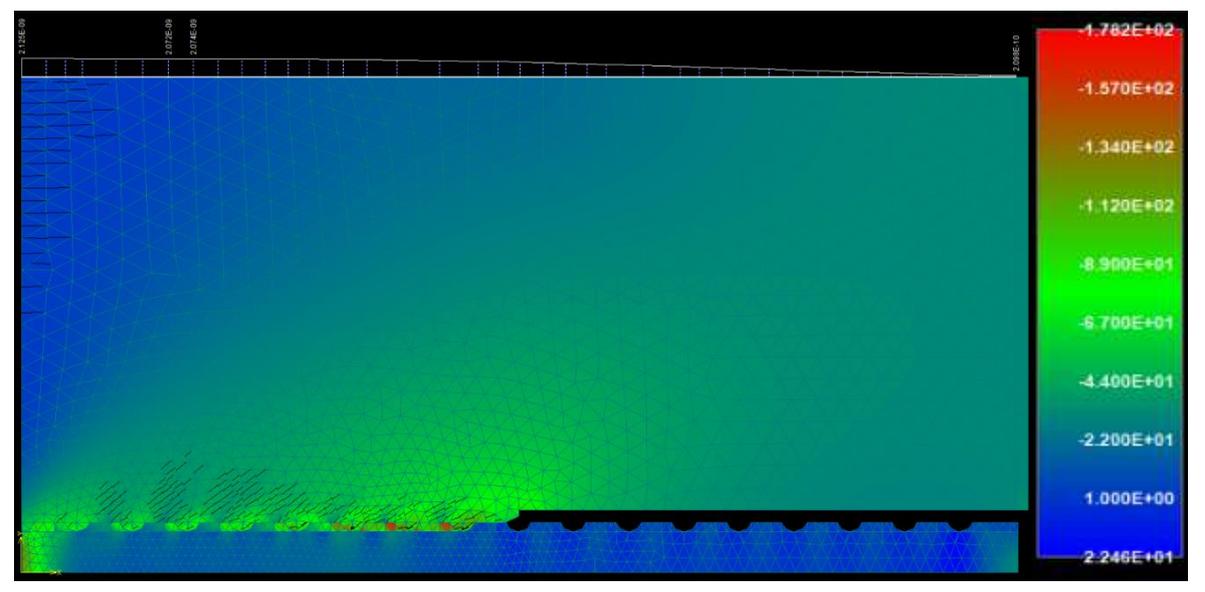


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>27,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,023 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

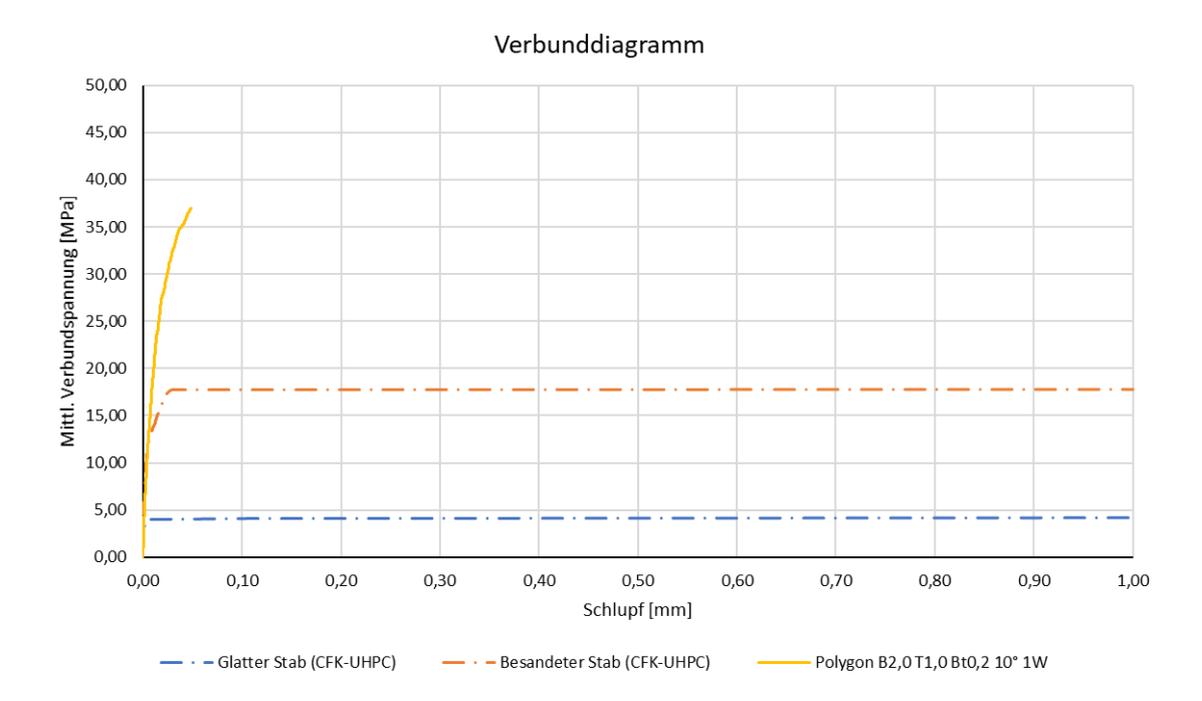


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

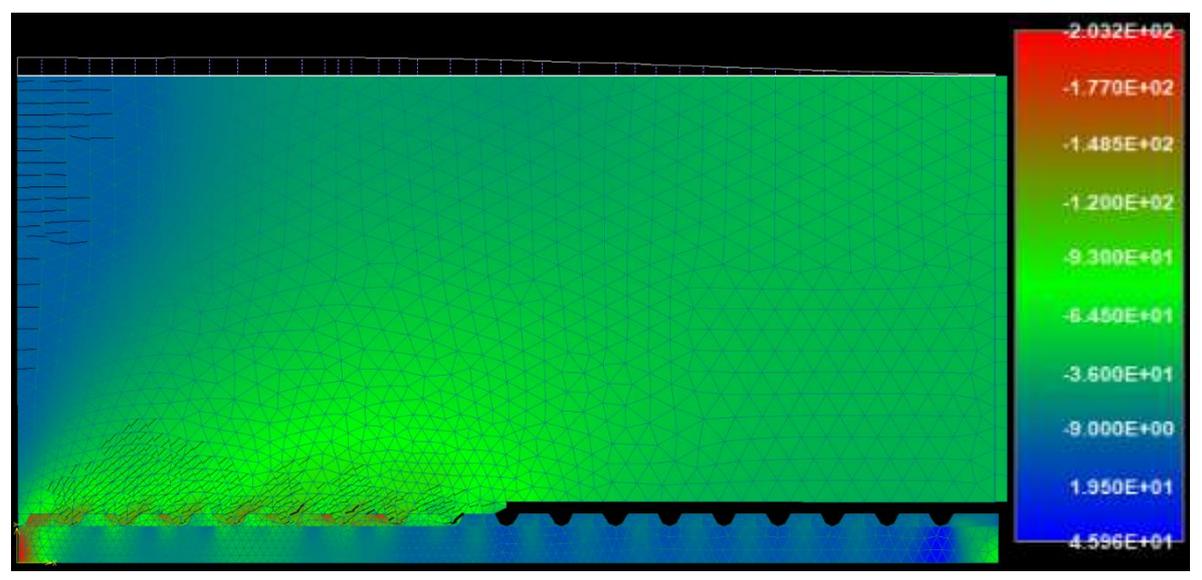


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>37,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,049 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



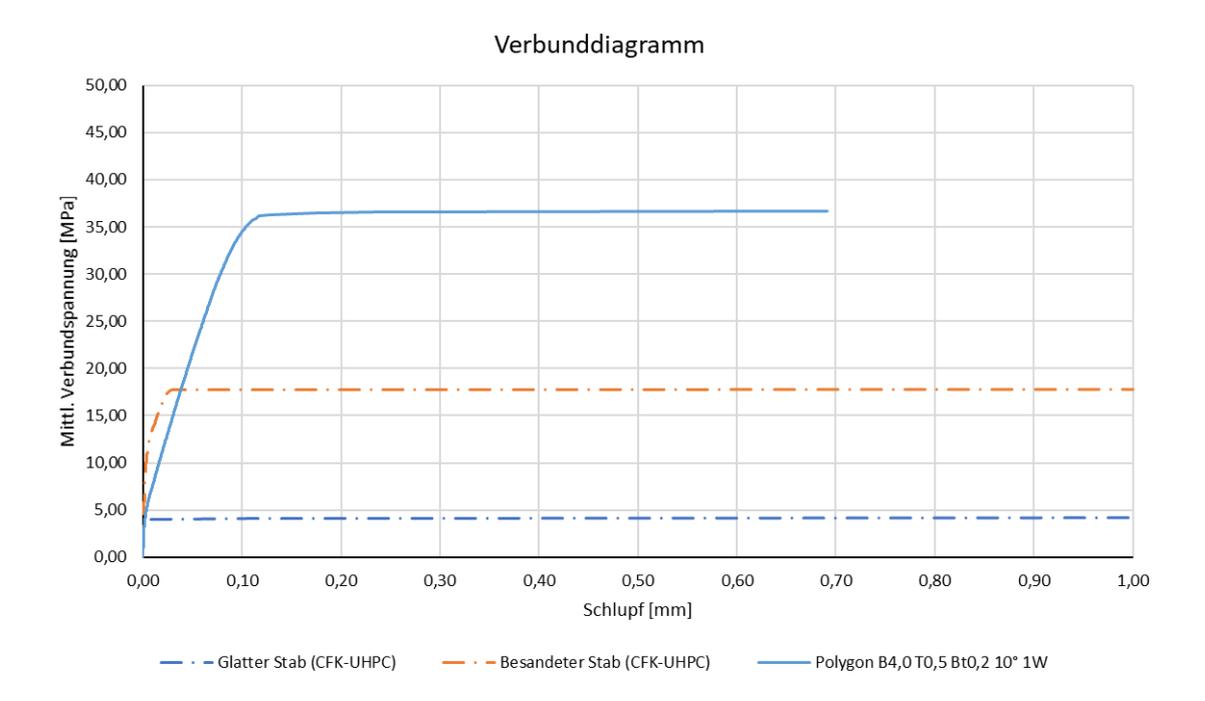
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



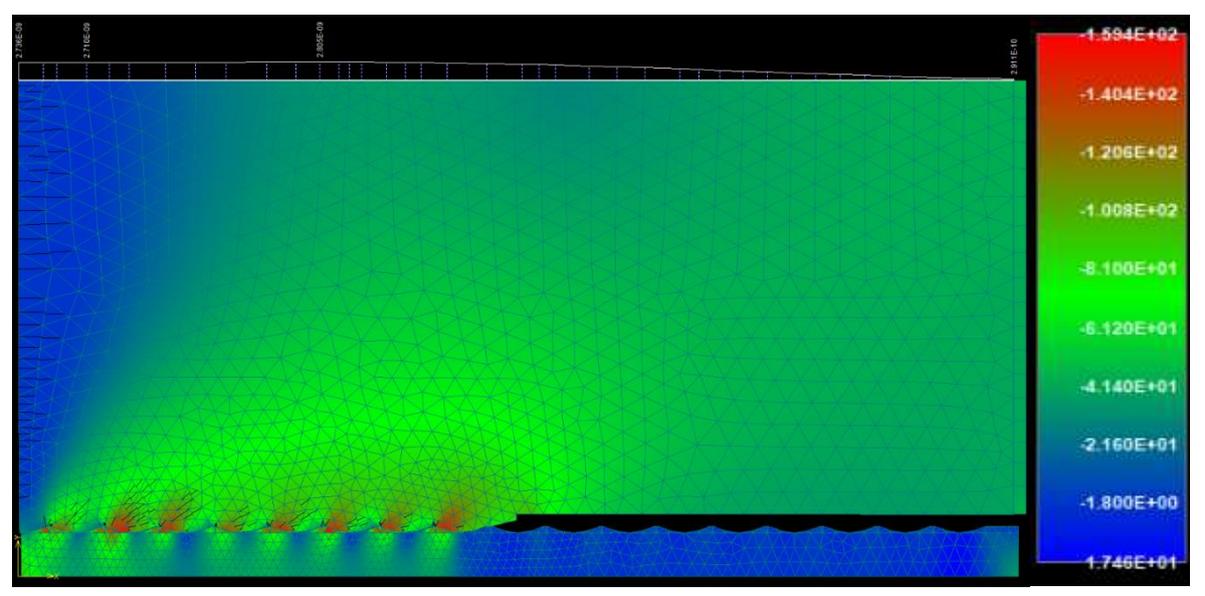
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>36,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,232 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

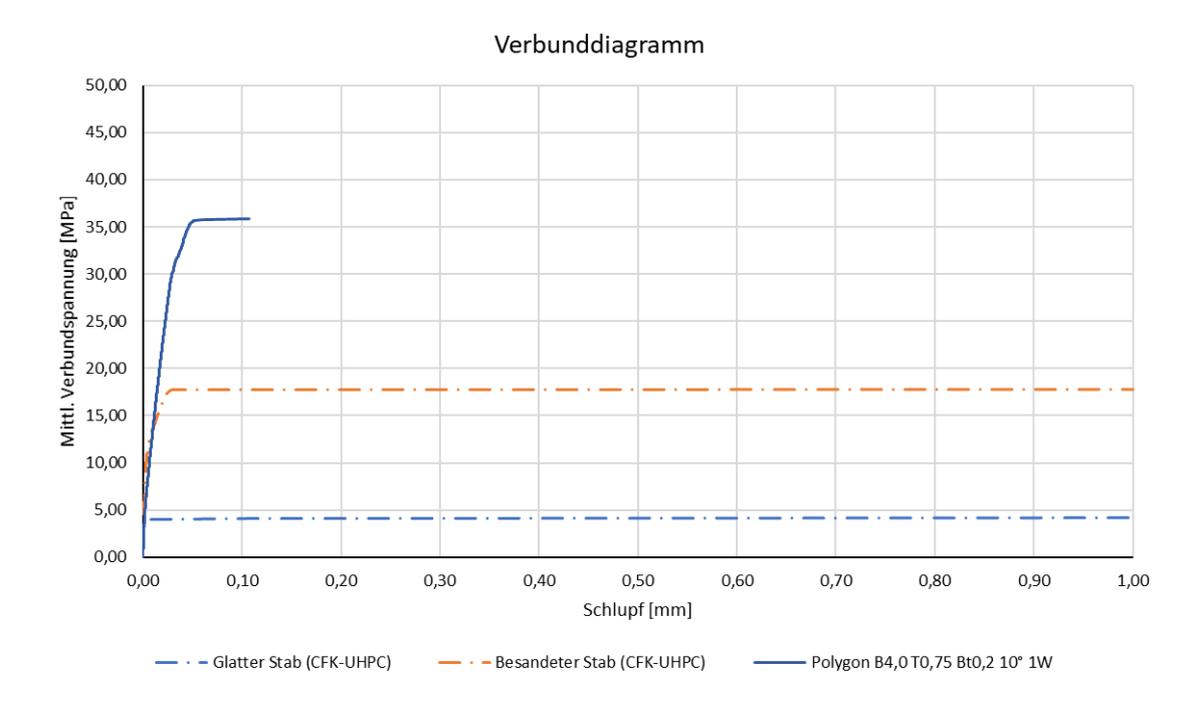


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

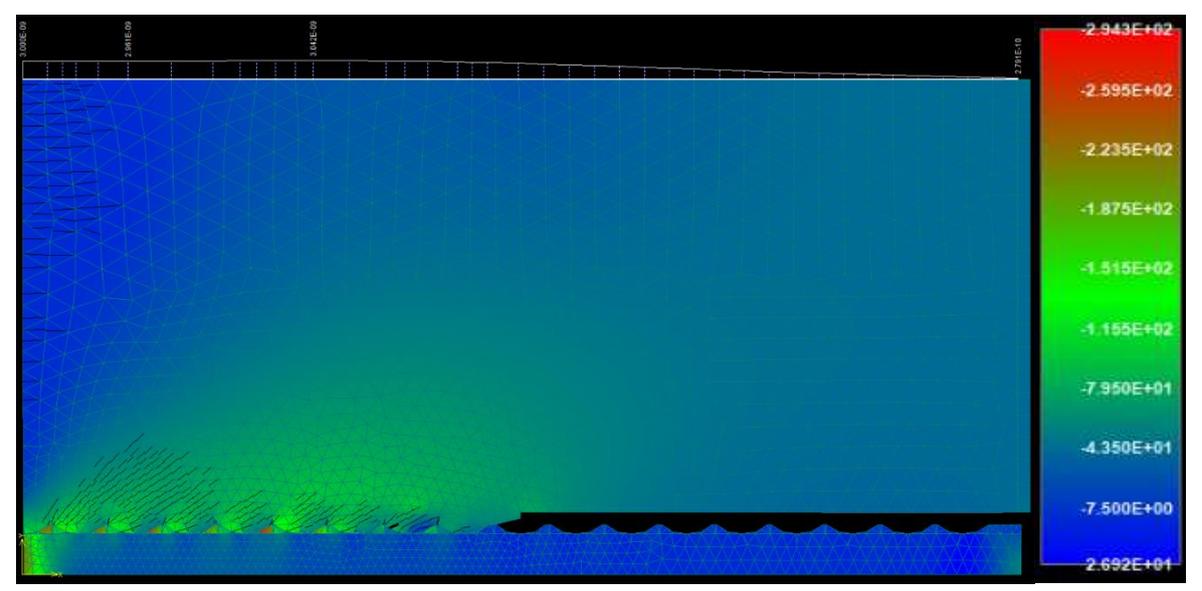


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>35,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,107 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



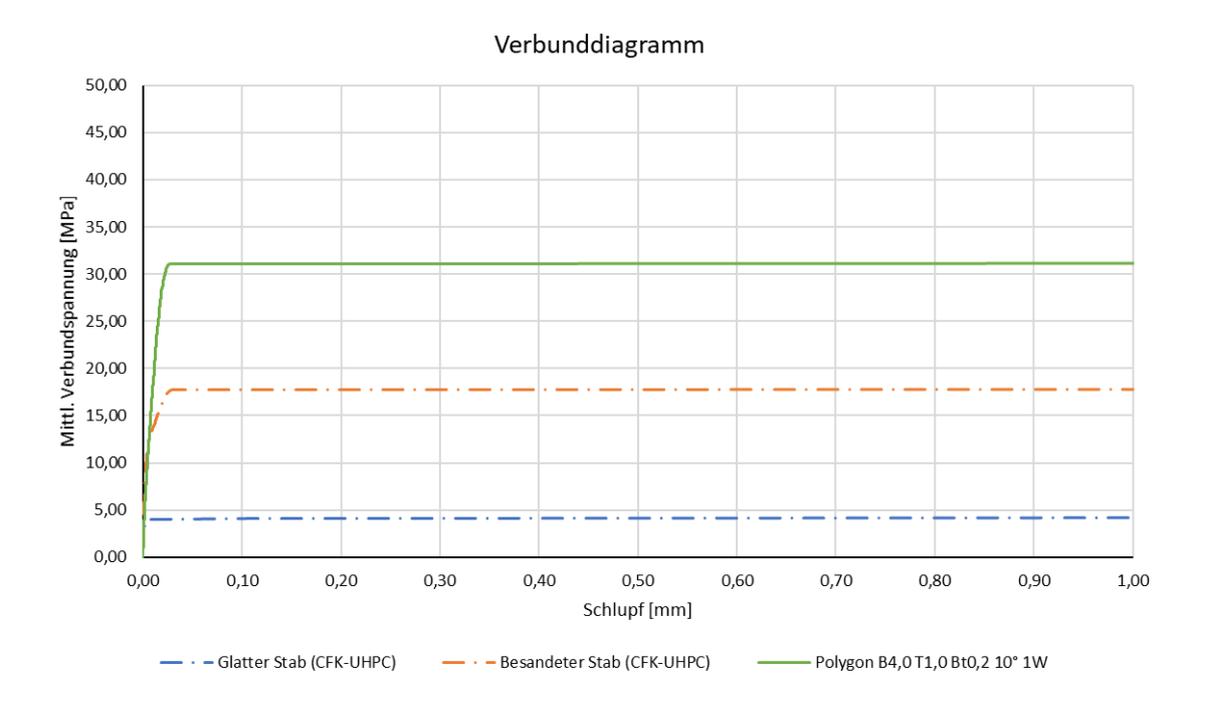
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



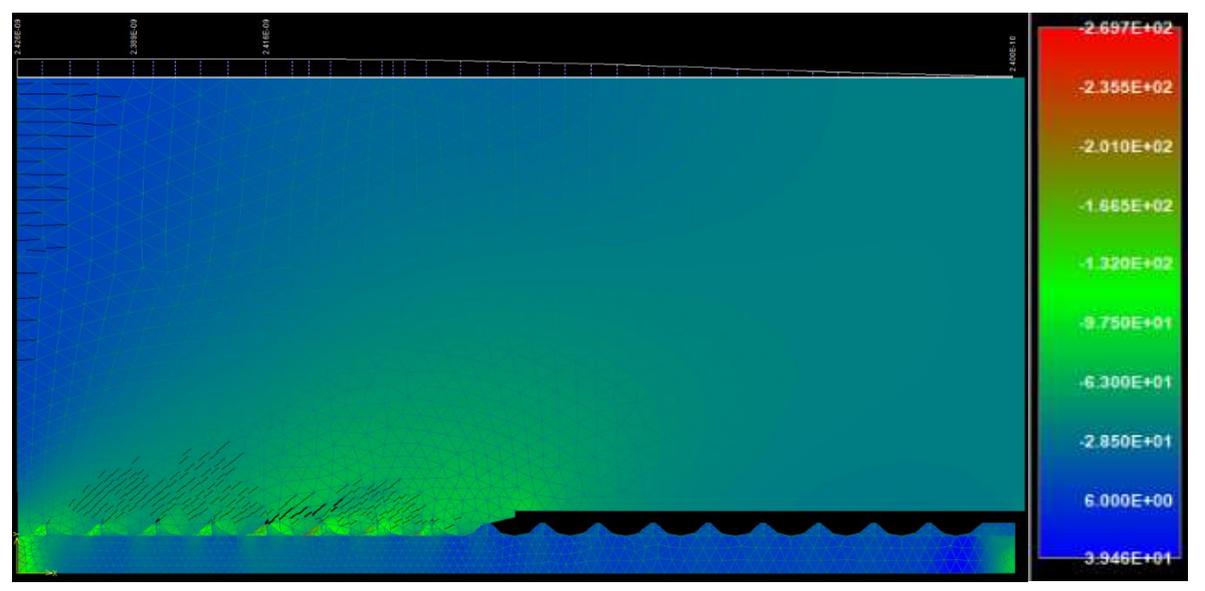
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>31,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,027 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

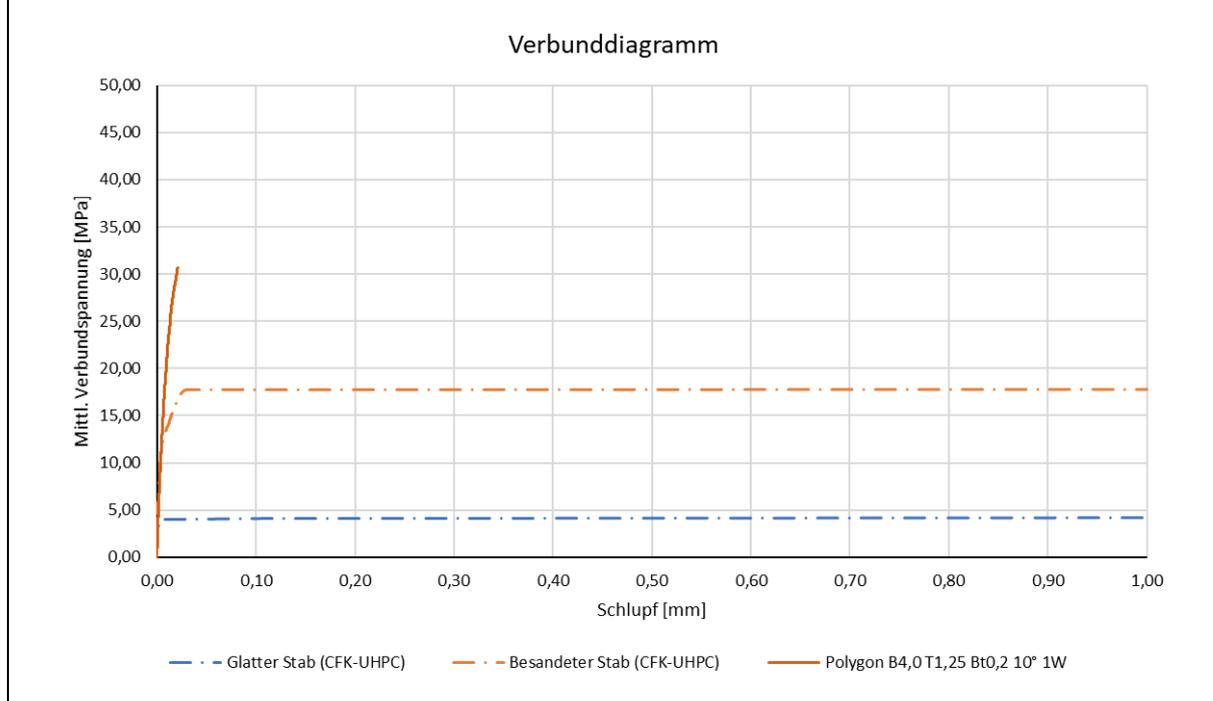


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

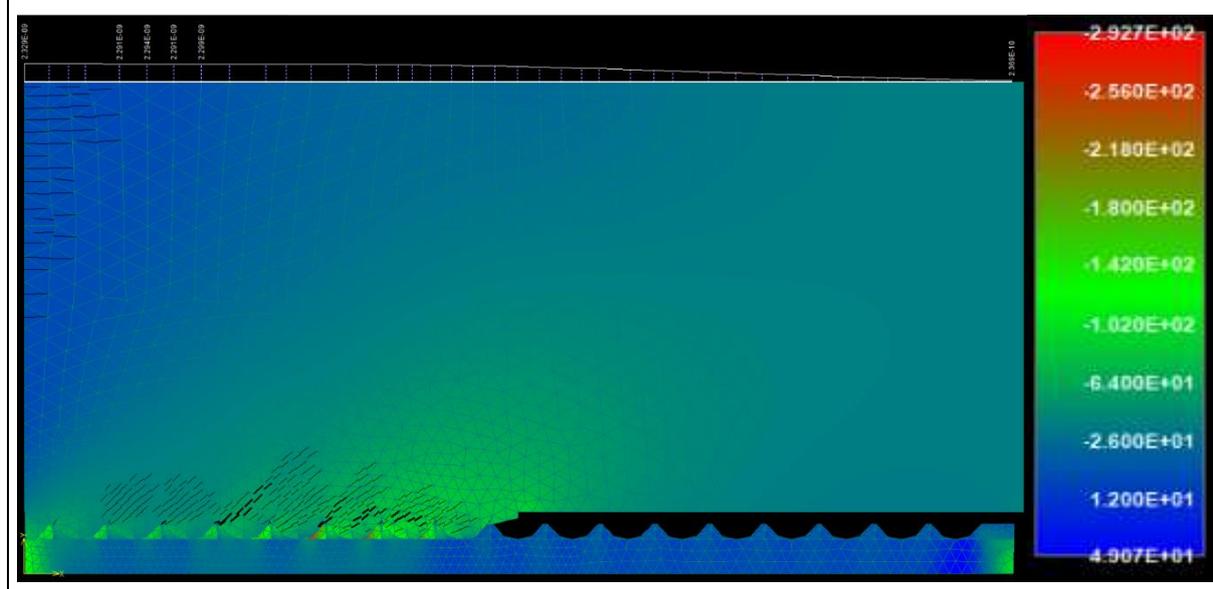


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,021 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



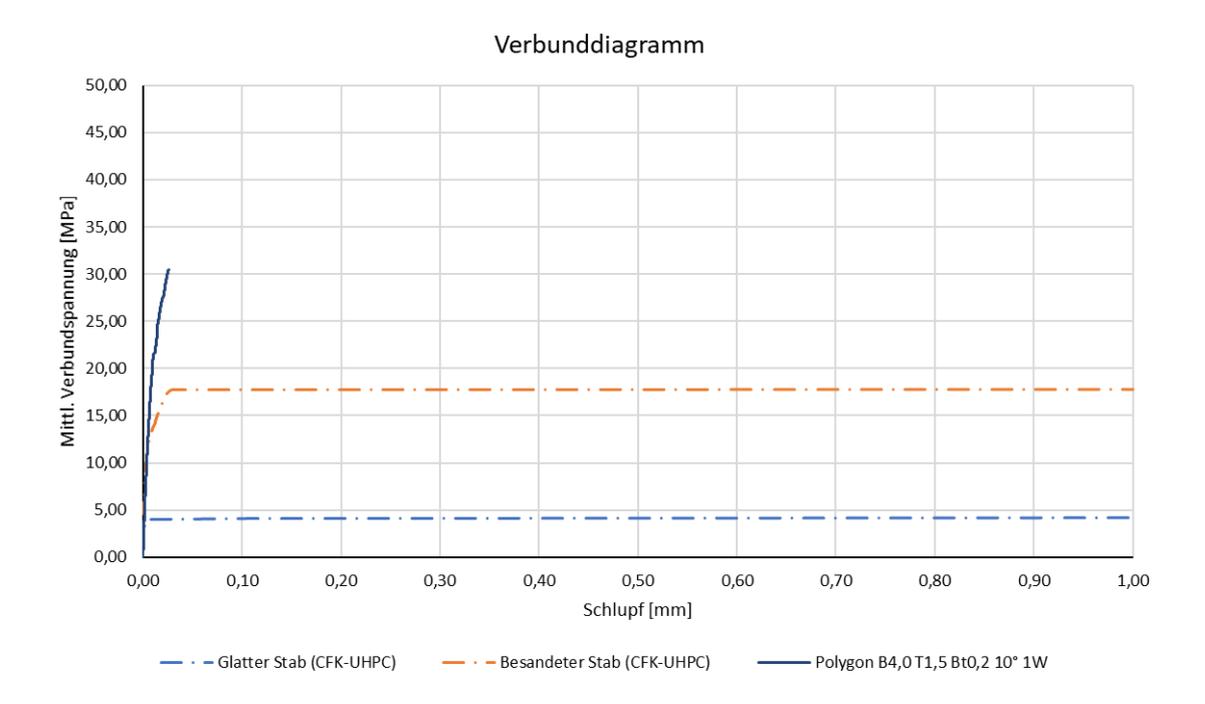
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



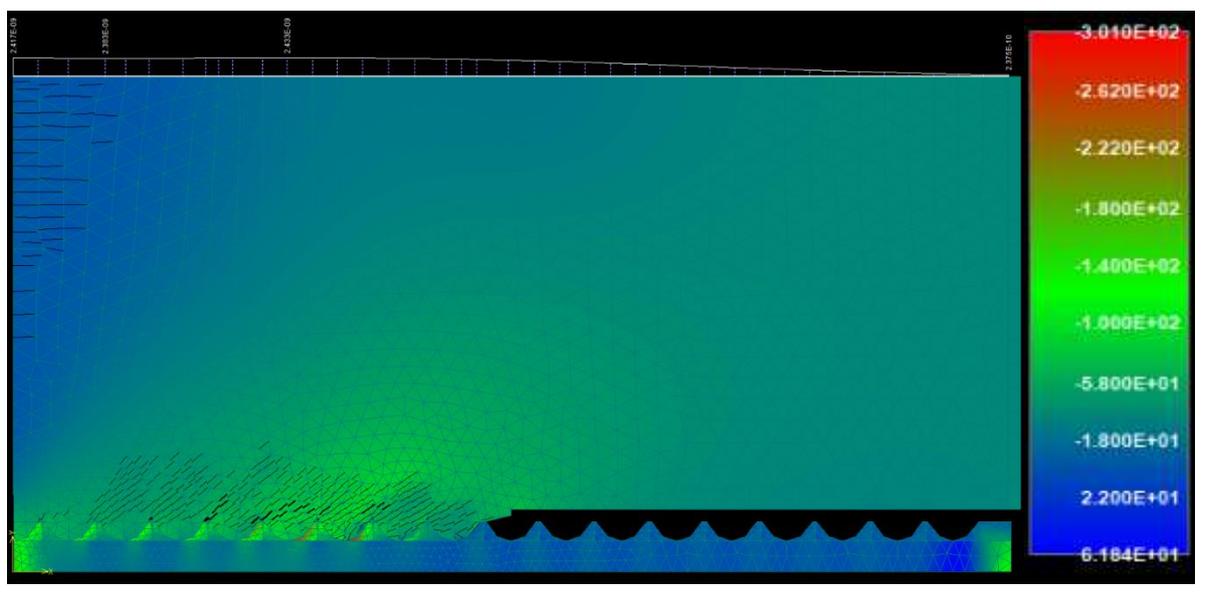
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,026 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

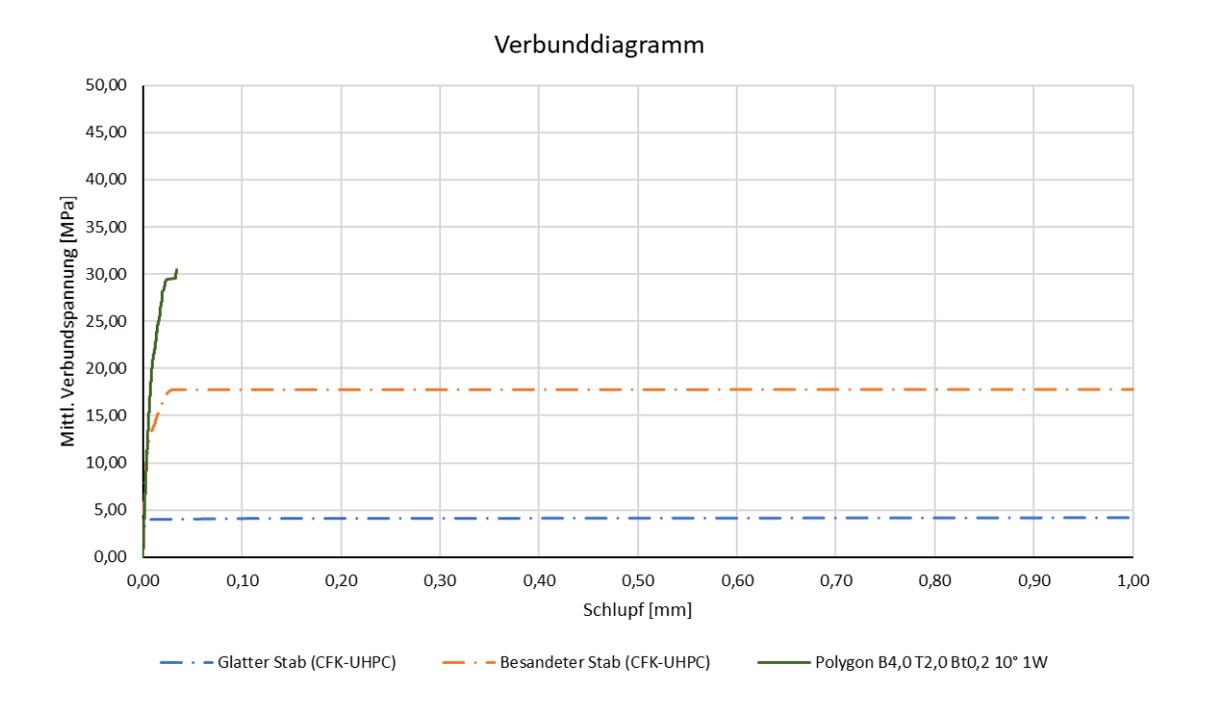


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

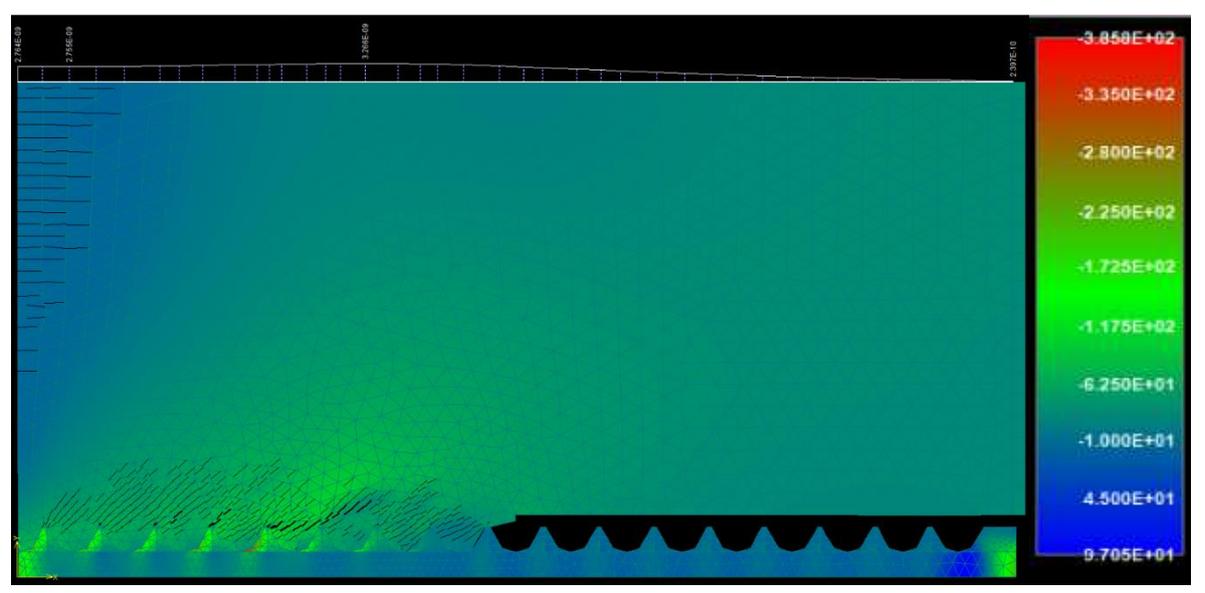


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	10°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,034 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

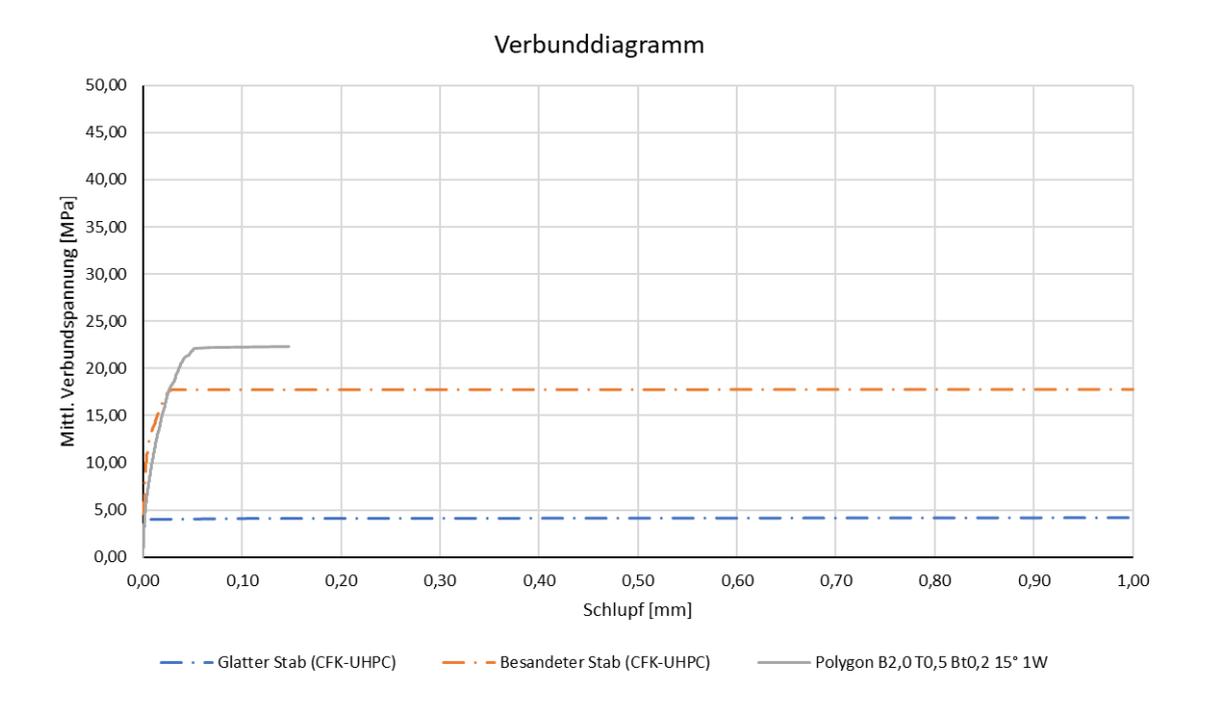


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

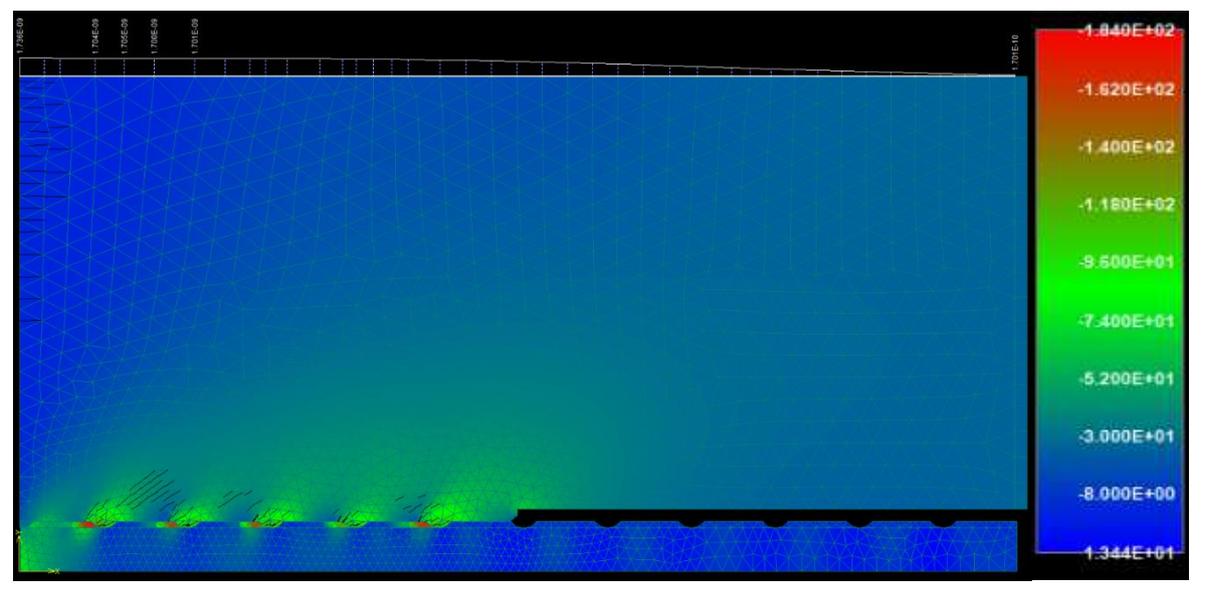


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>22,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,147 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

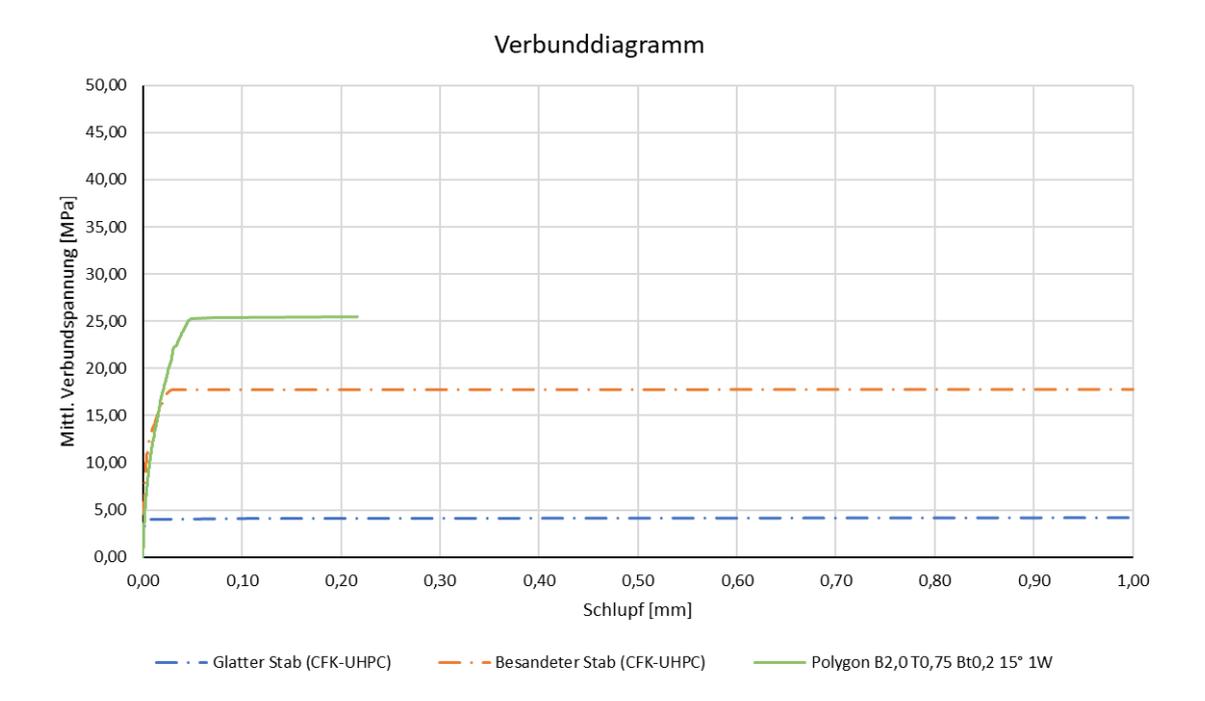


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

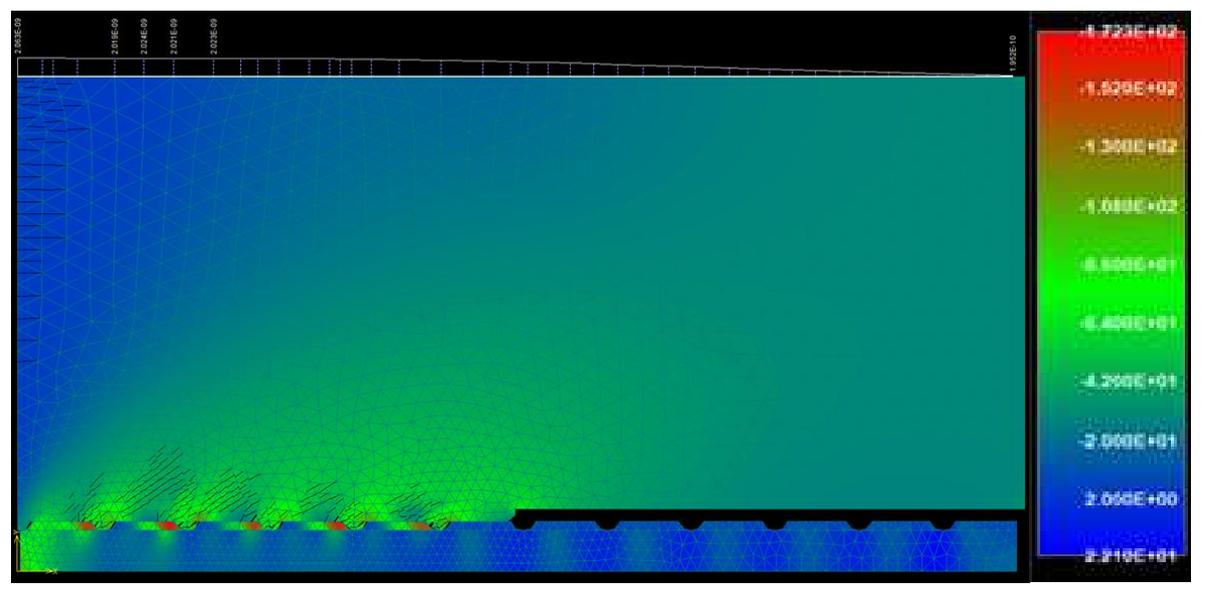


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>25,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,216 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

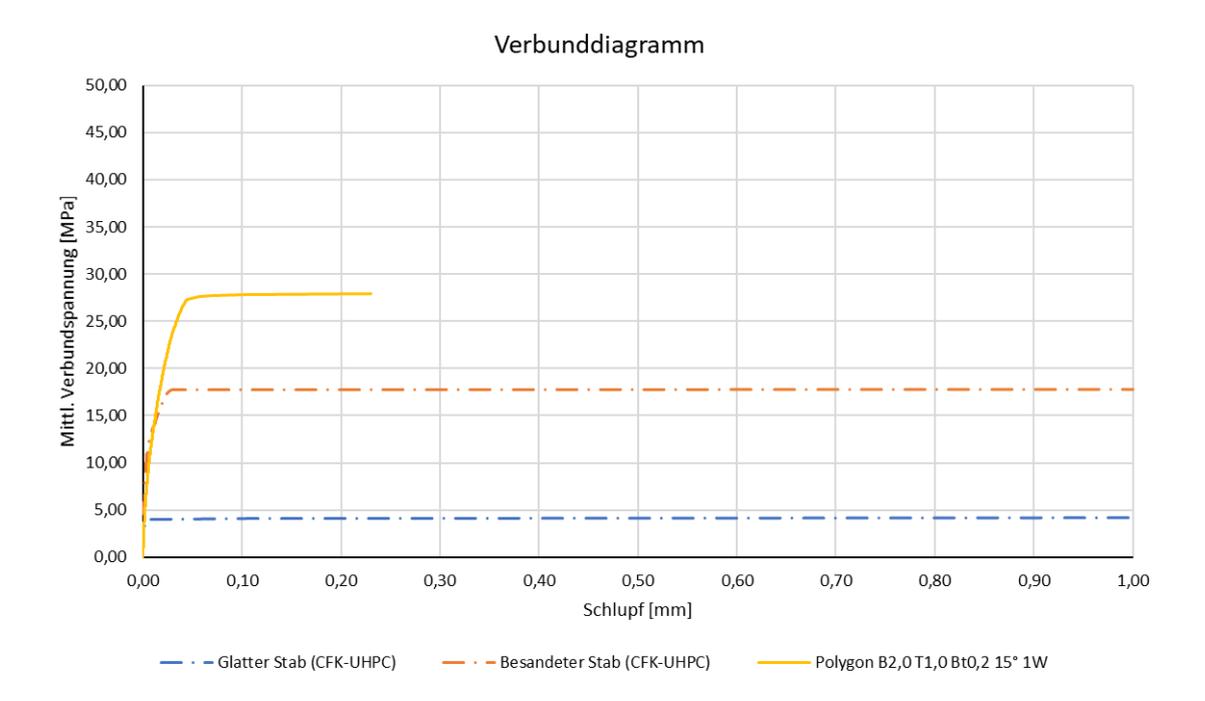


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

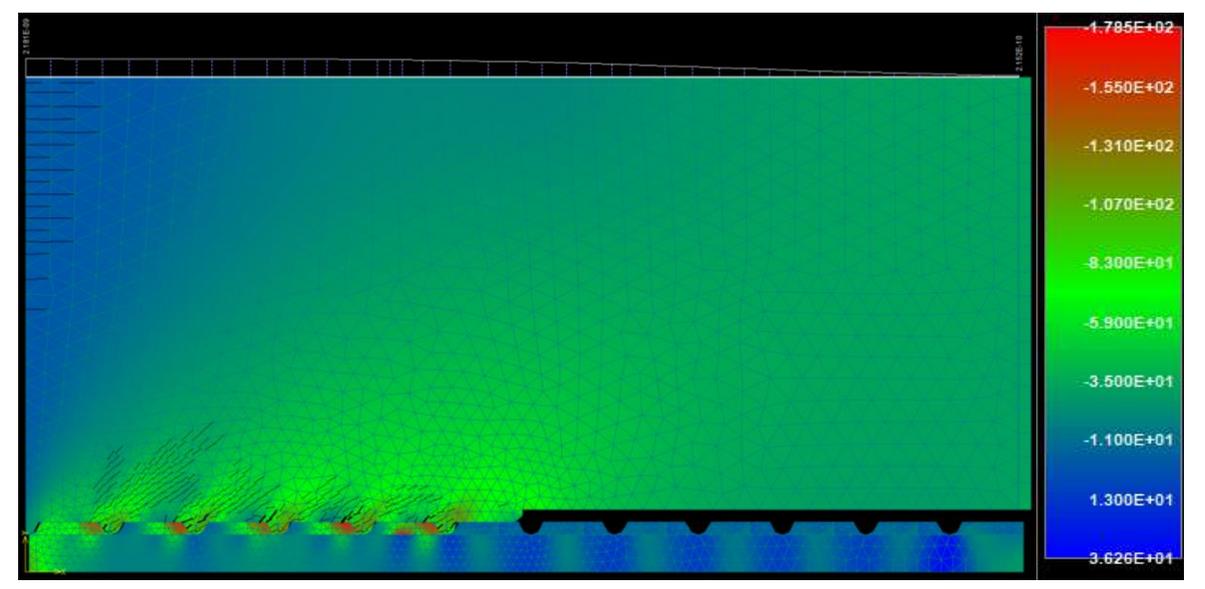


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>27,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,231 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

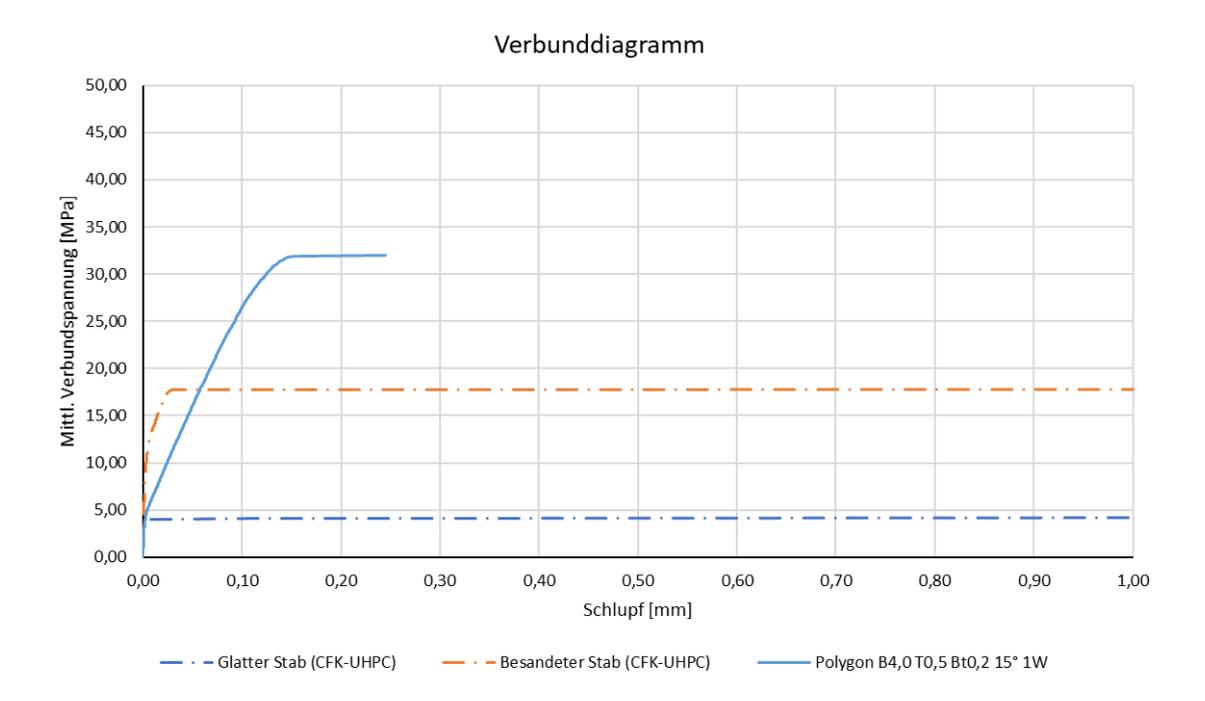


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

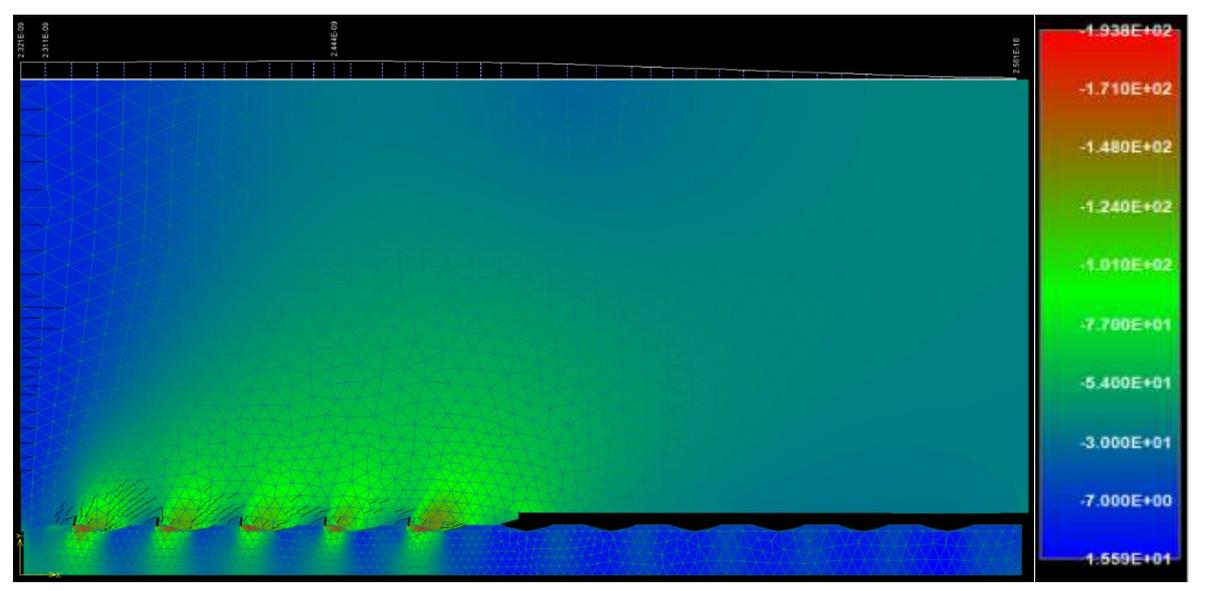


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>32,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,245 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



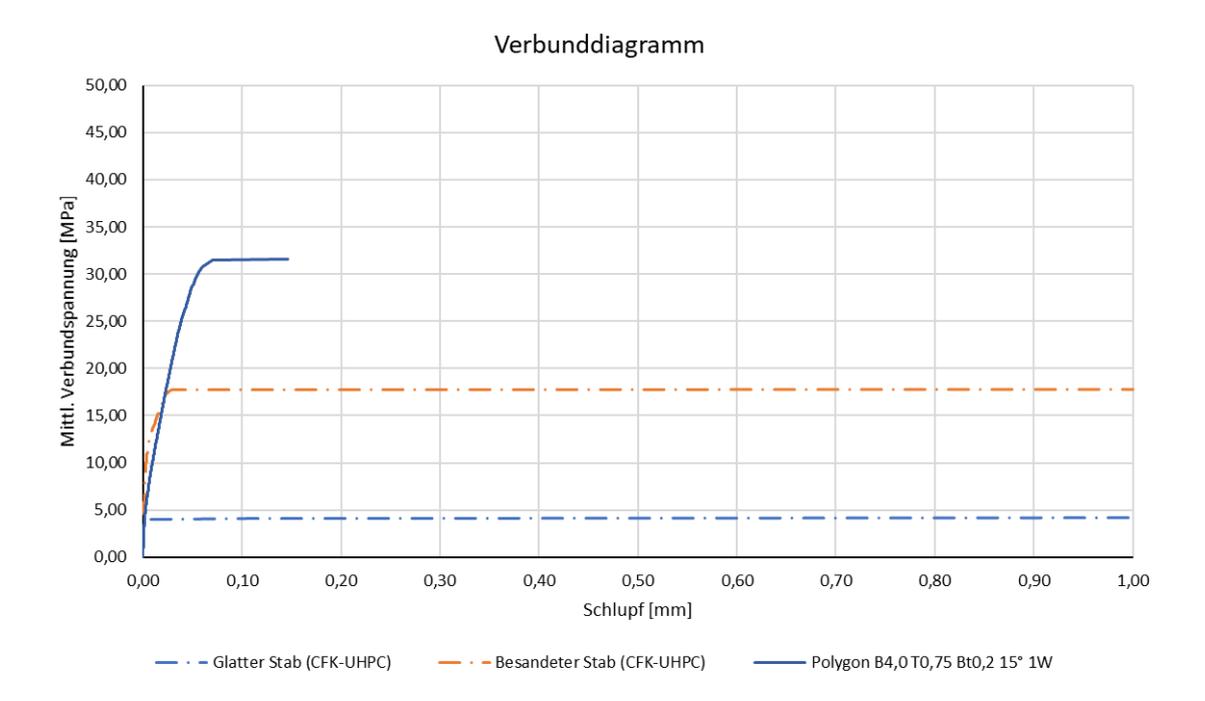
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



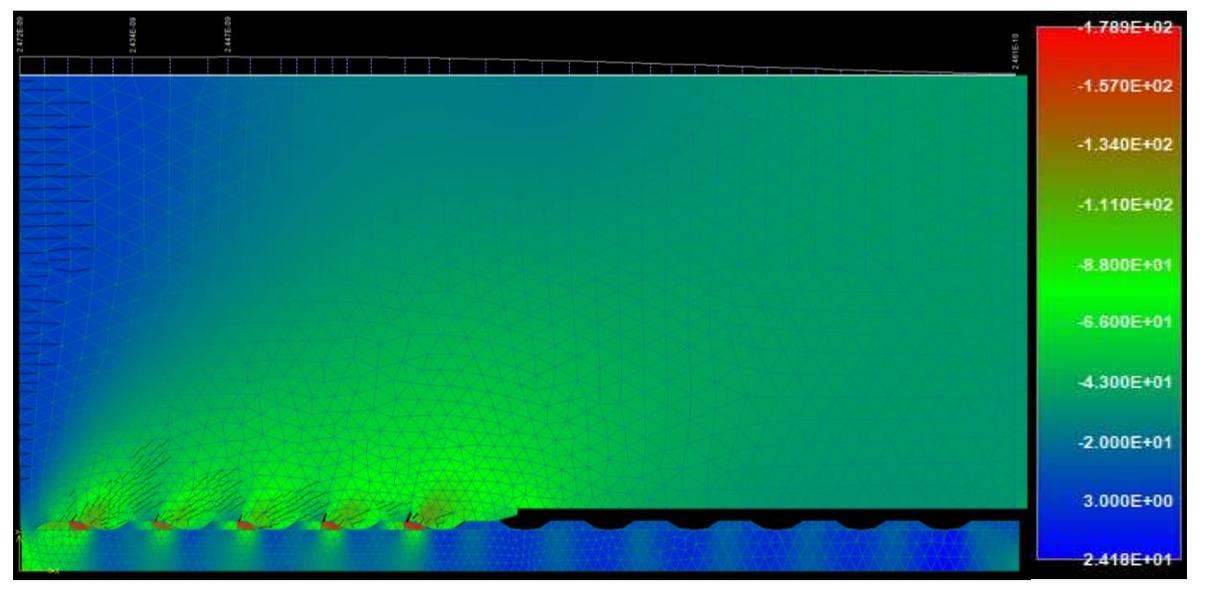
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>31,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,146 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

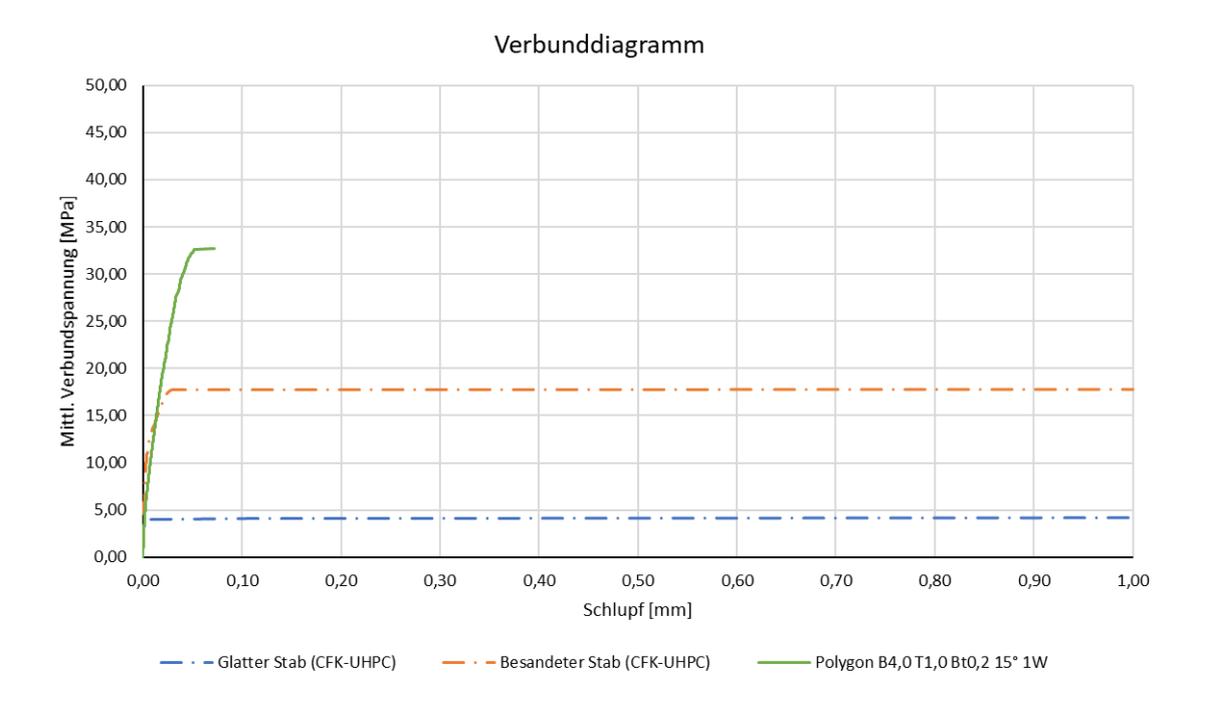


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

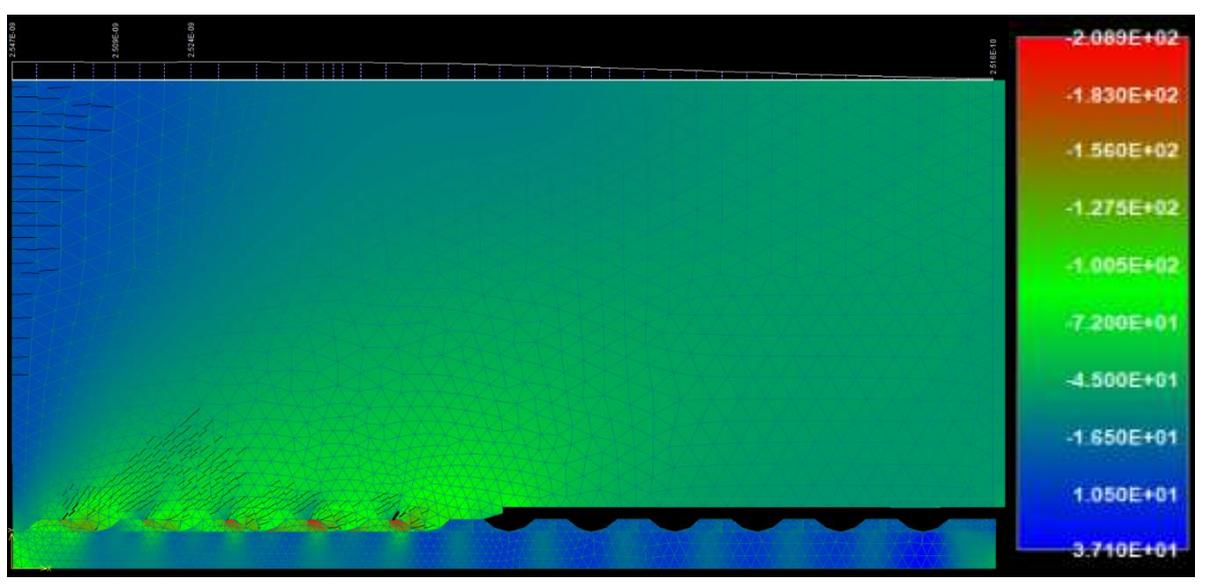


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>32,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,072 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



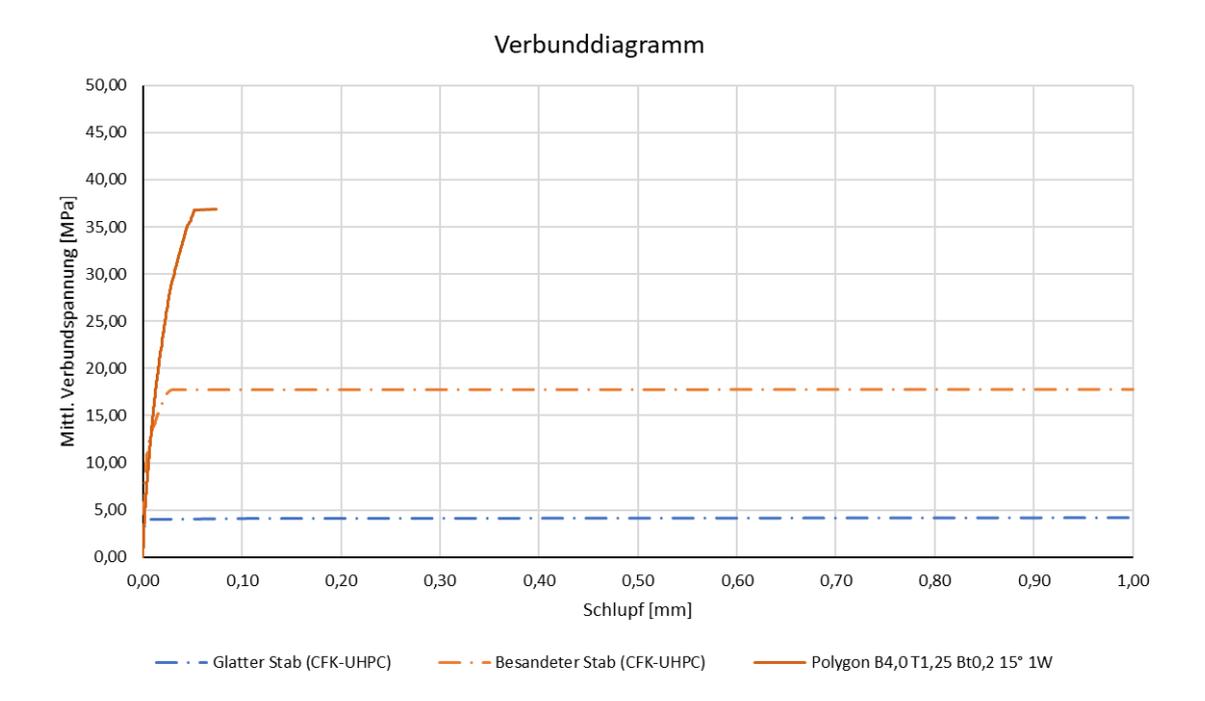
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



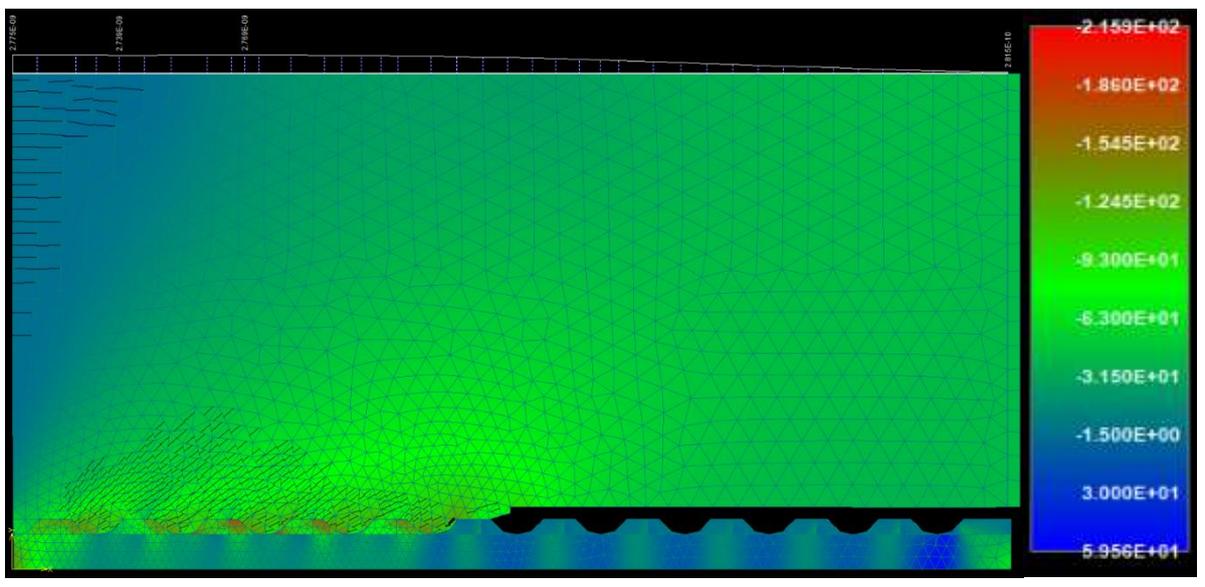
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>36,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,074 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

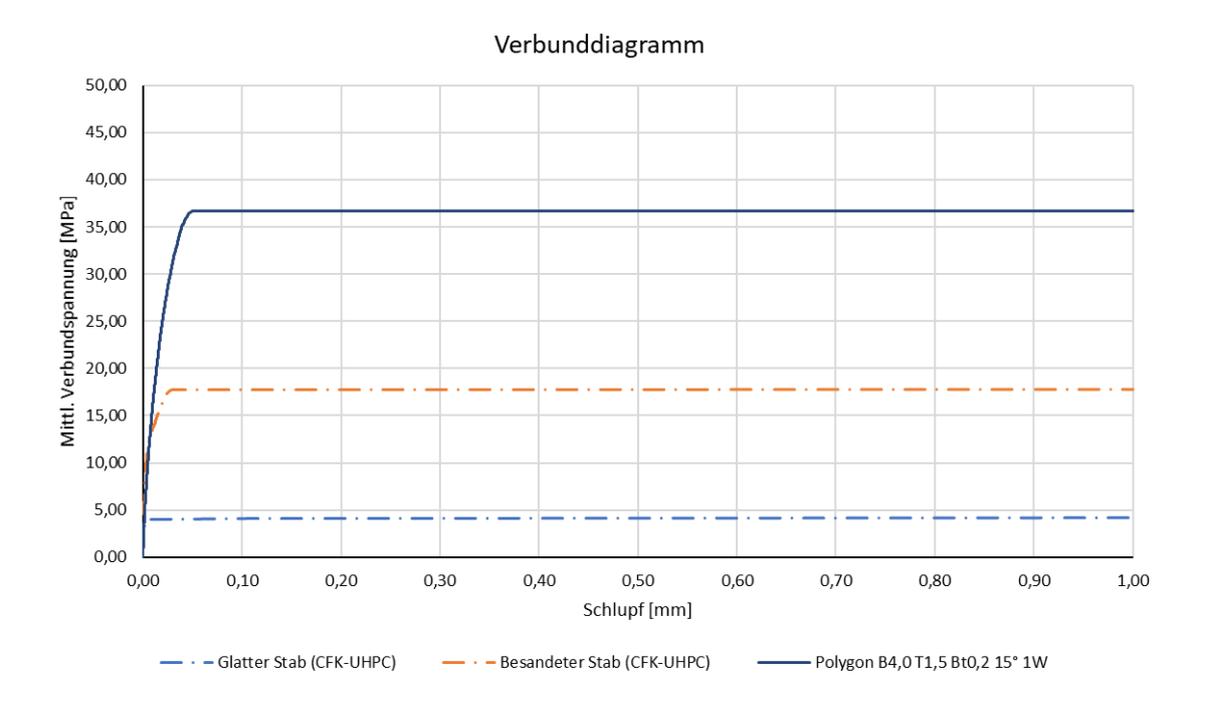


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

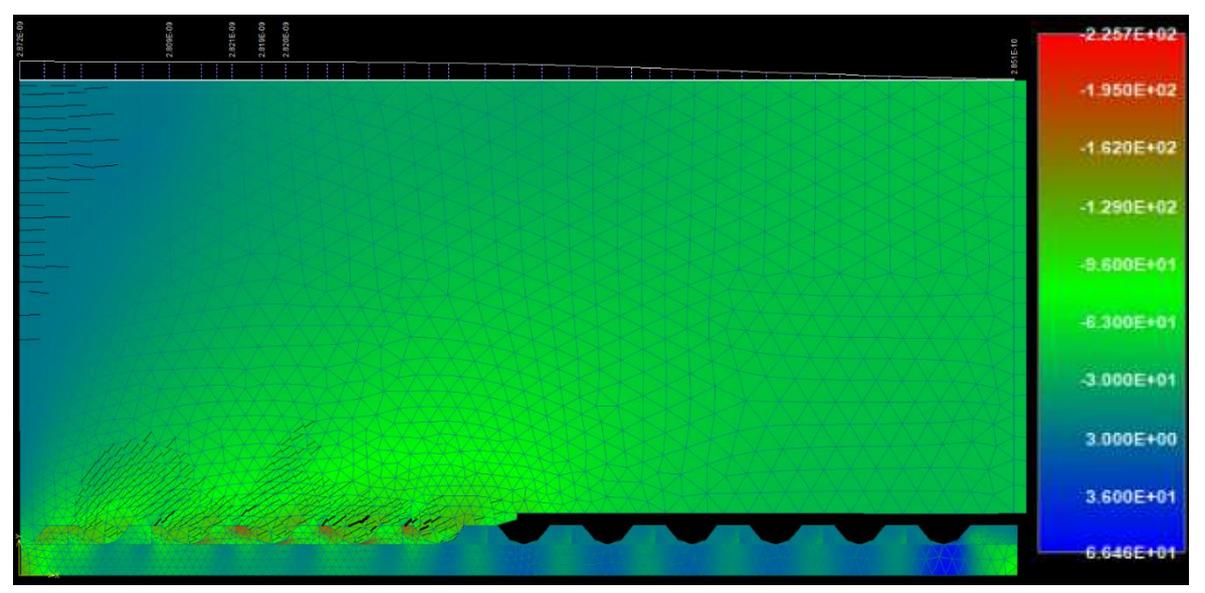


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>36,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,049 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



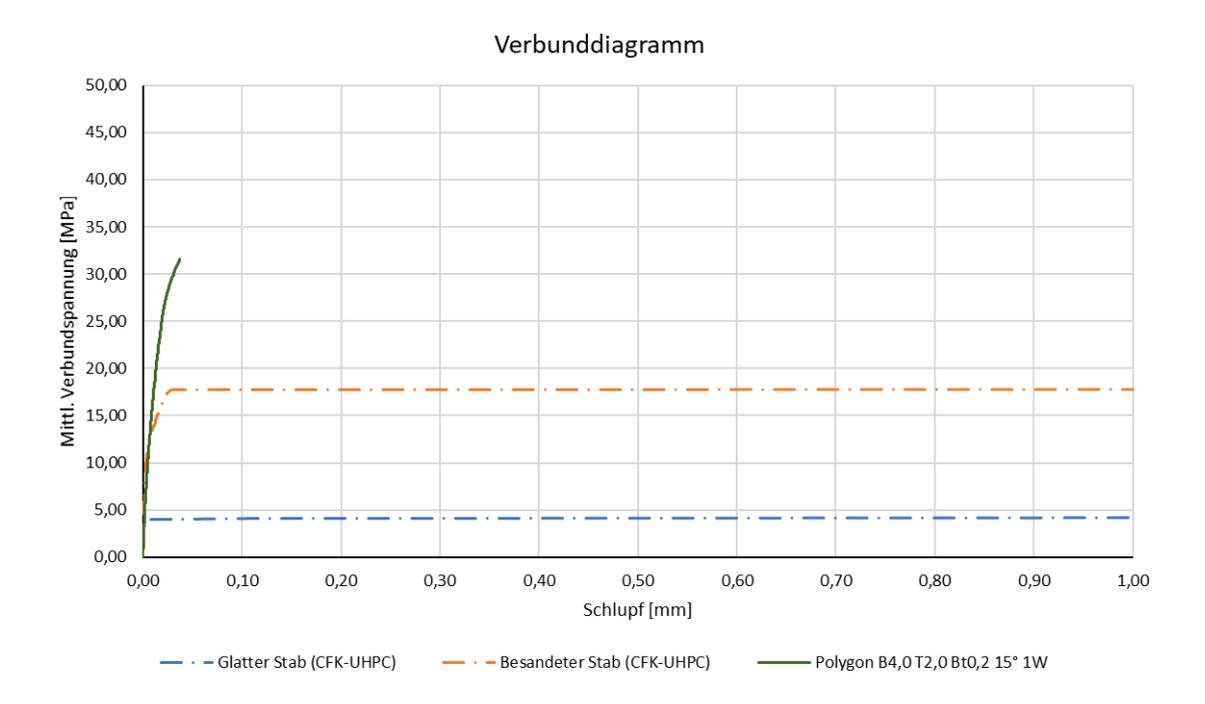
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



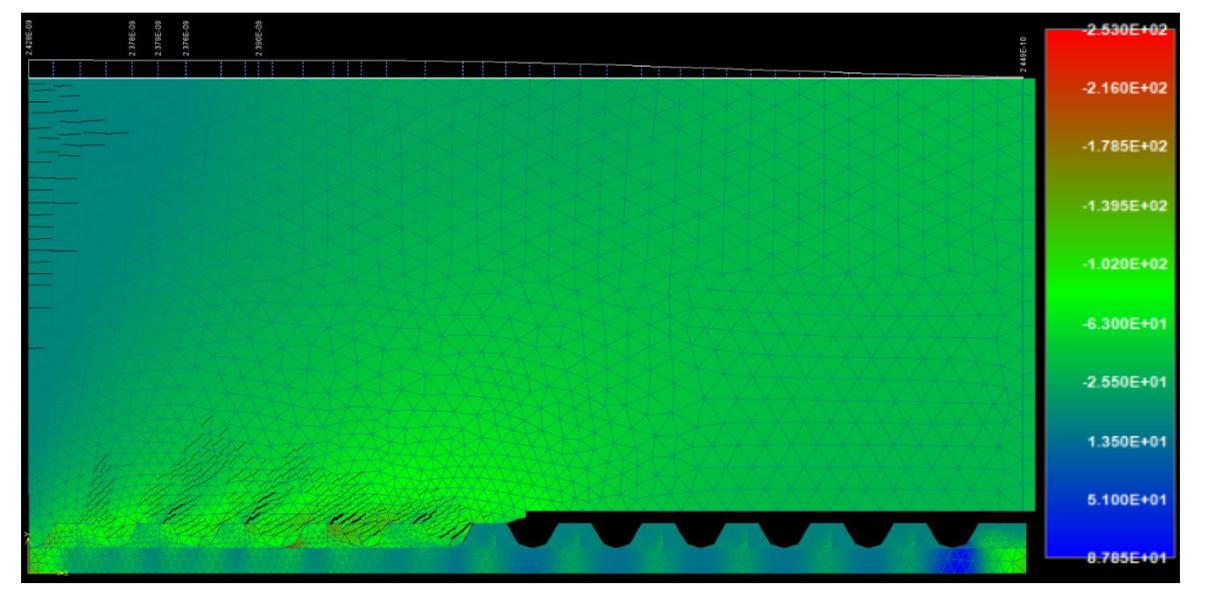
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>31,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,037 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

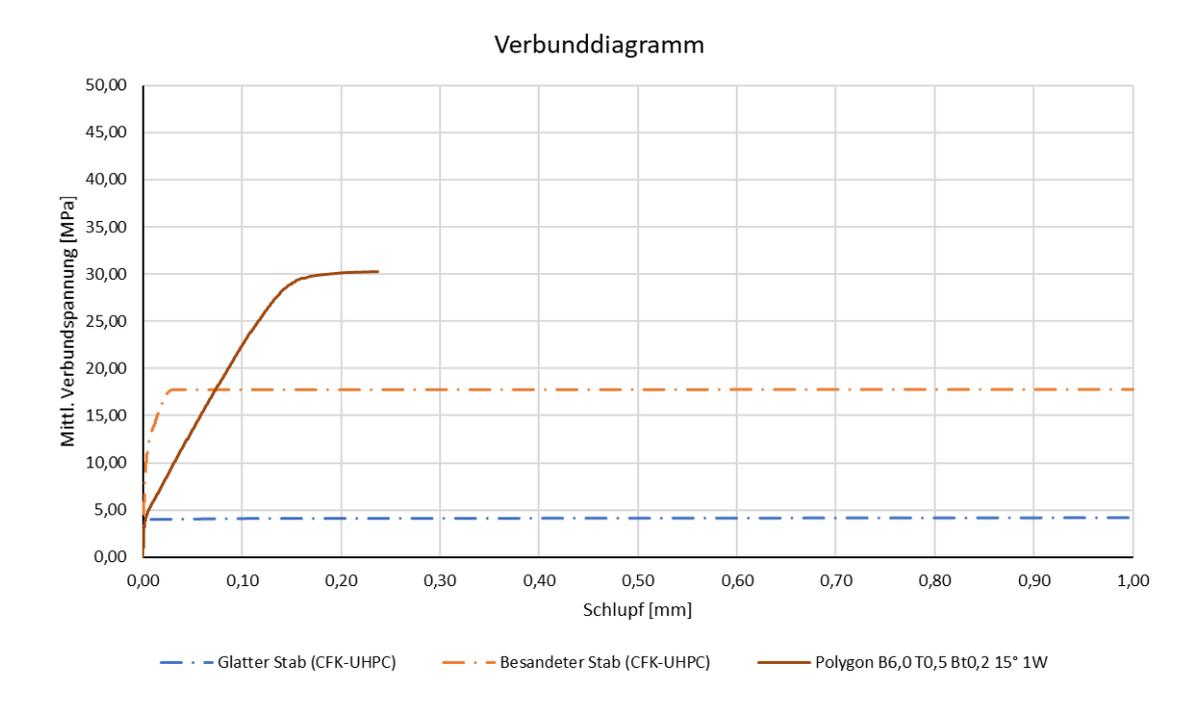


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

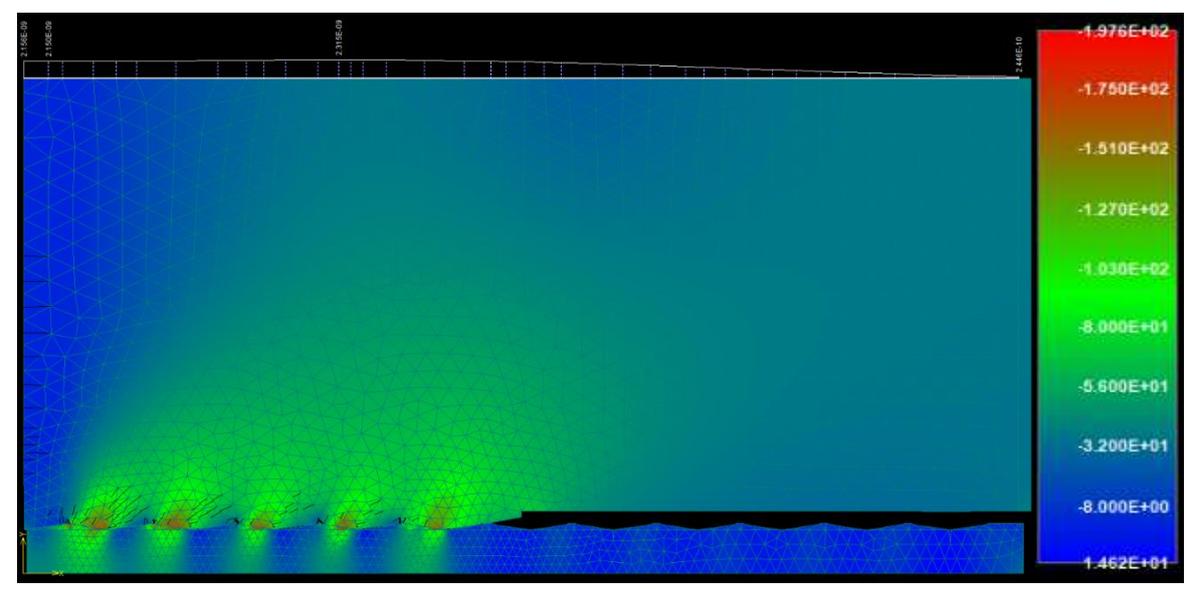


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,237 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



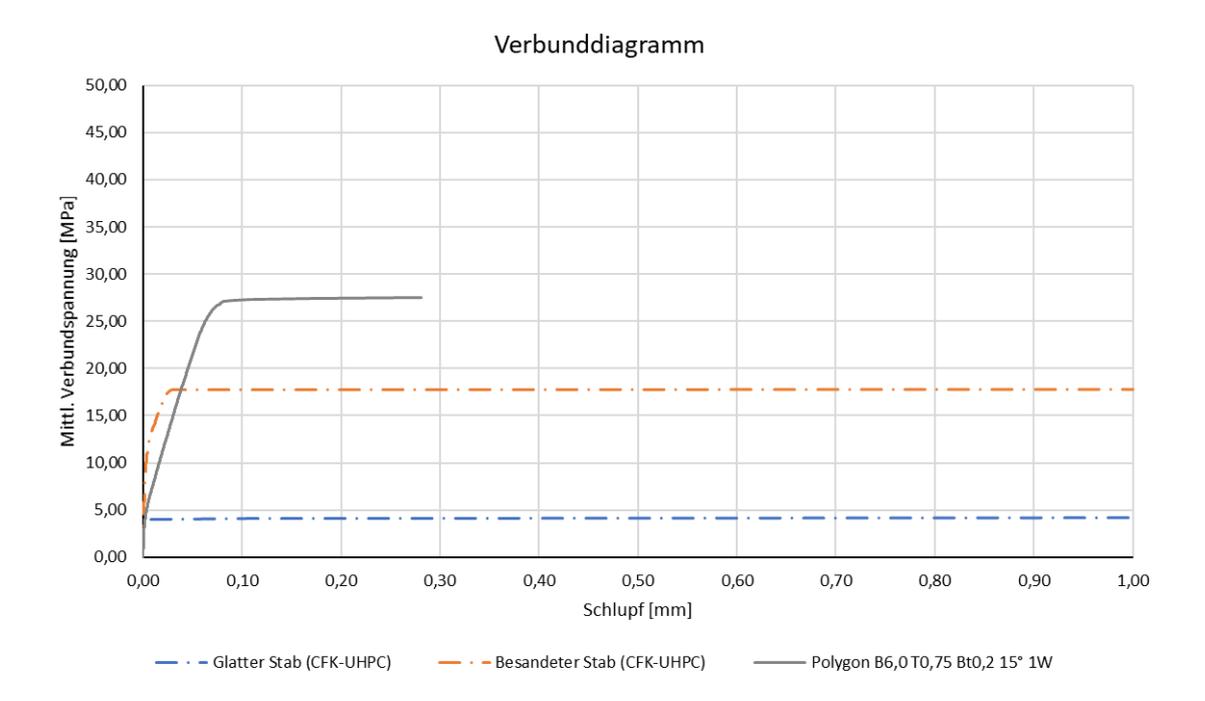
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



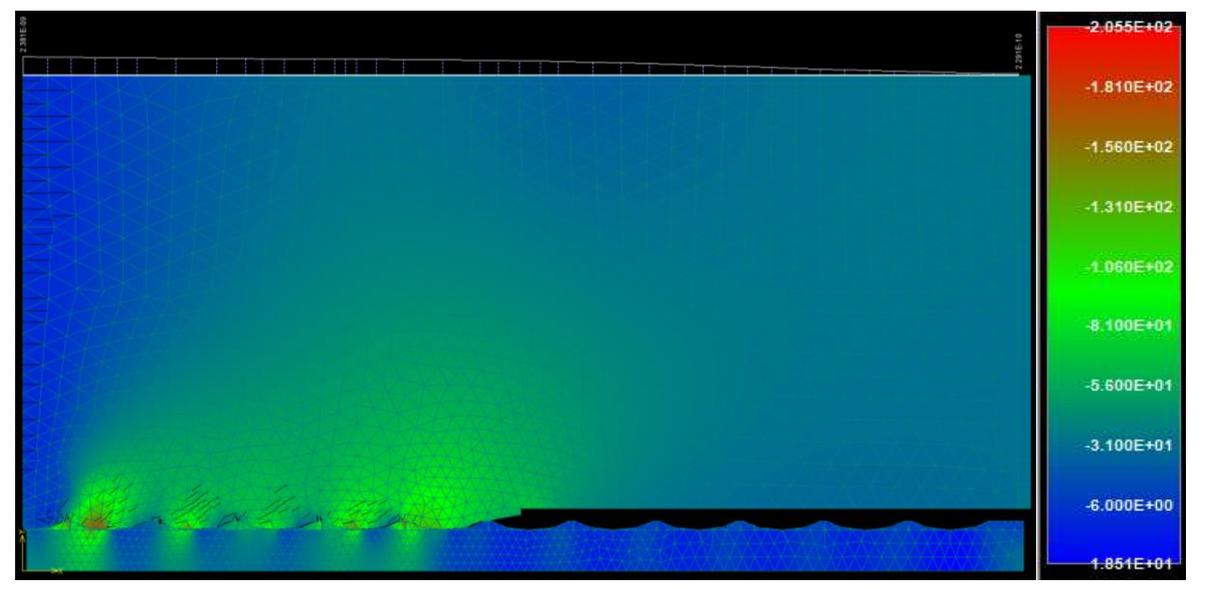
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>27,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,281 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

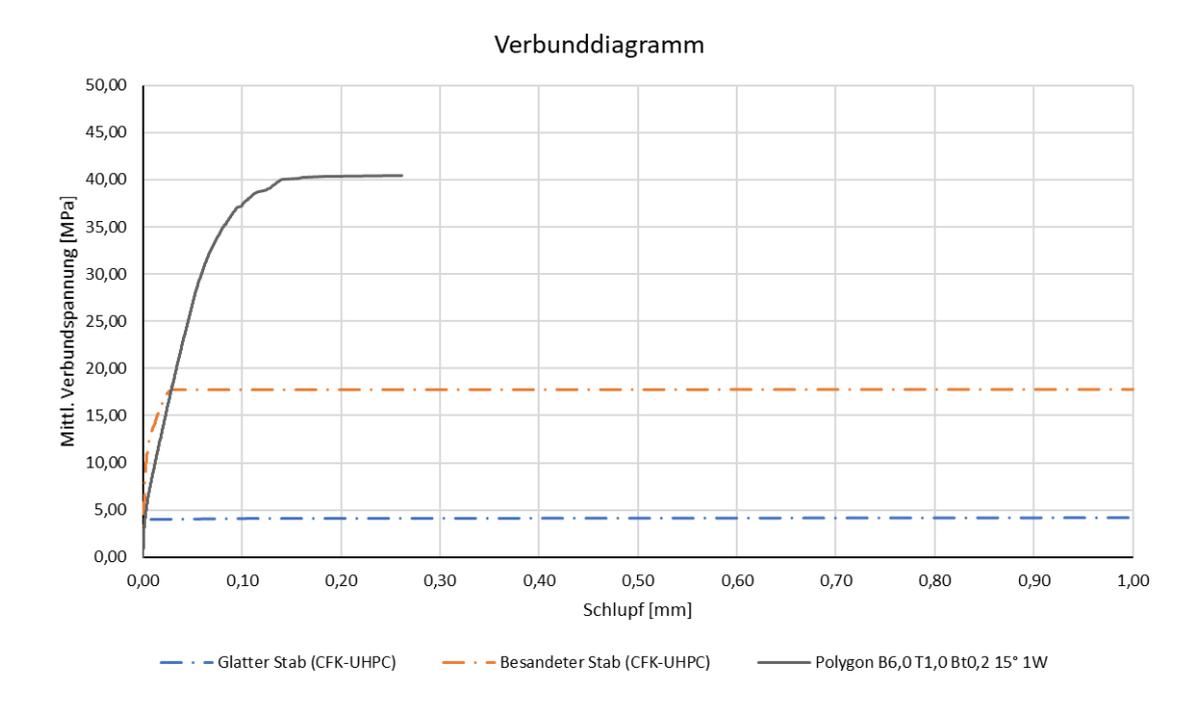


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

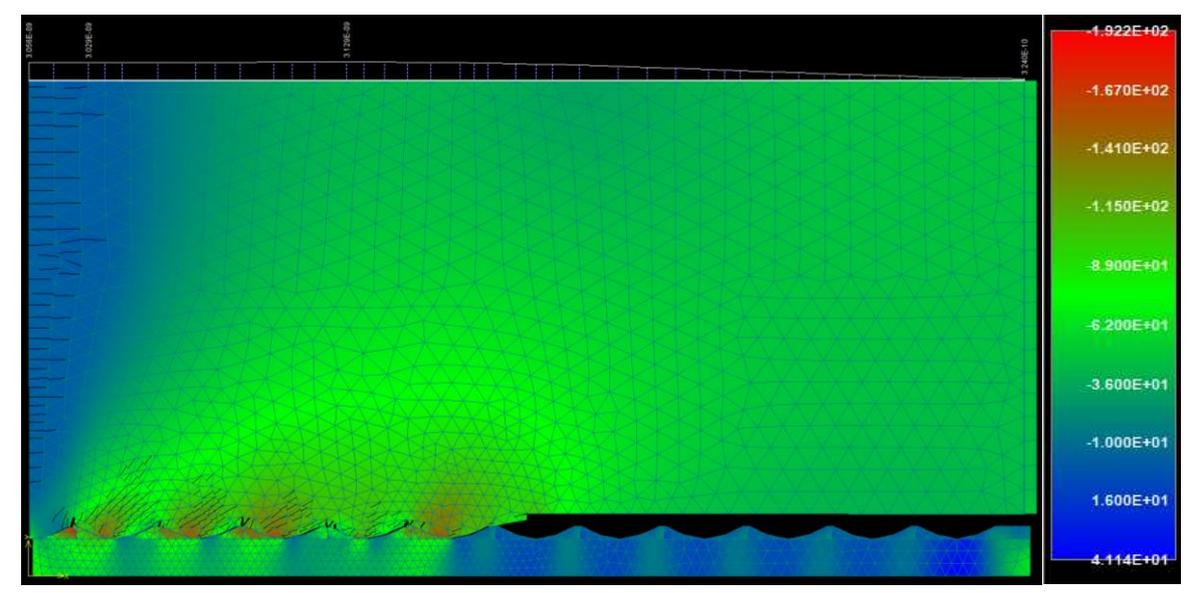


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>40,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,261 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



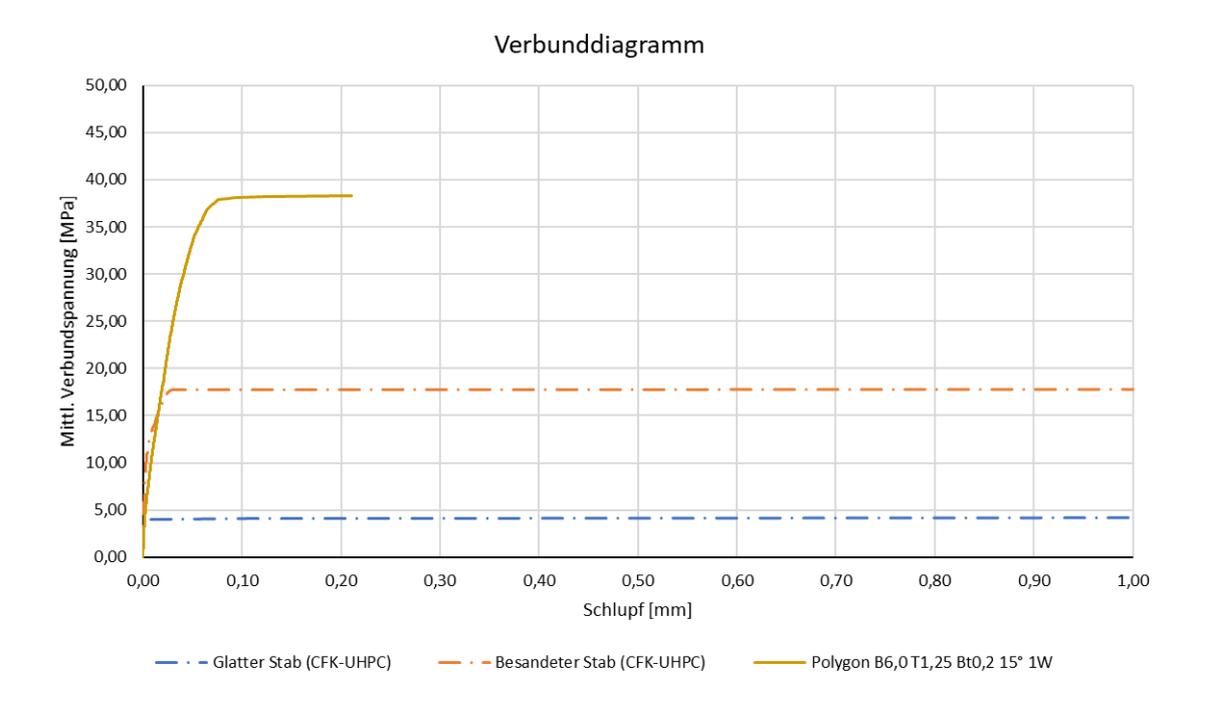
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



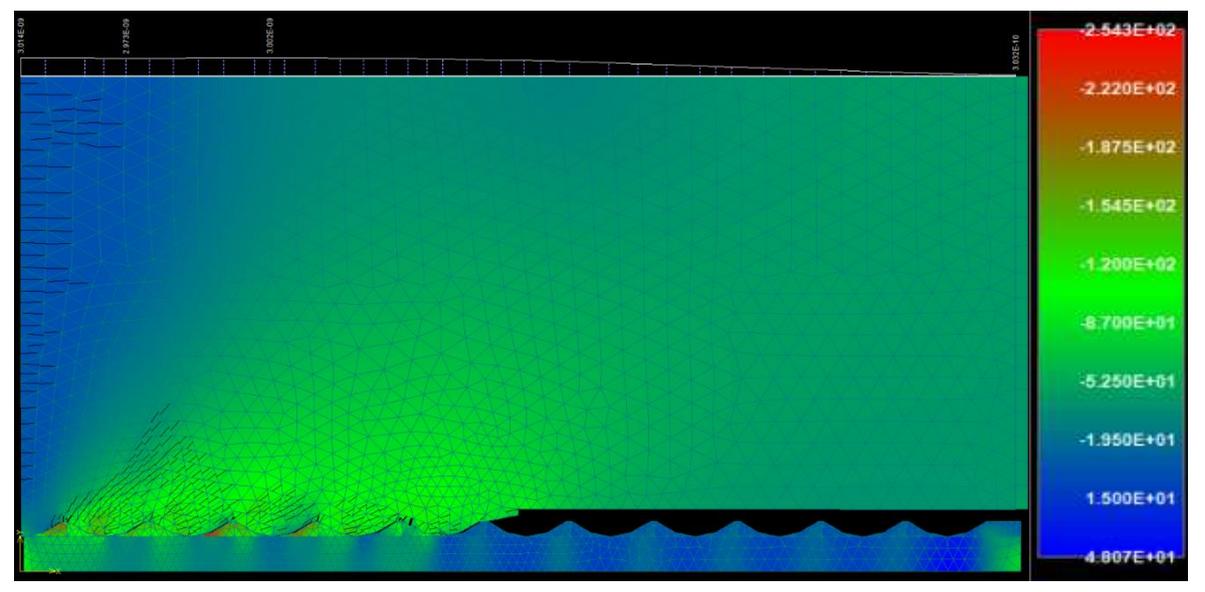
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>38,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,210 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

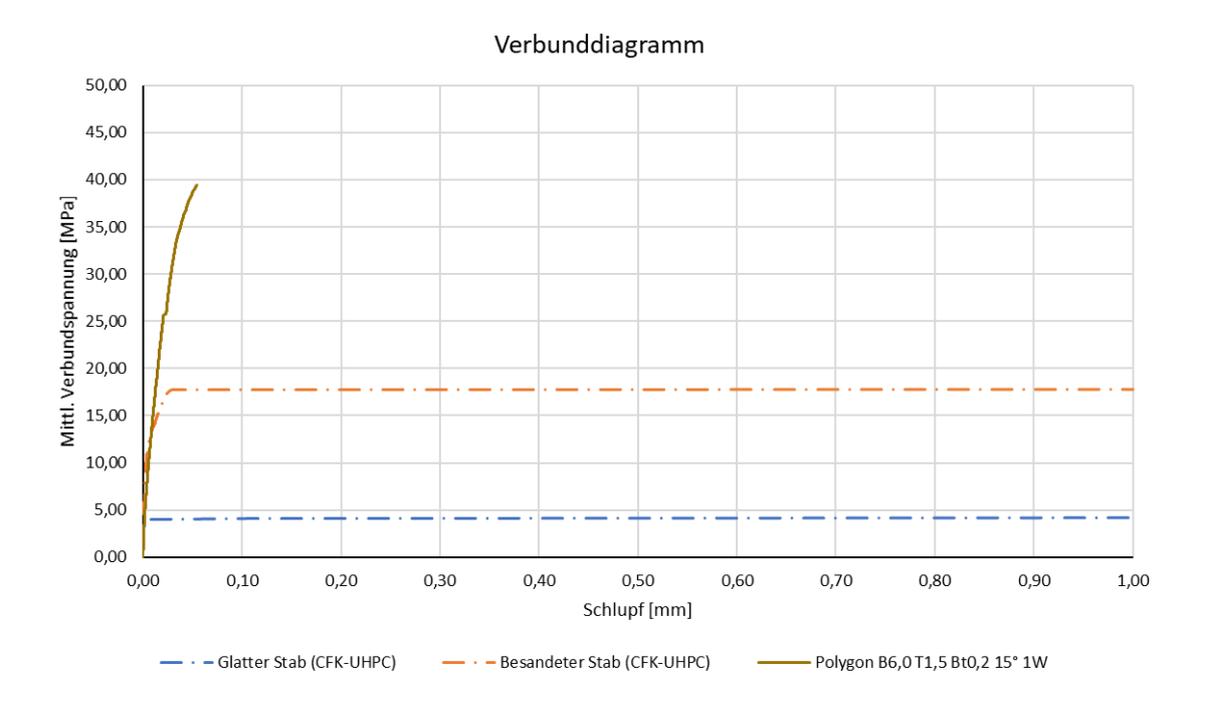


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

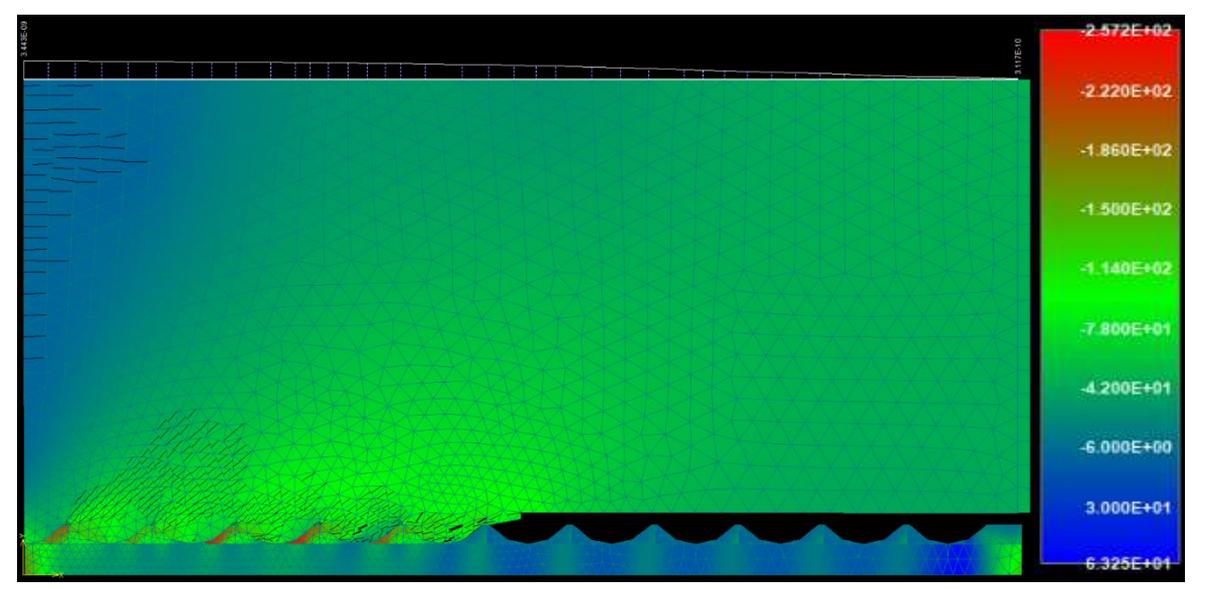


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>39,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,054 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



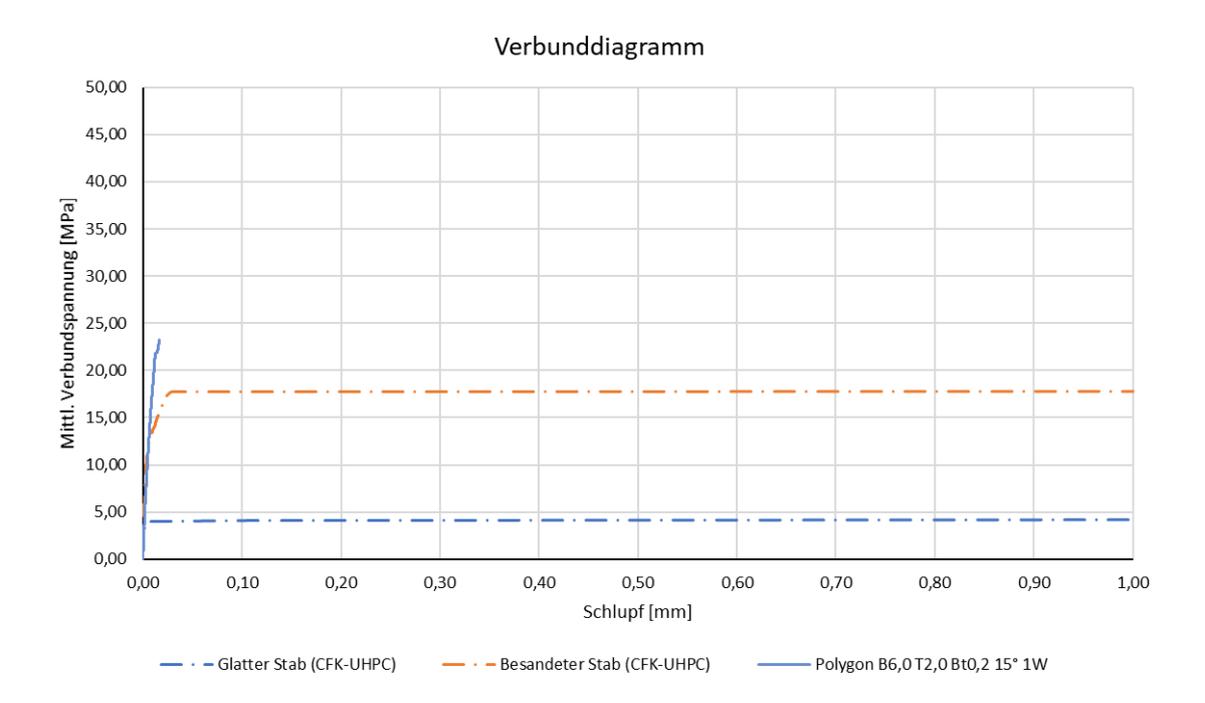
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



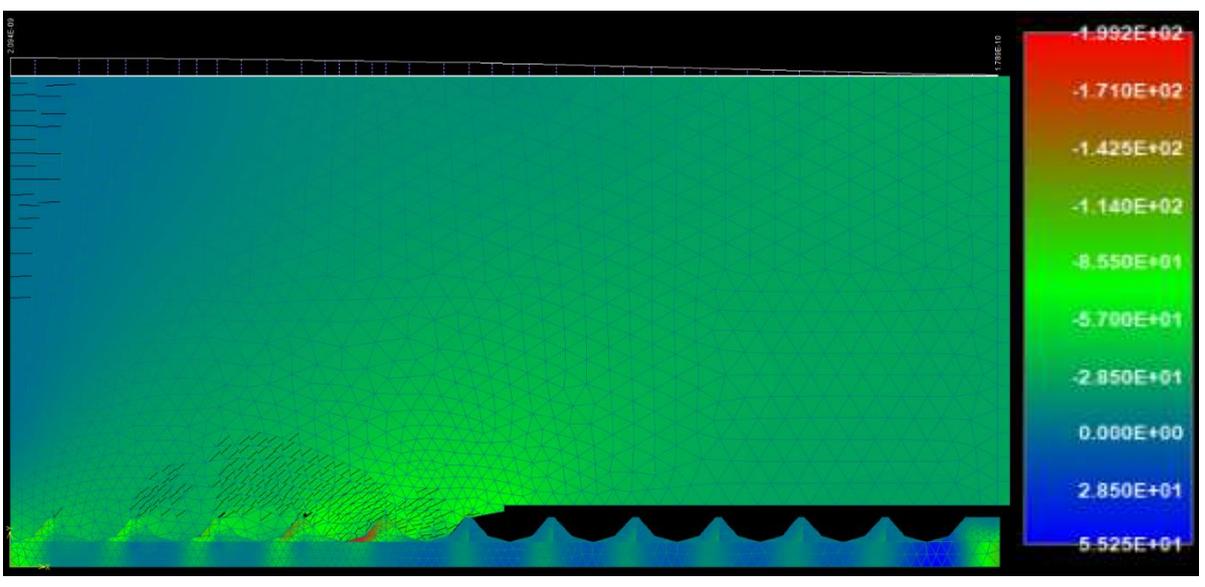
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	15°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>23,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,016 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

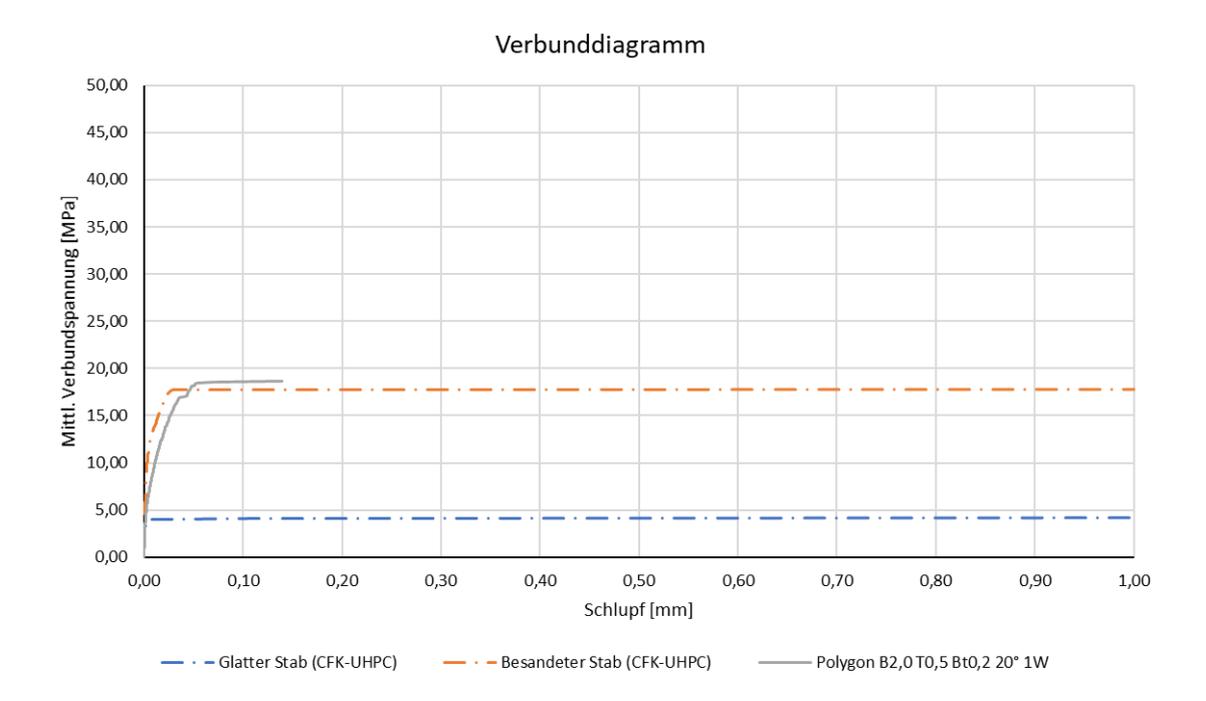


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

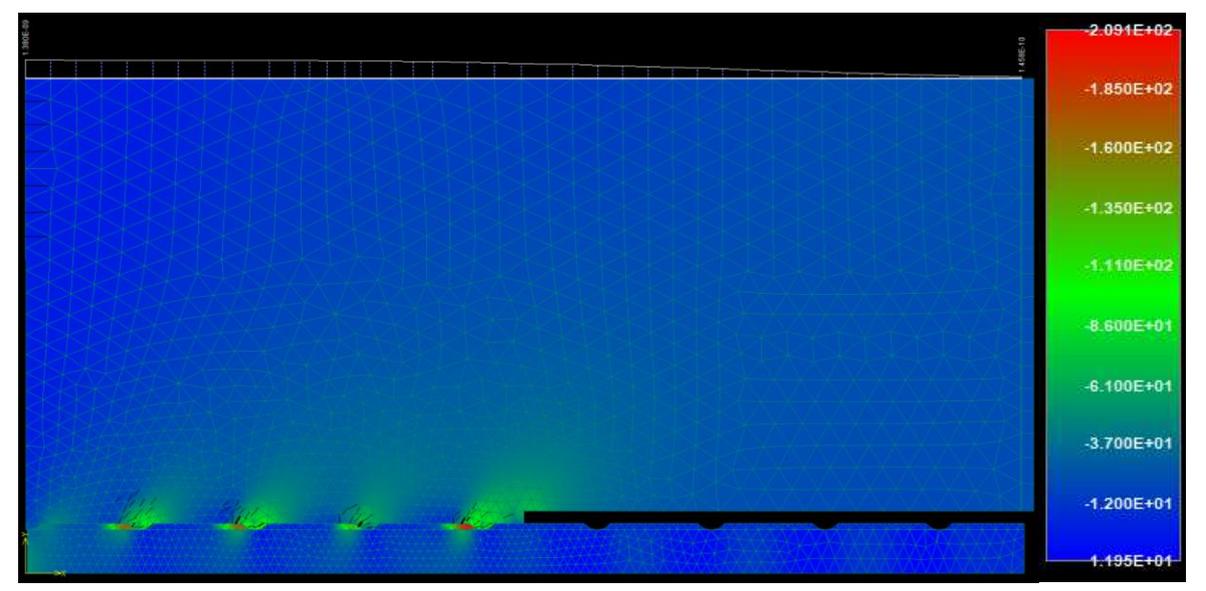


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>18,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,140 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



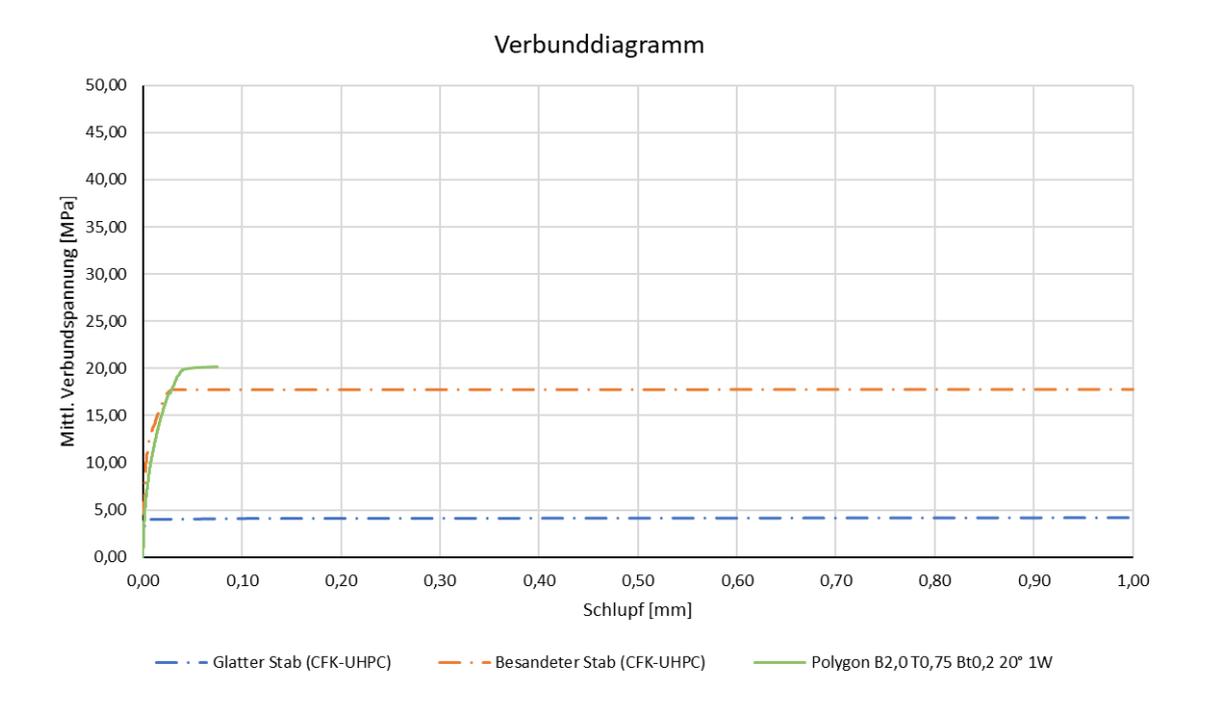
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



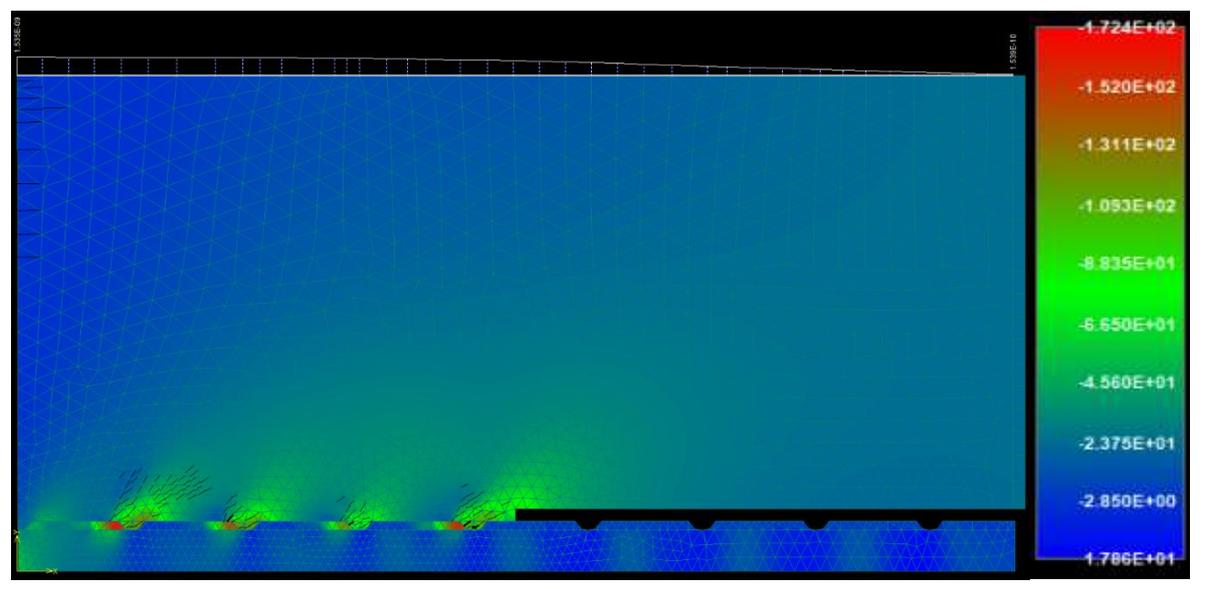
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>20,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,075 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

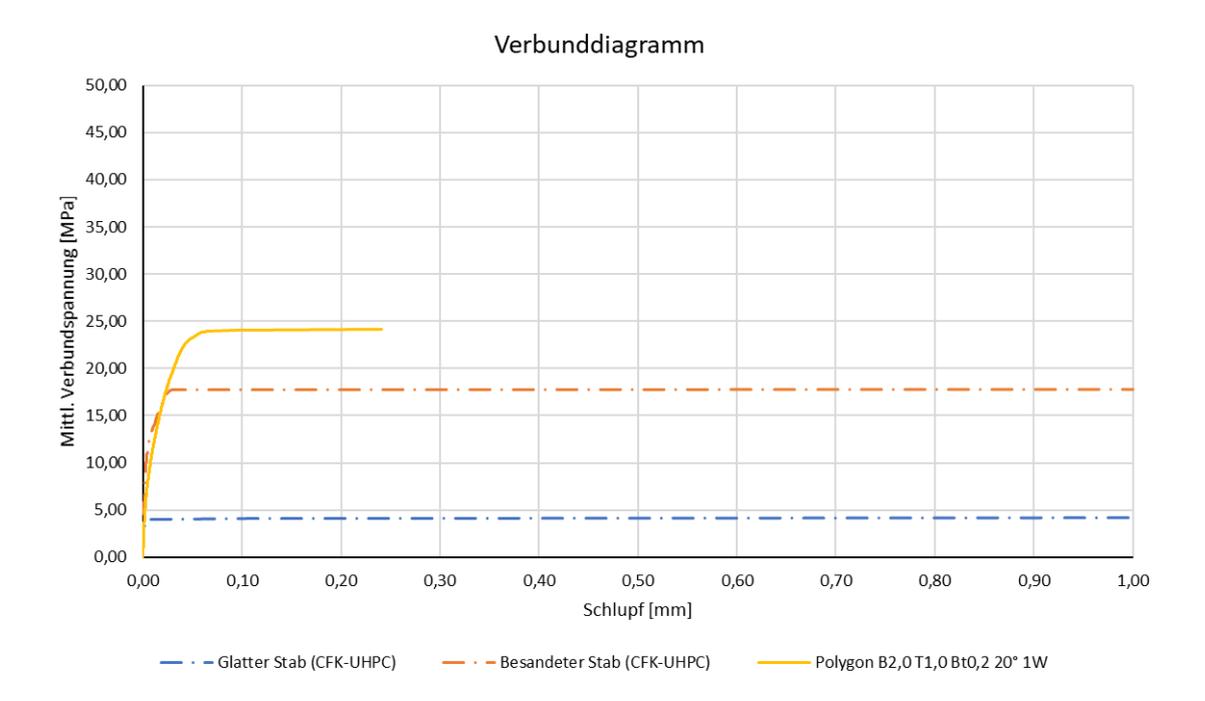


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

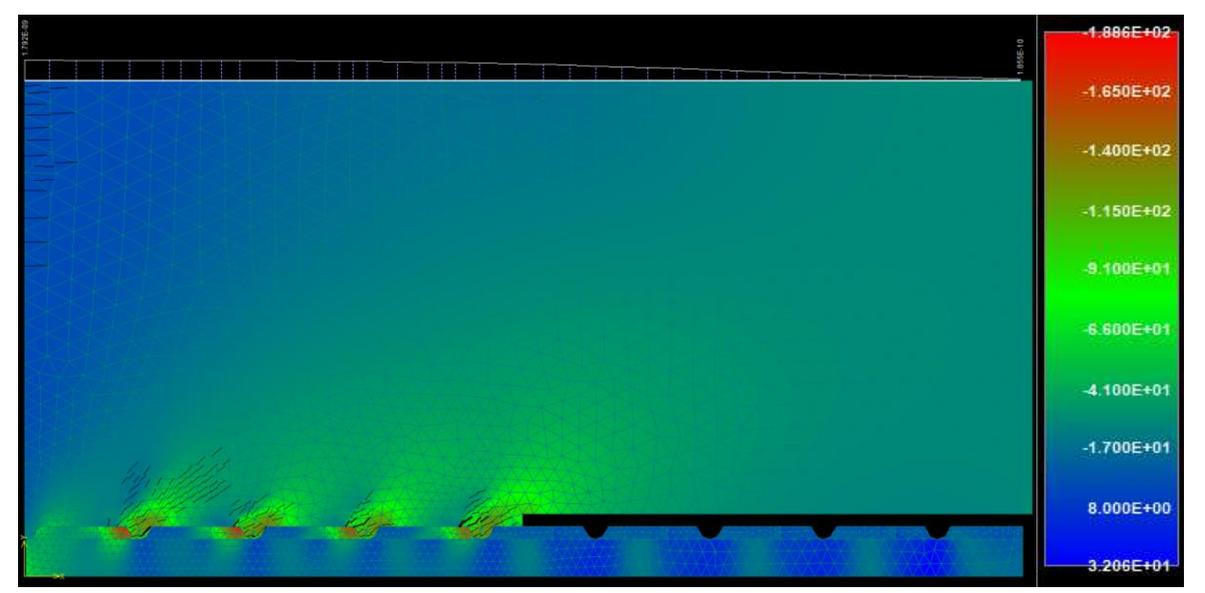


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>24,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,241 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

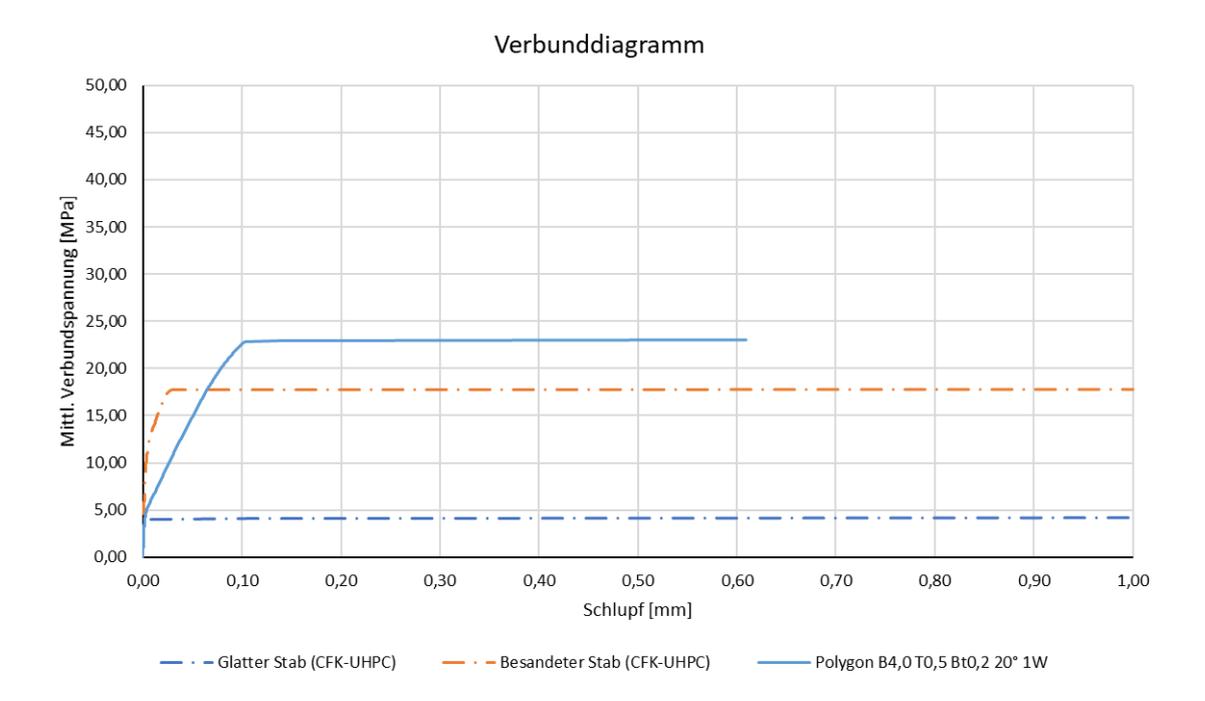


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

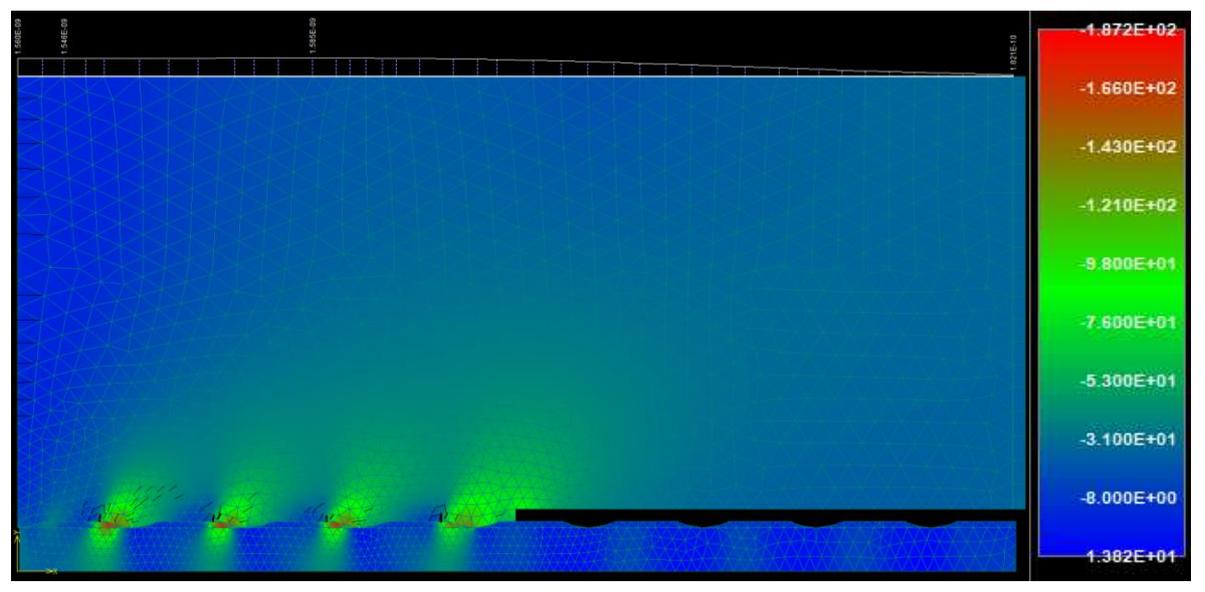


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>22,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,136 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

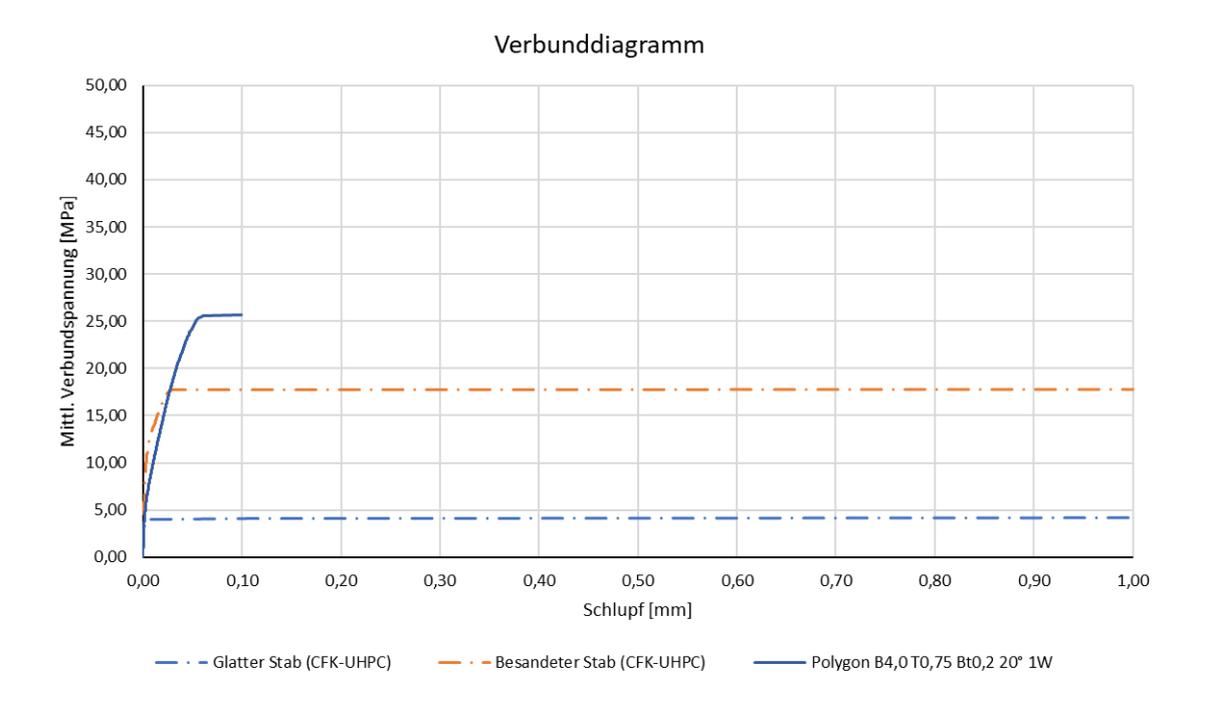


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

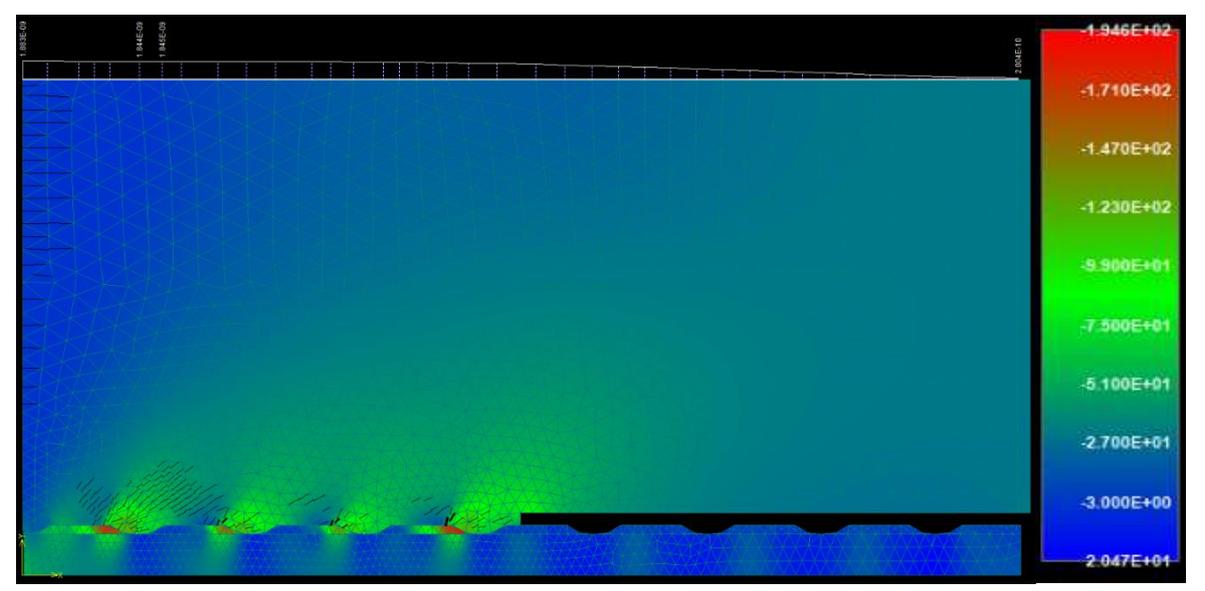


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>25,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,100 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



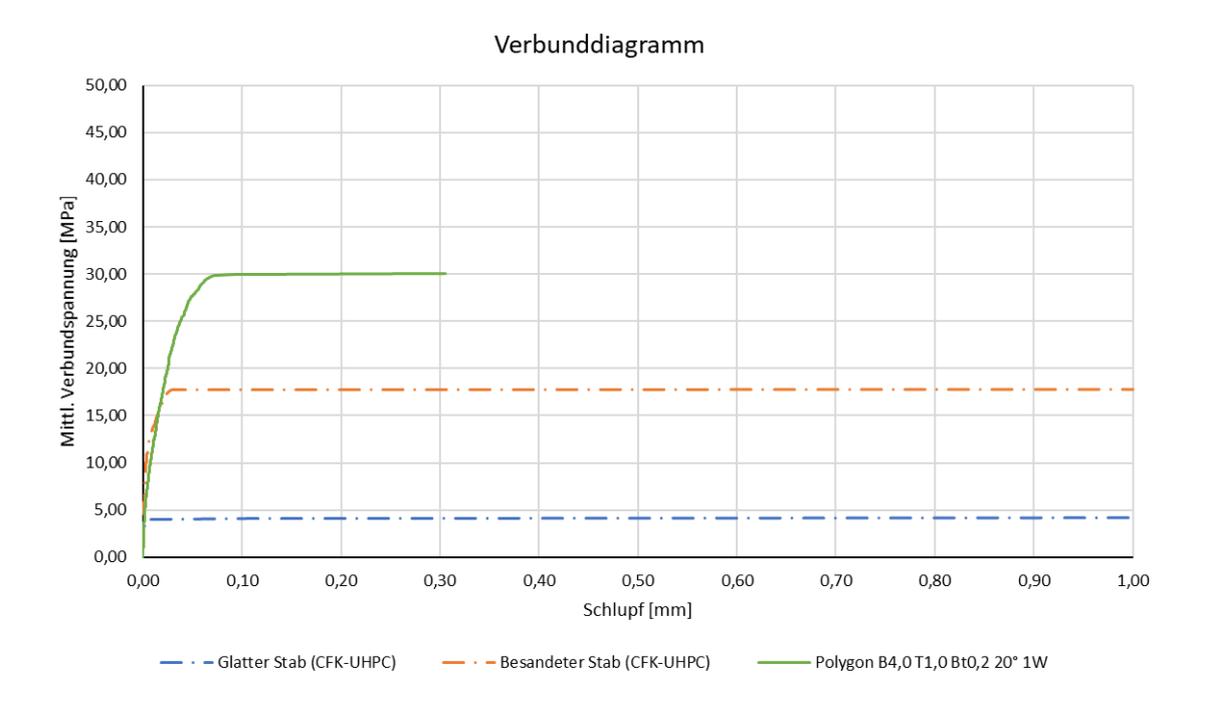
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



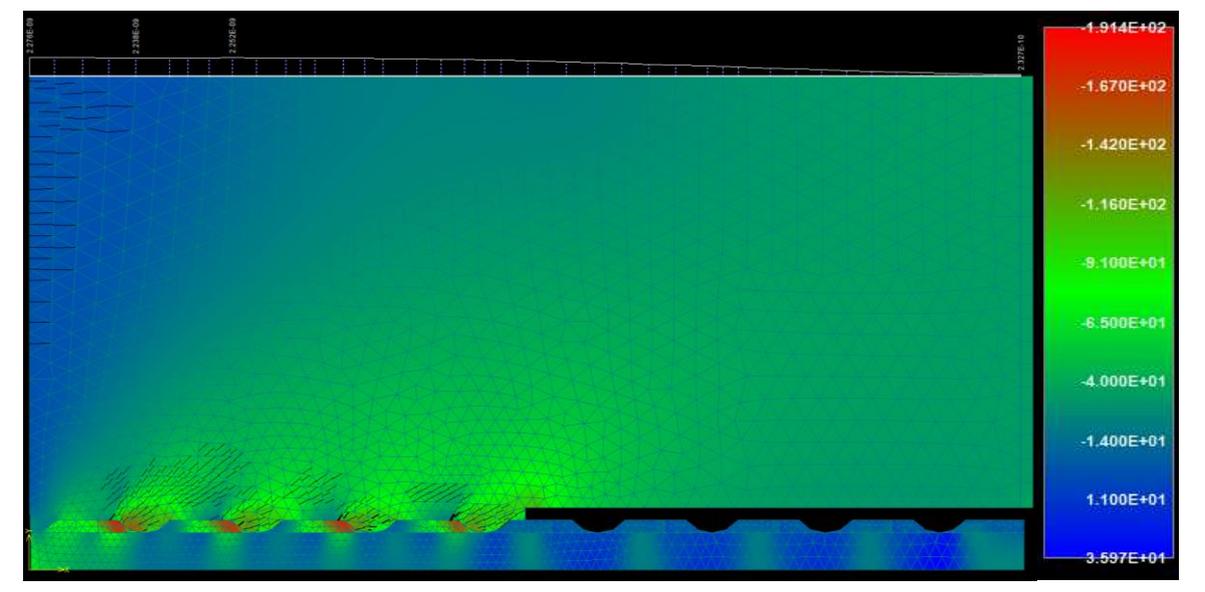
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>30,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,305 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

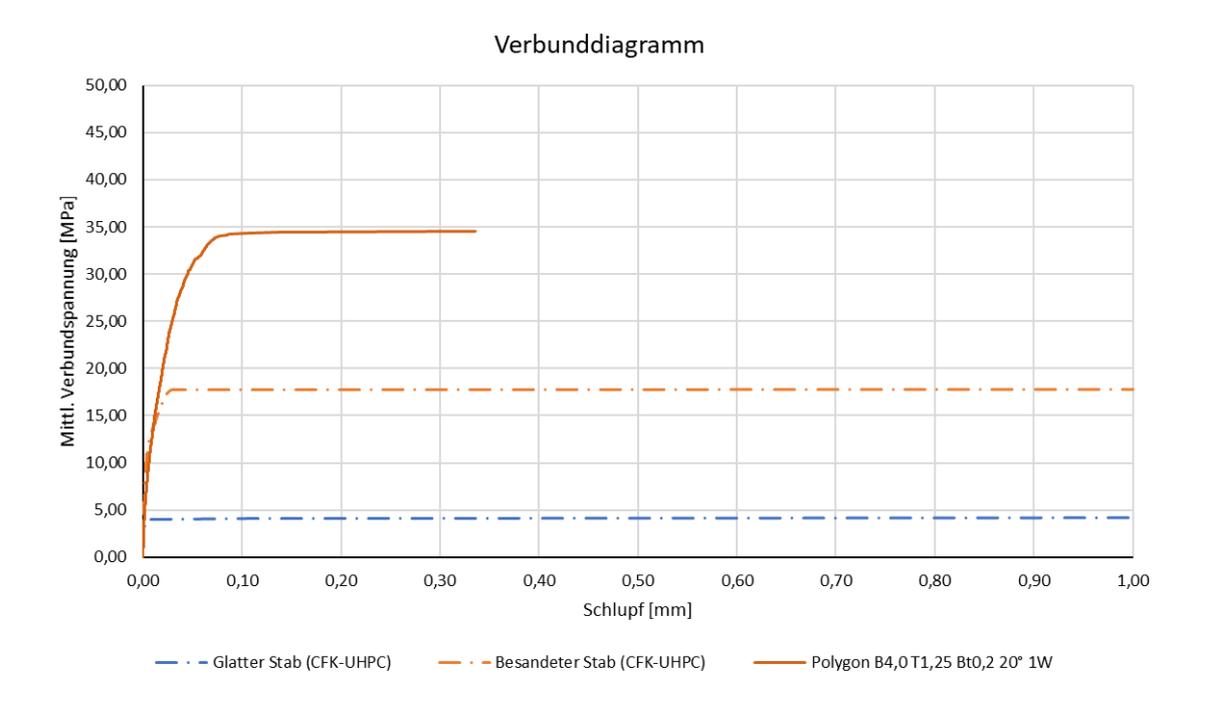


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

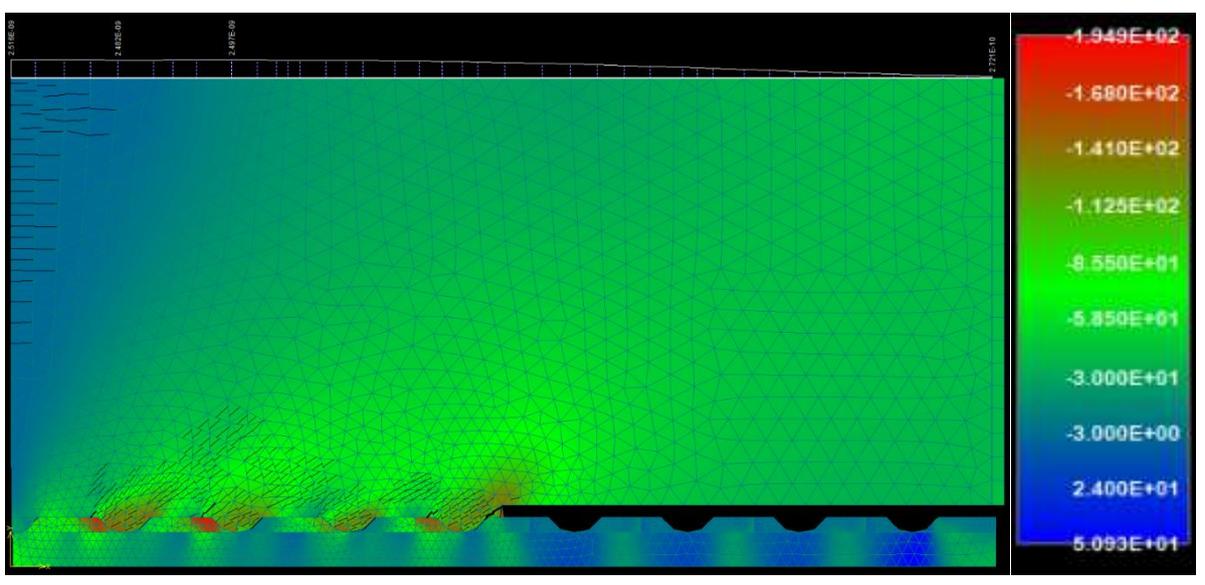


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>34,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,336 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

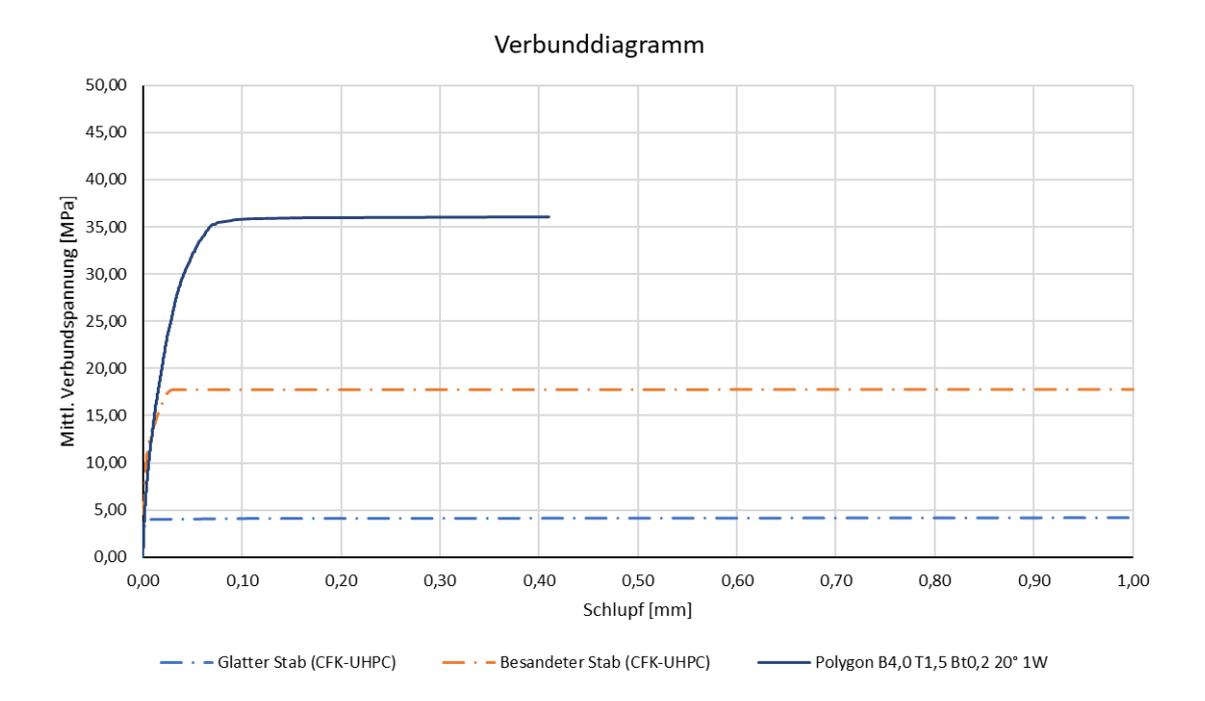


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

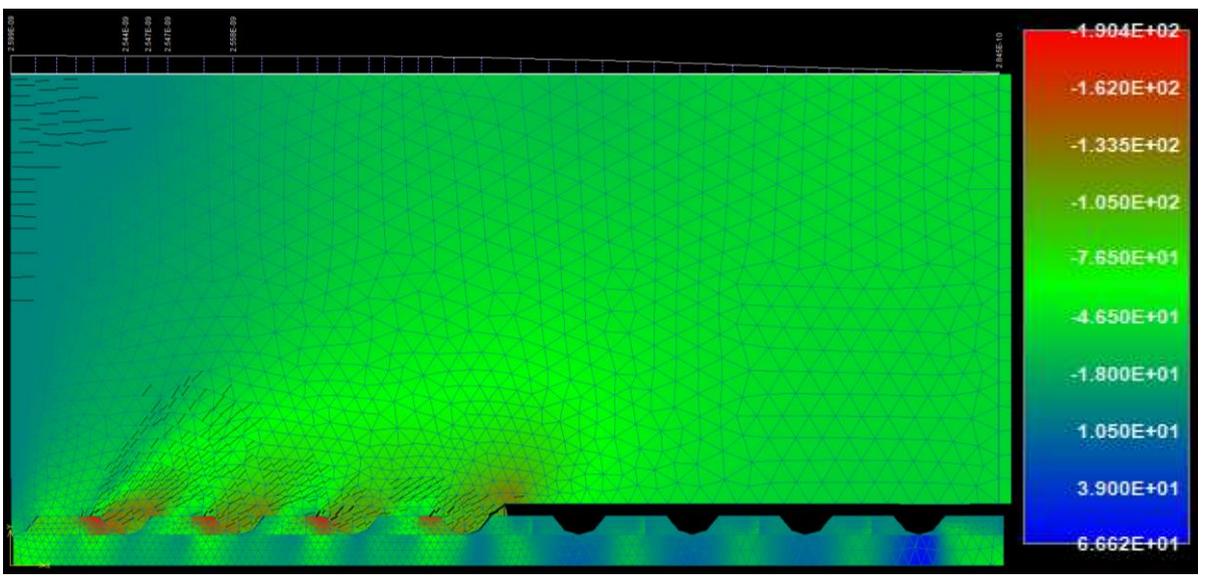


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>36,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,161 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

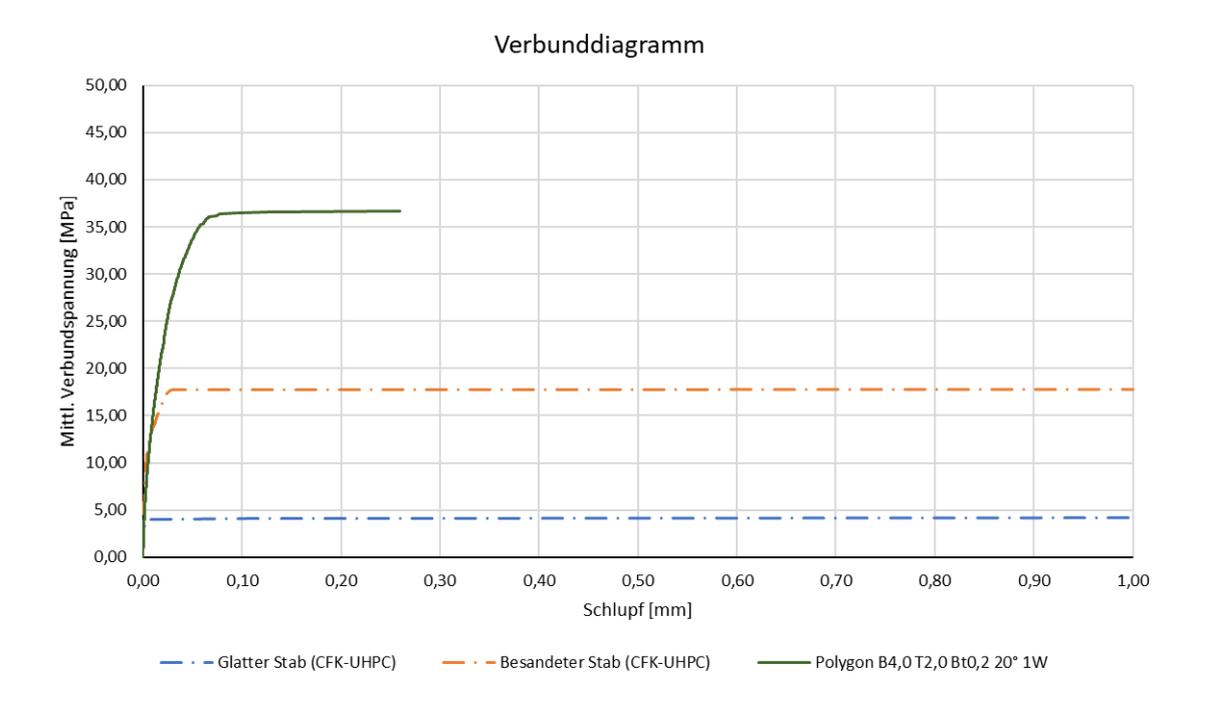


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

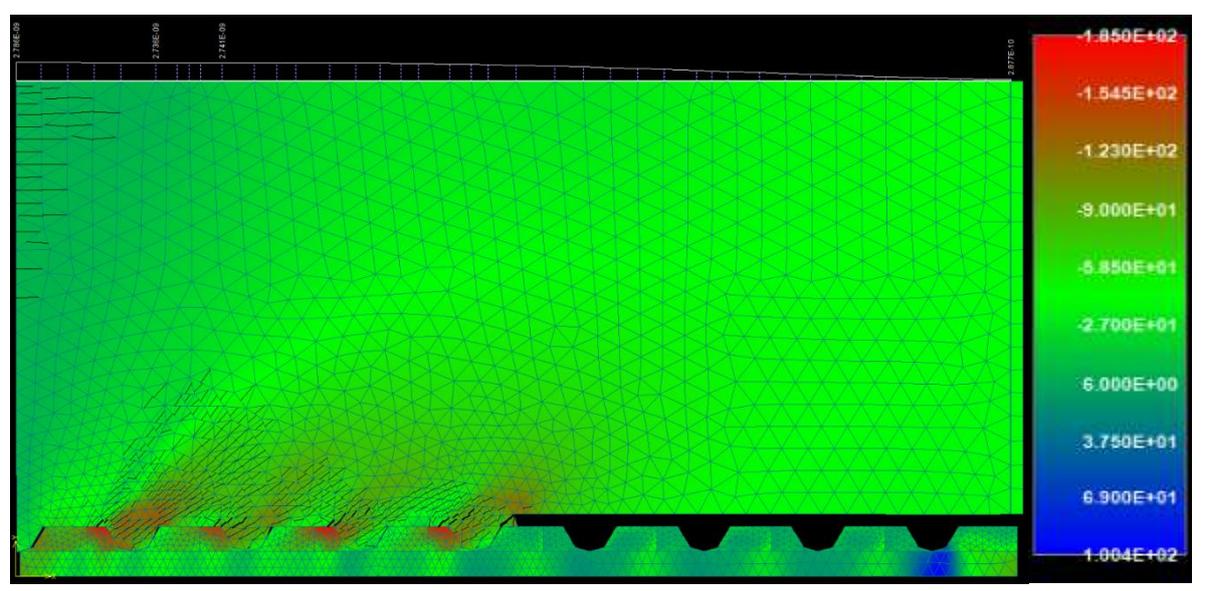


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>36,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,260 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



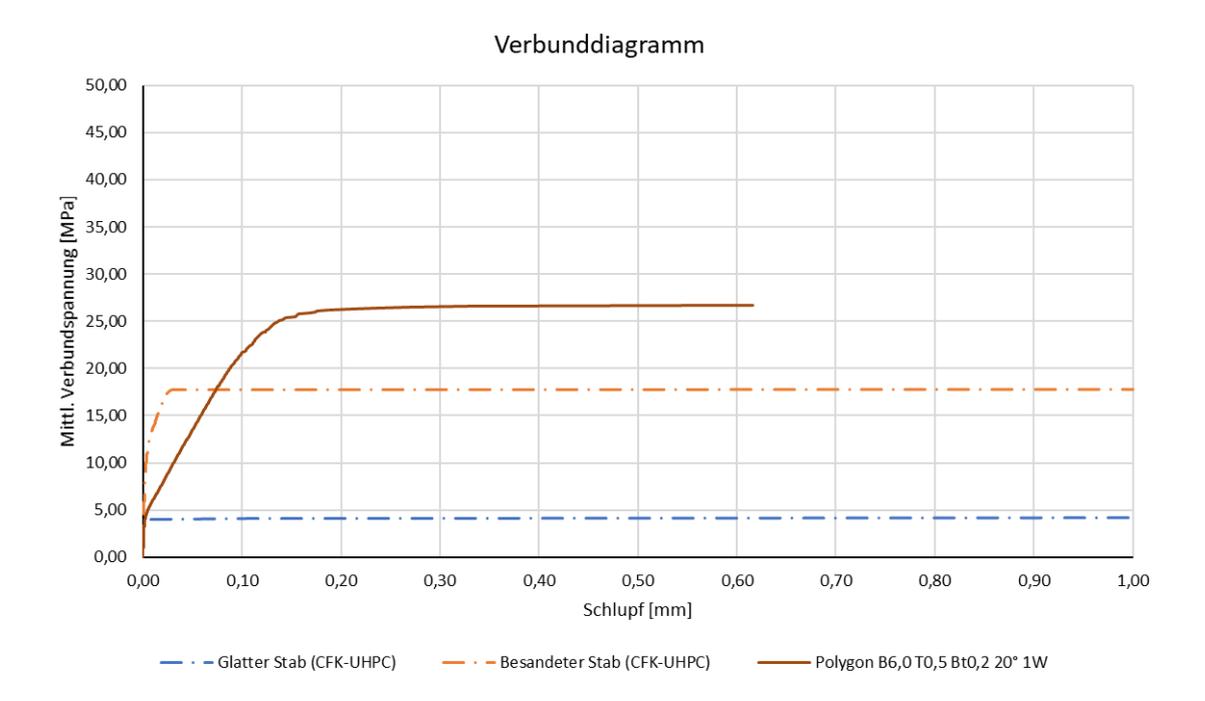
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



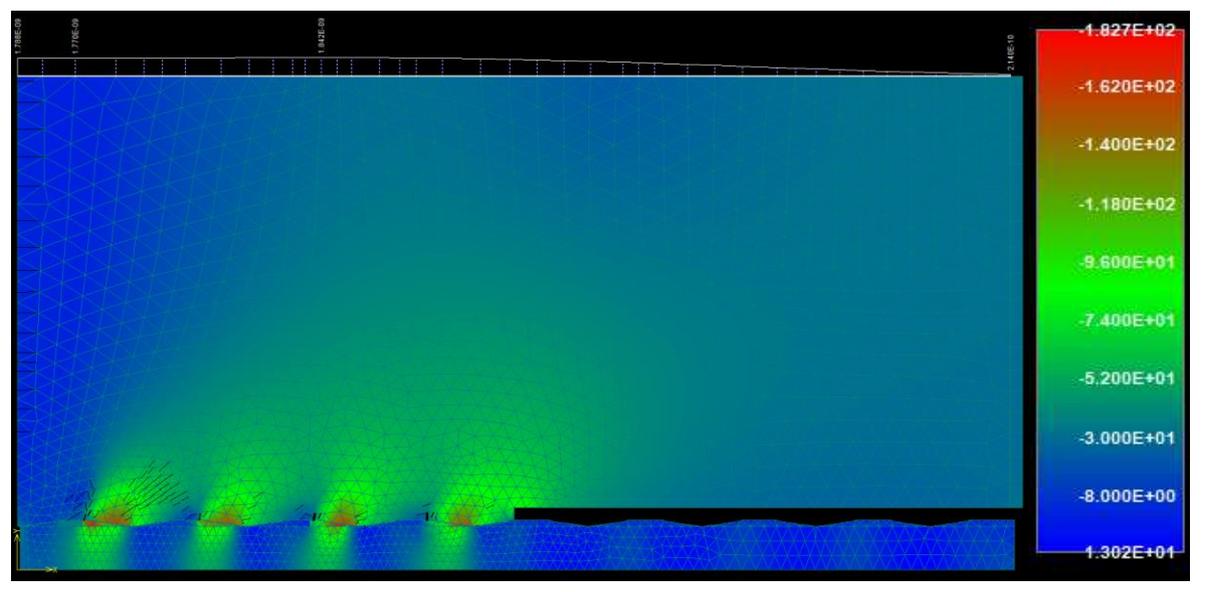
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>26,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,328 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

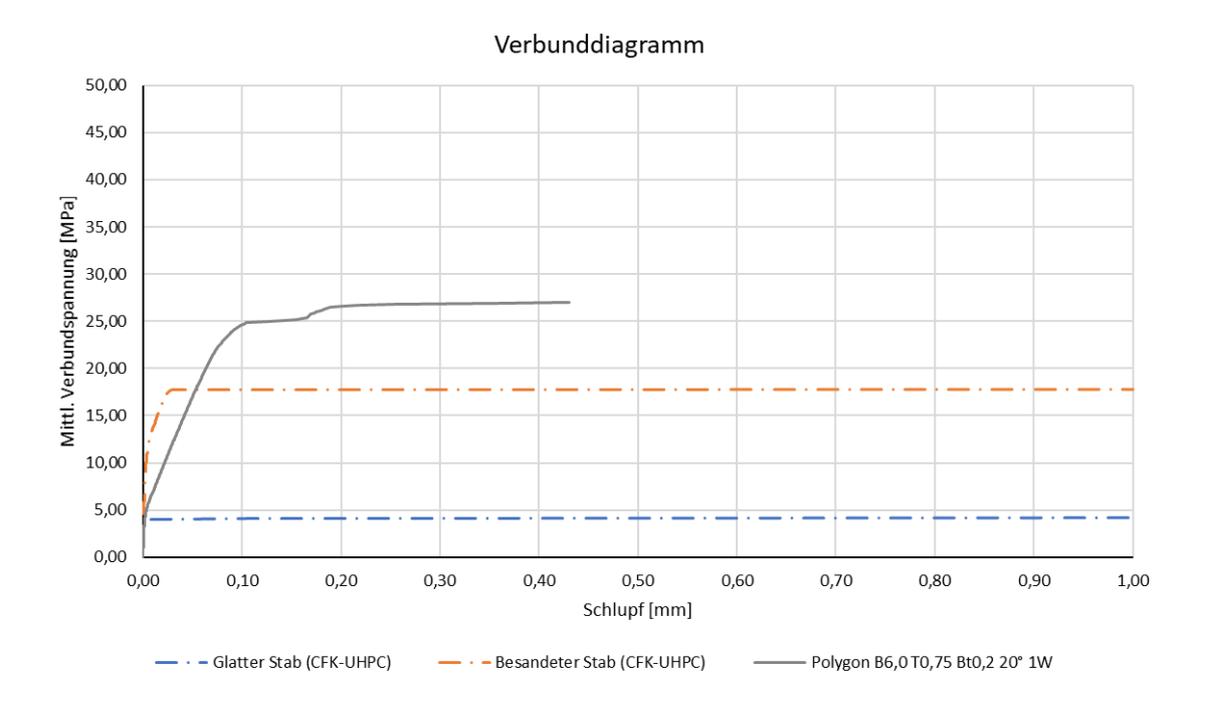


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

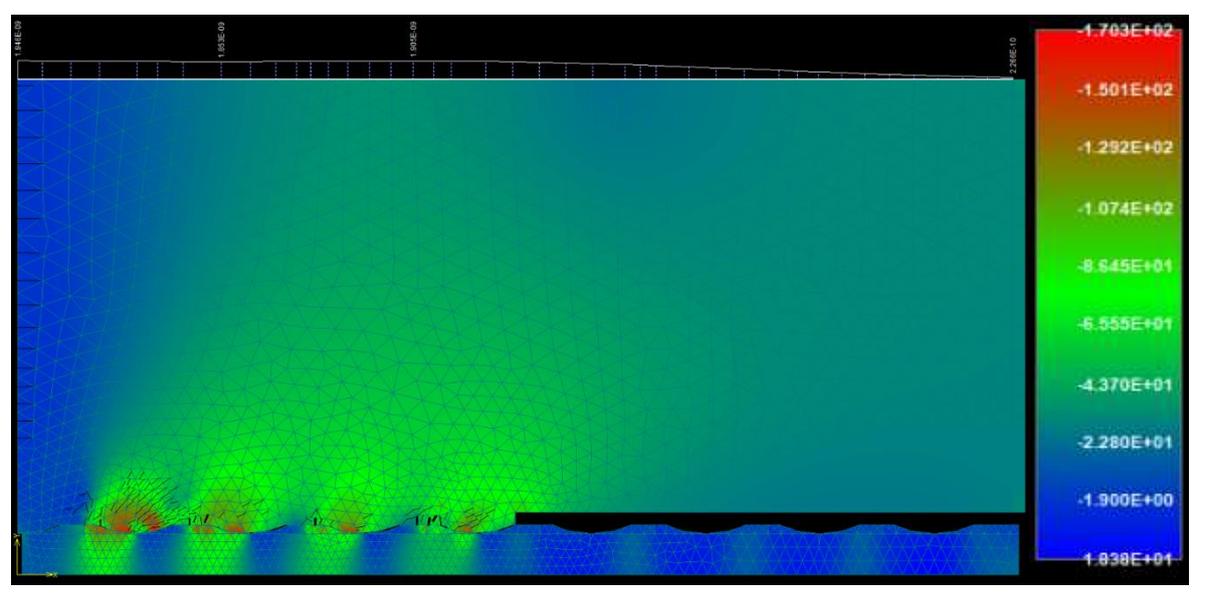


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>26,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,359 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



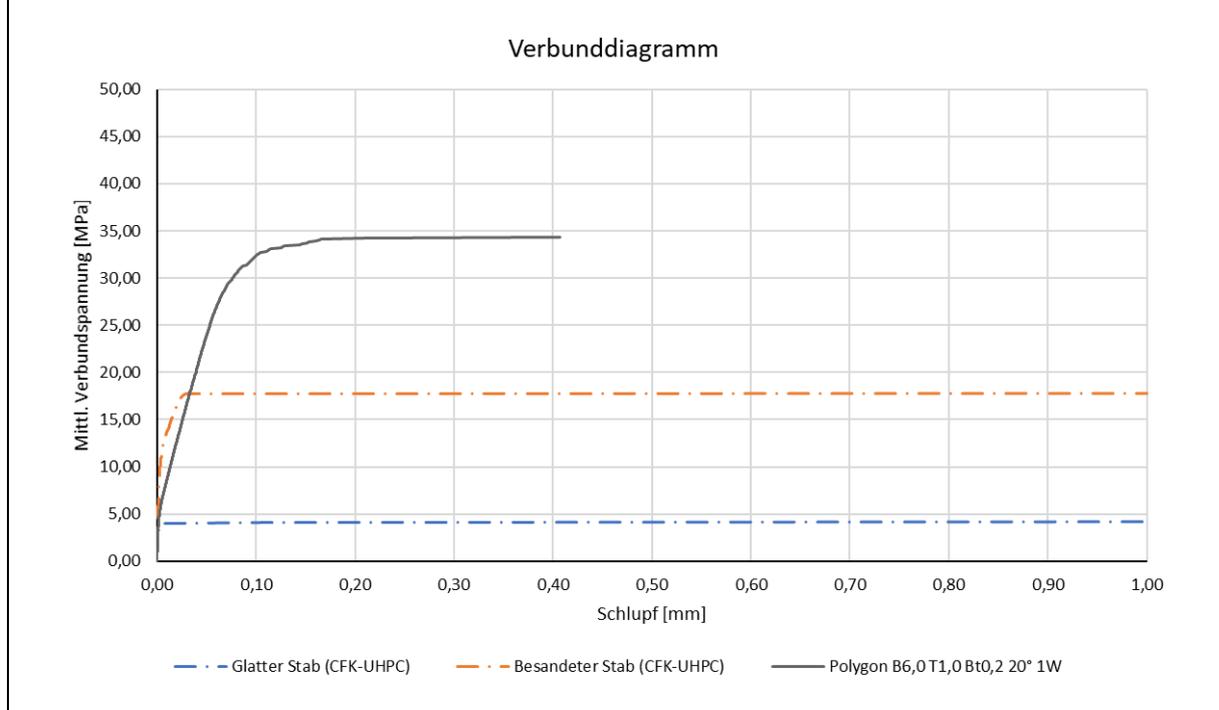
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>34,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,209 mm</b>

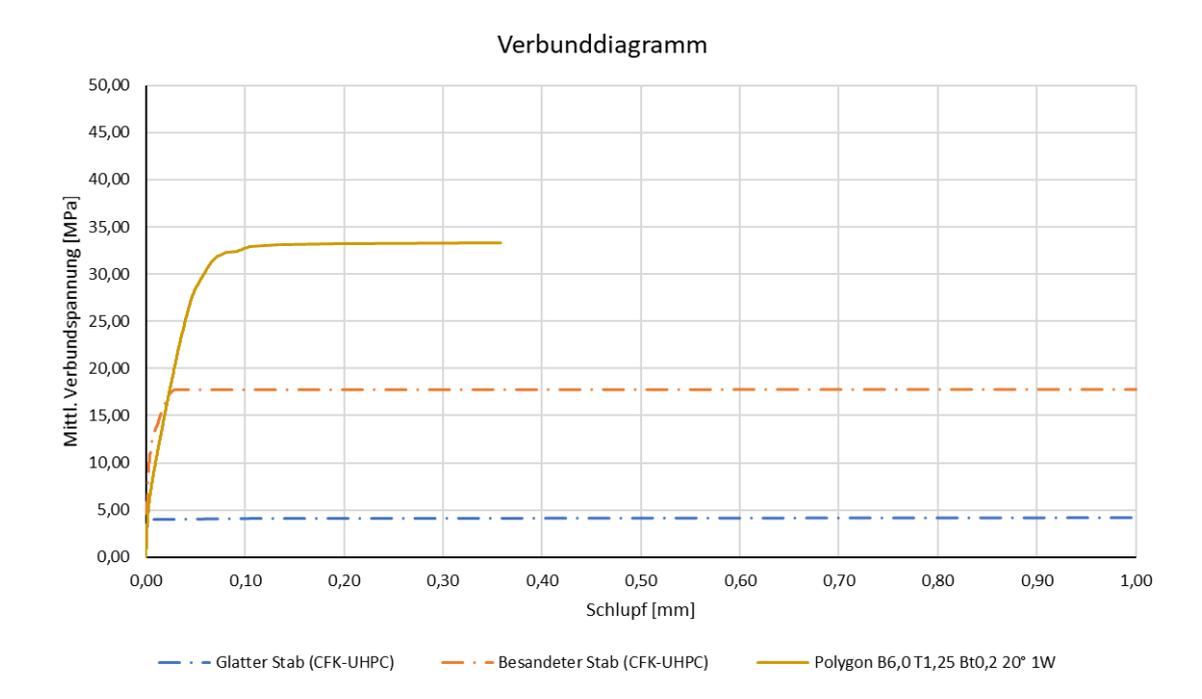
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



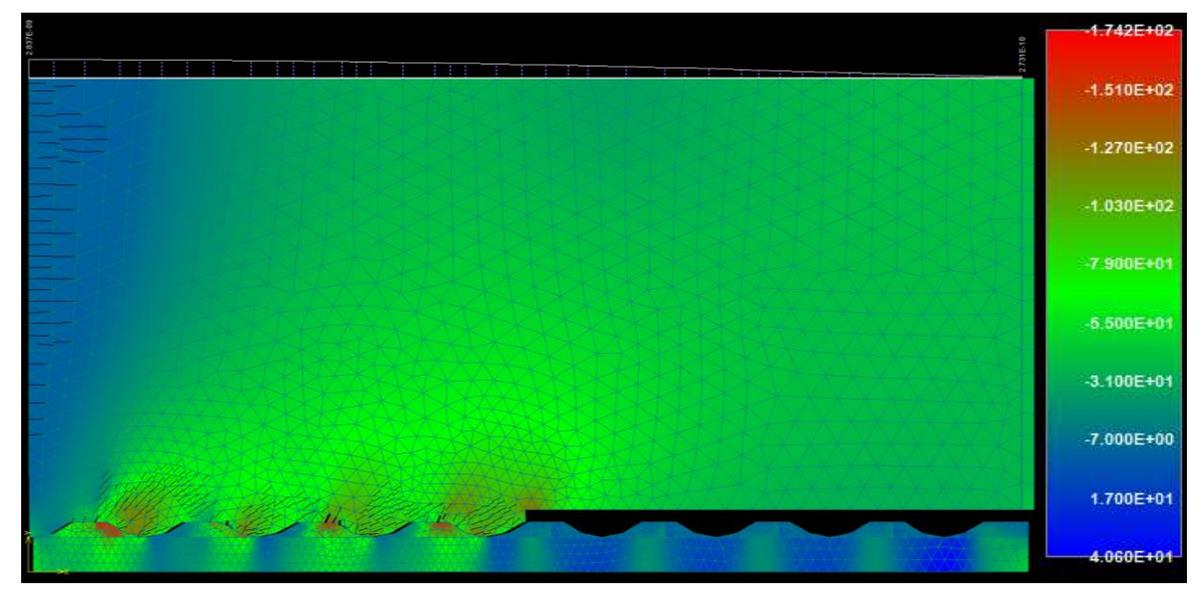
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>33,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,358 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



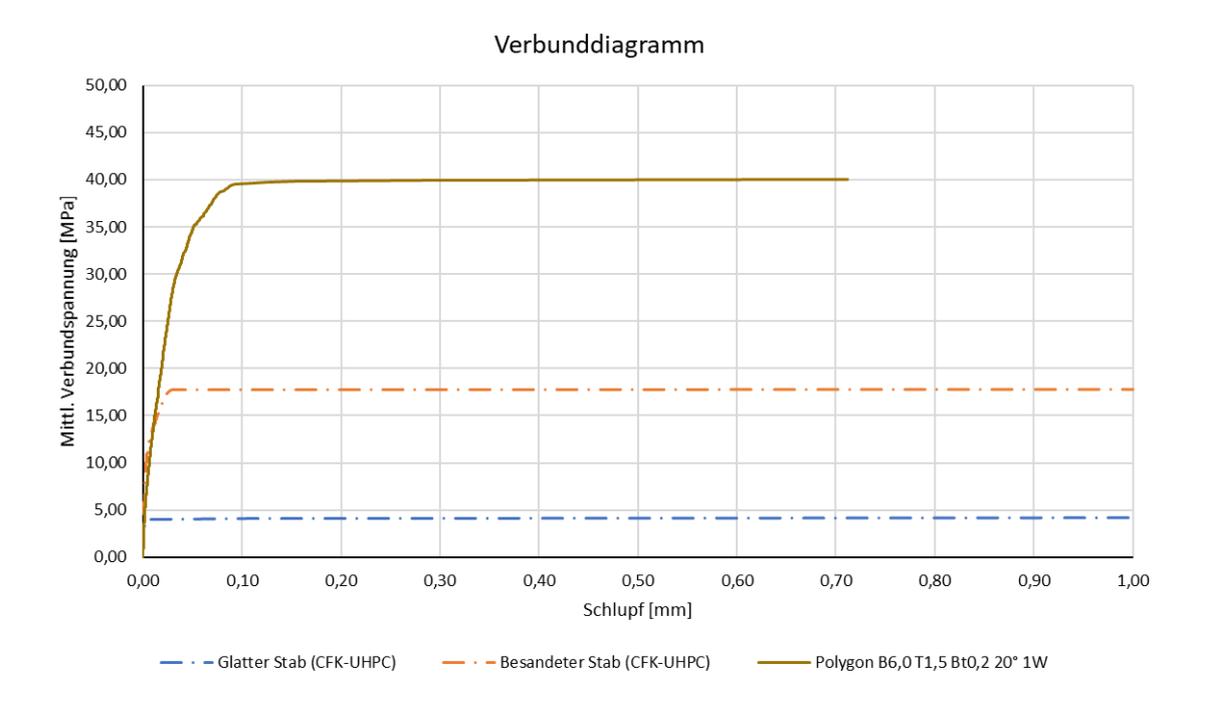
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



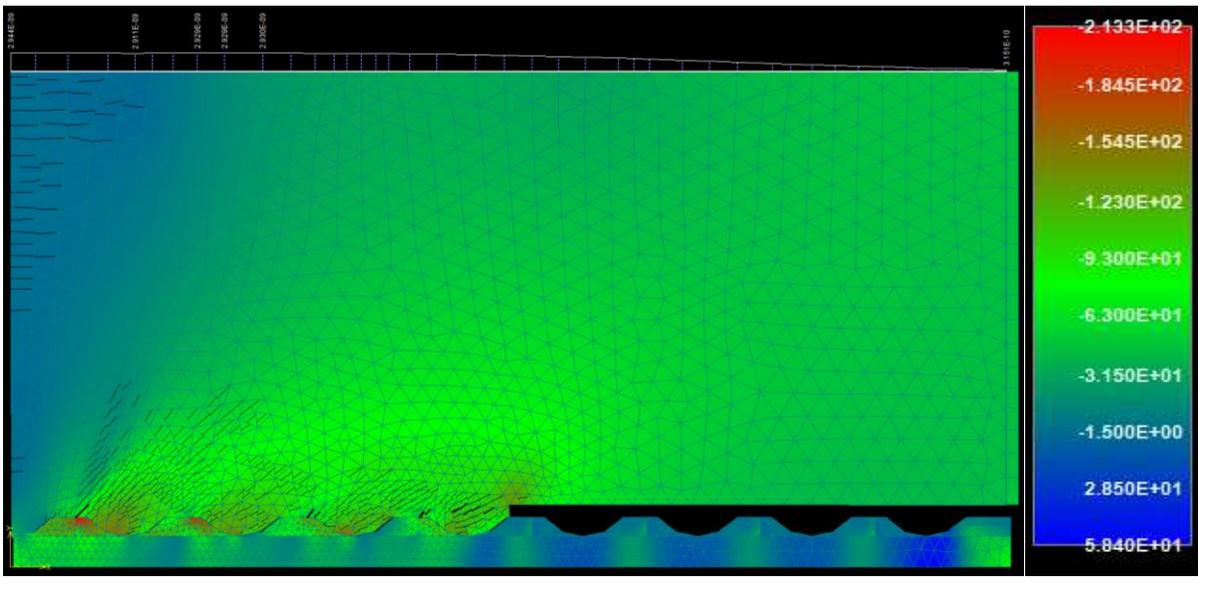
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>39,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,282 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

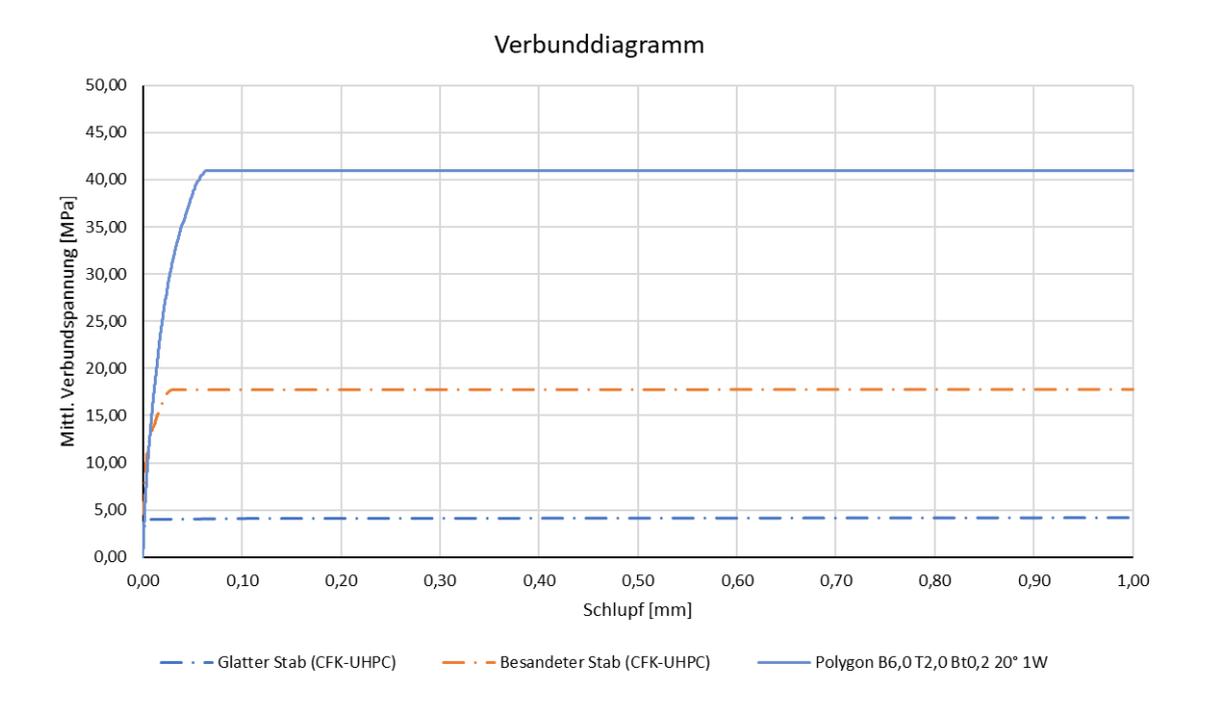


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

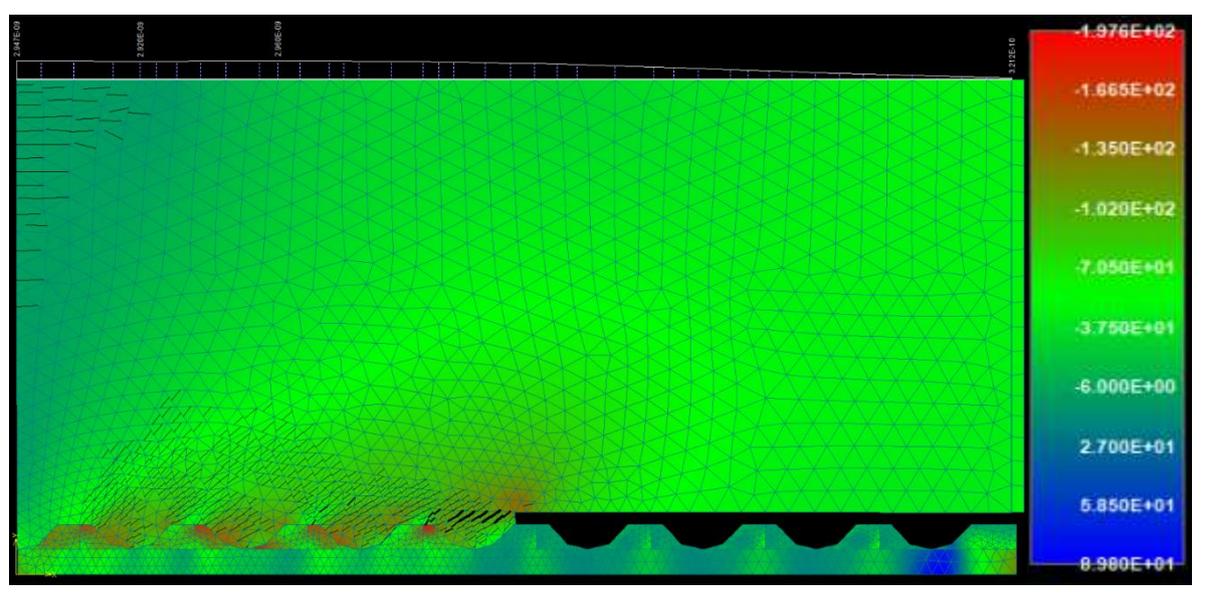


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>40,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,063 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



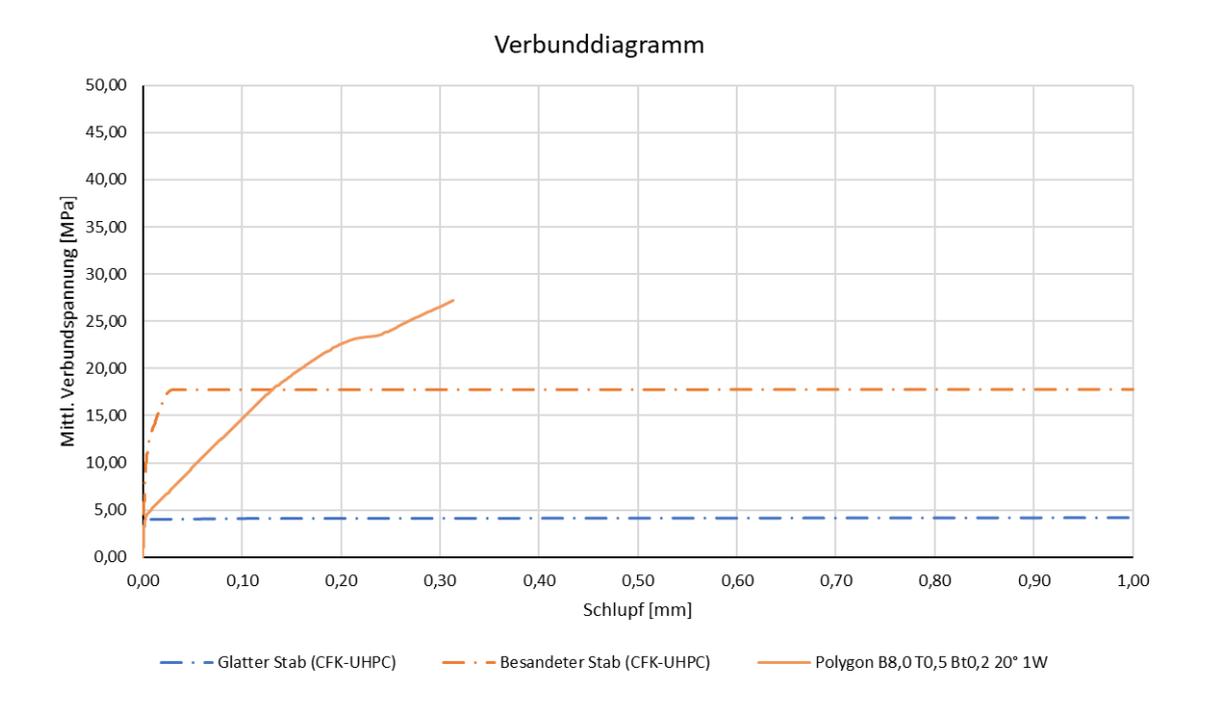
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



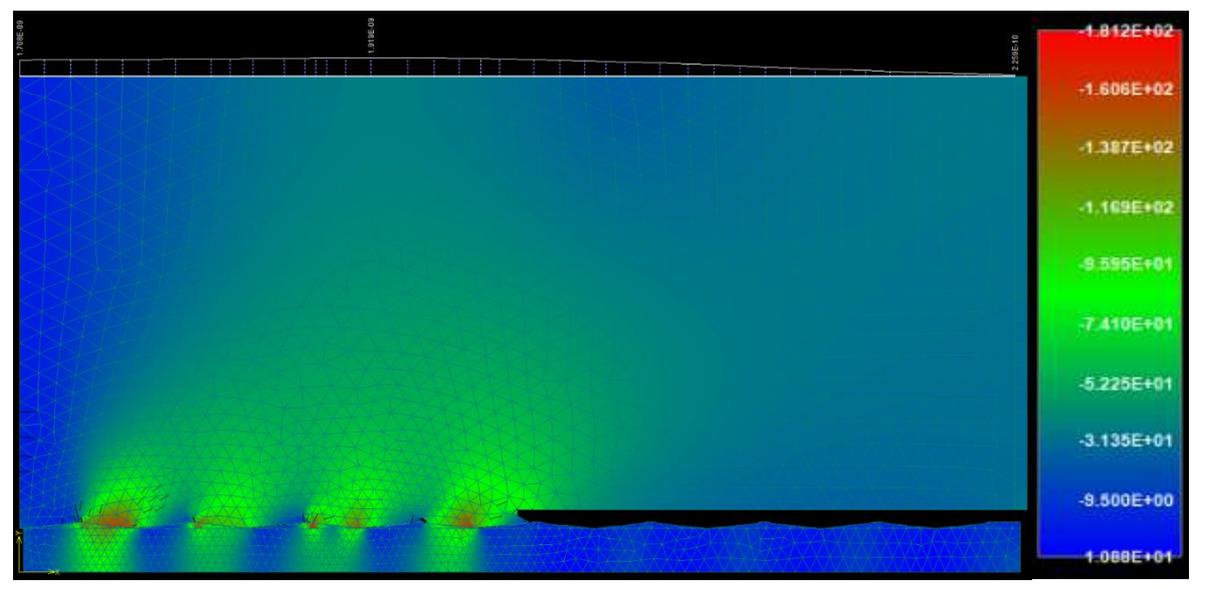
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>27,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,314 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

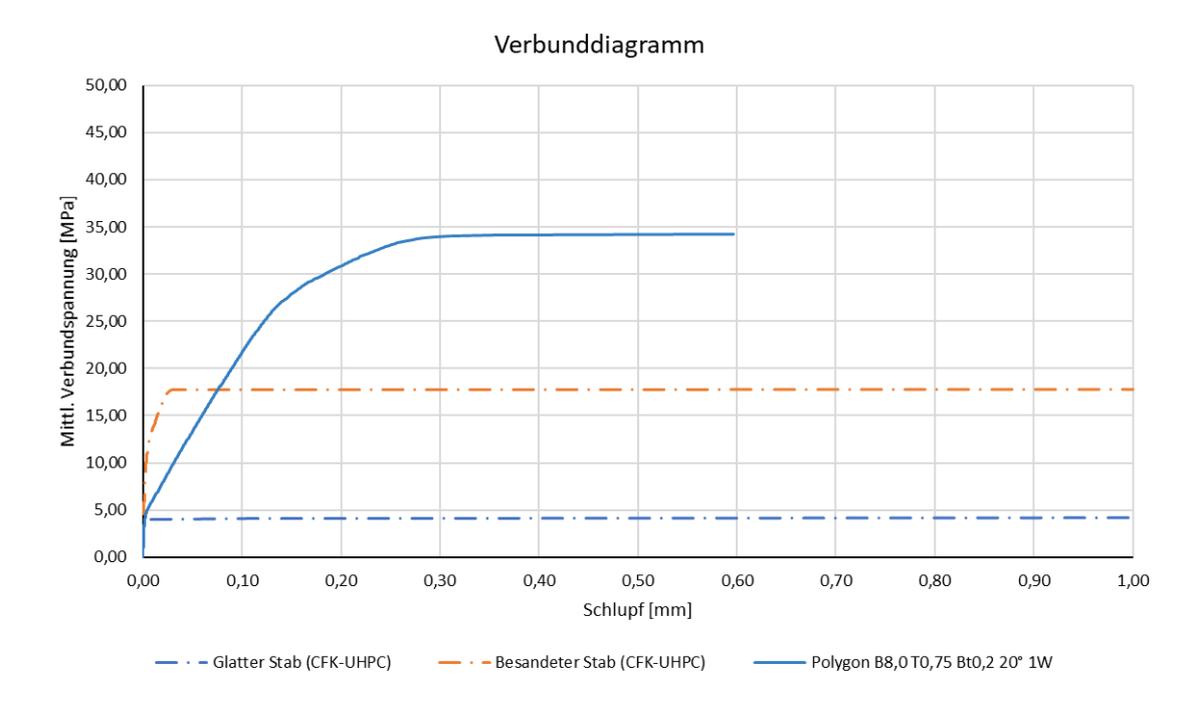


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

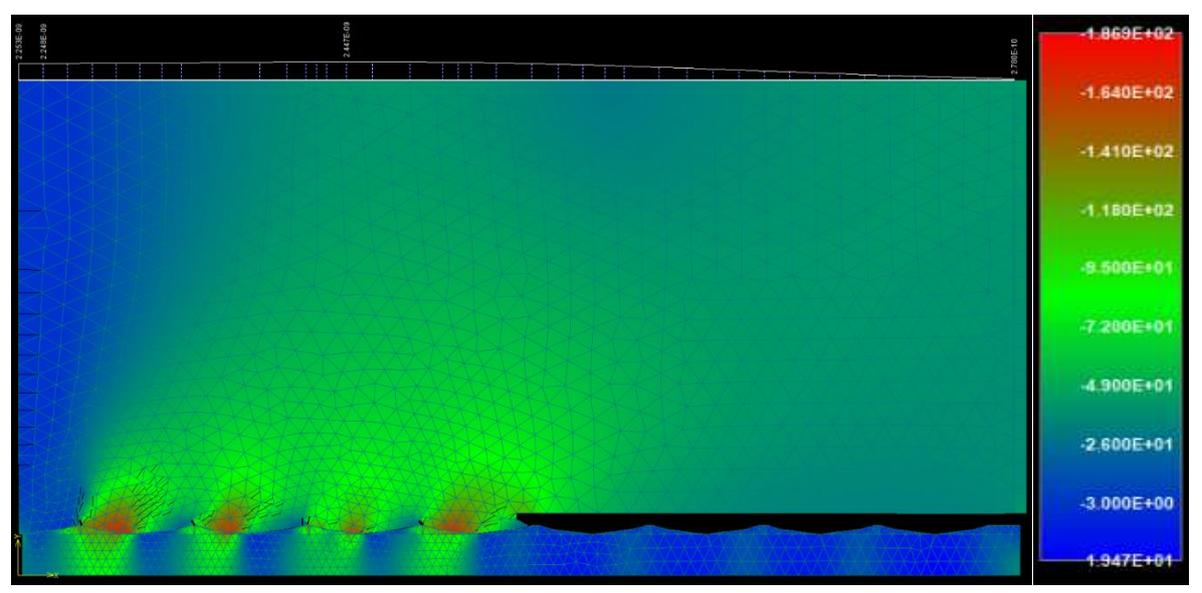


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>34,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,353 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

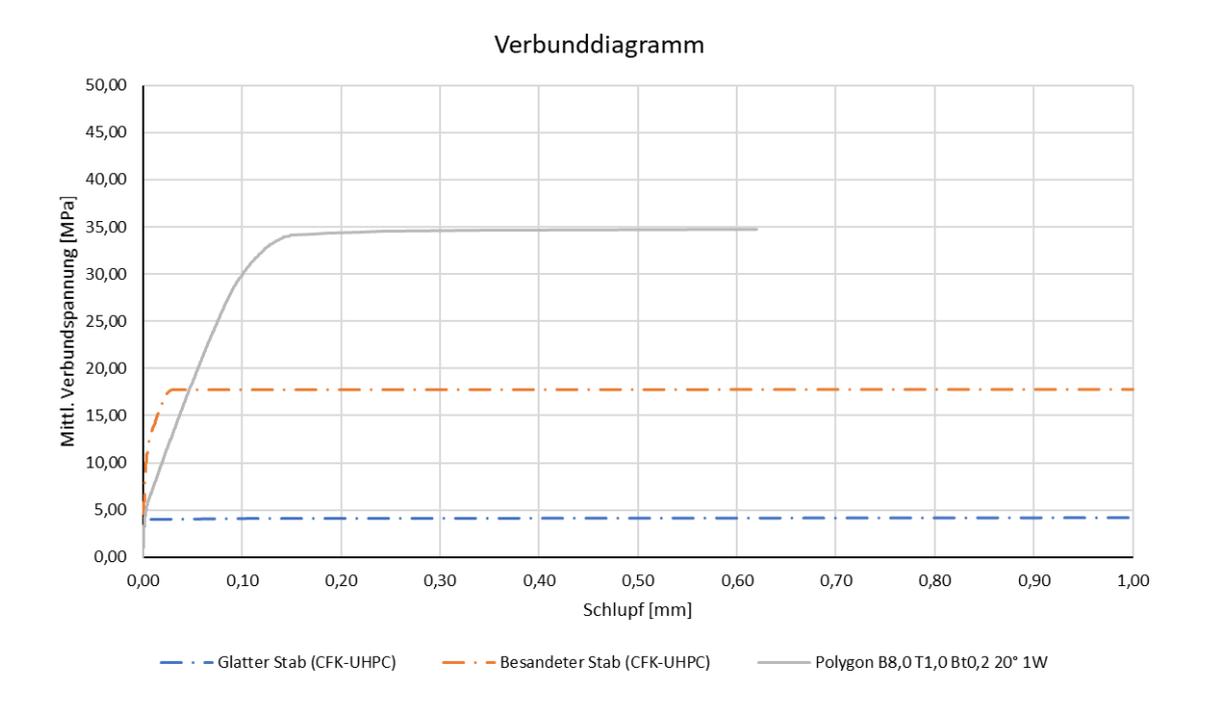


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

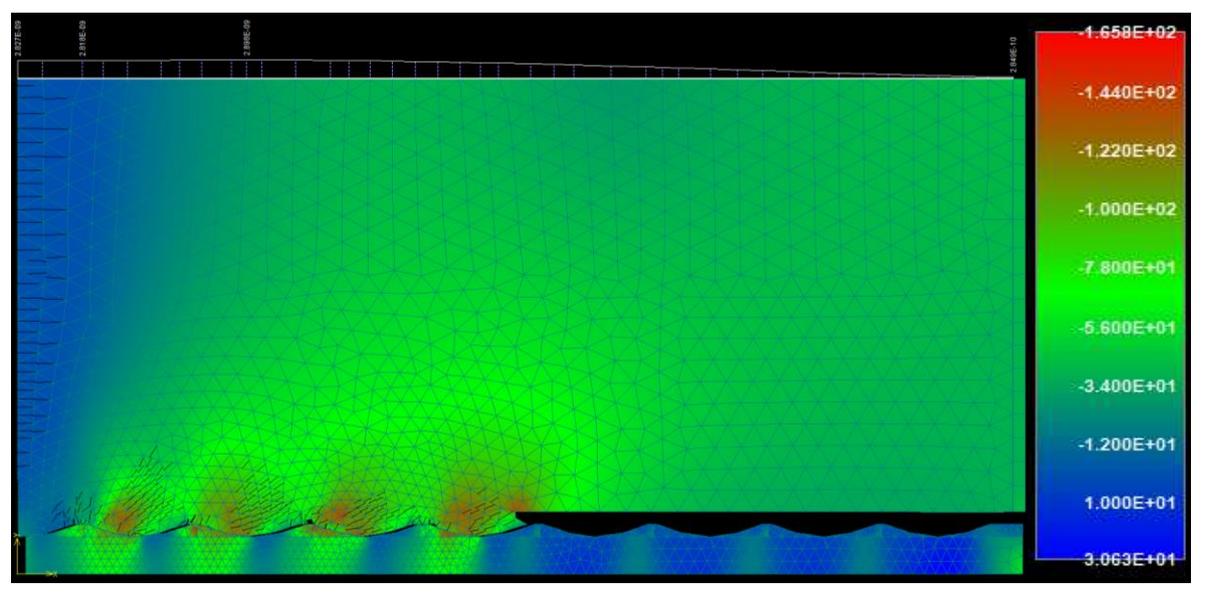


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>34,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,340 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

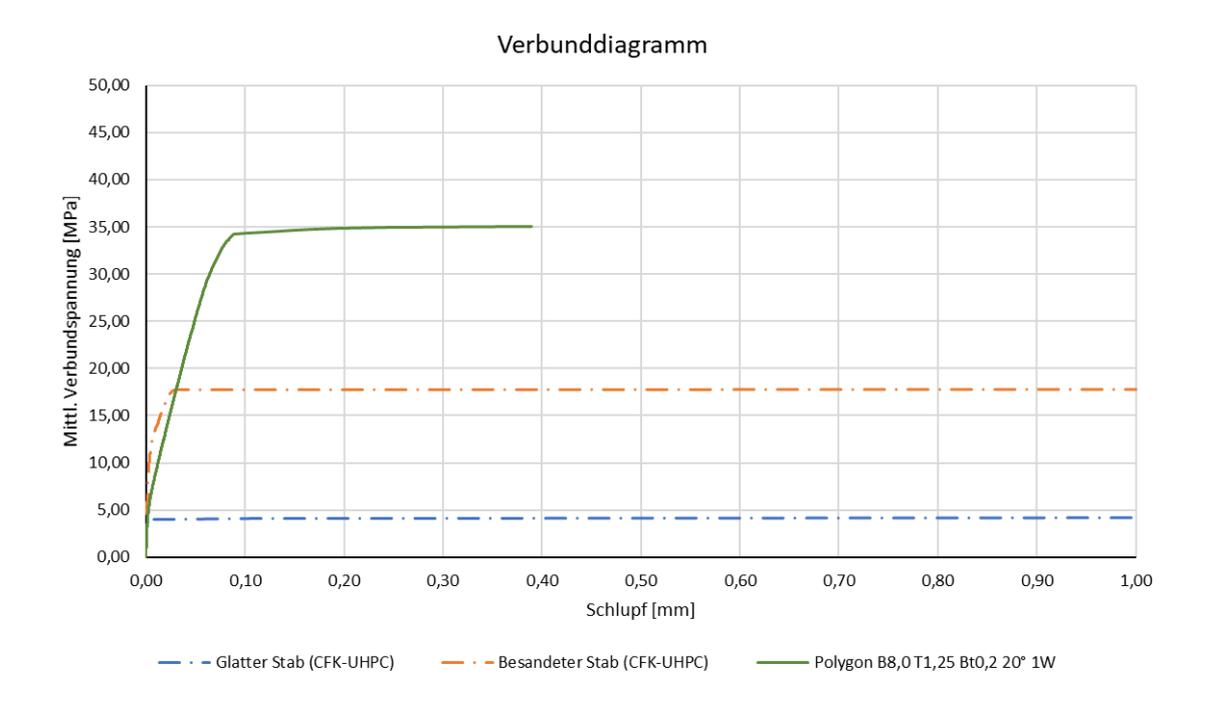


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

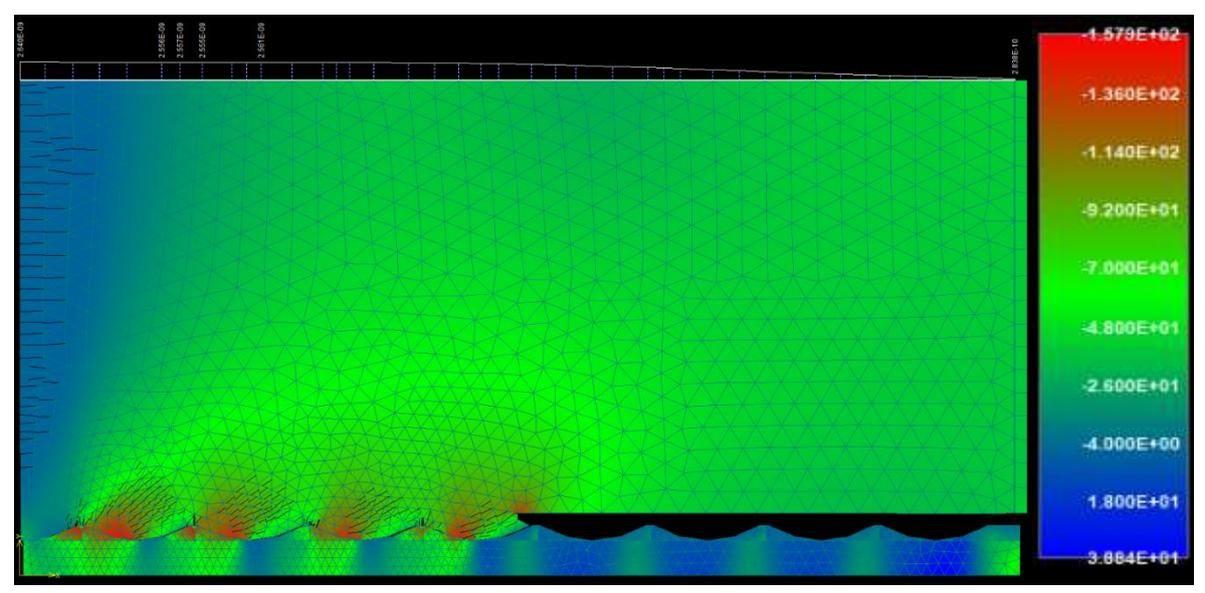


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>35,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,390 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



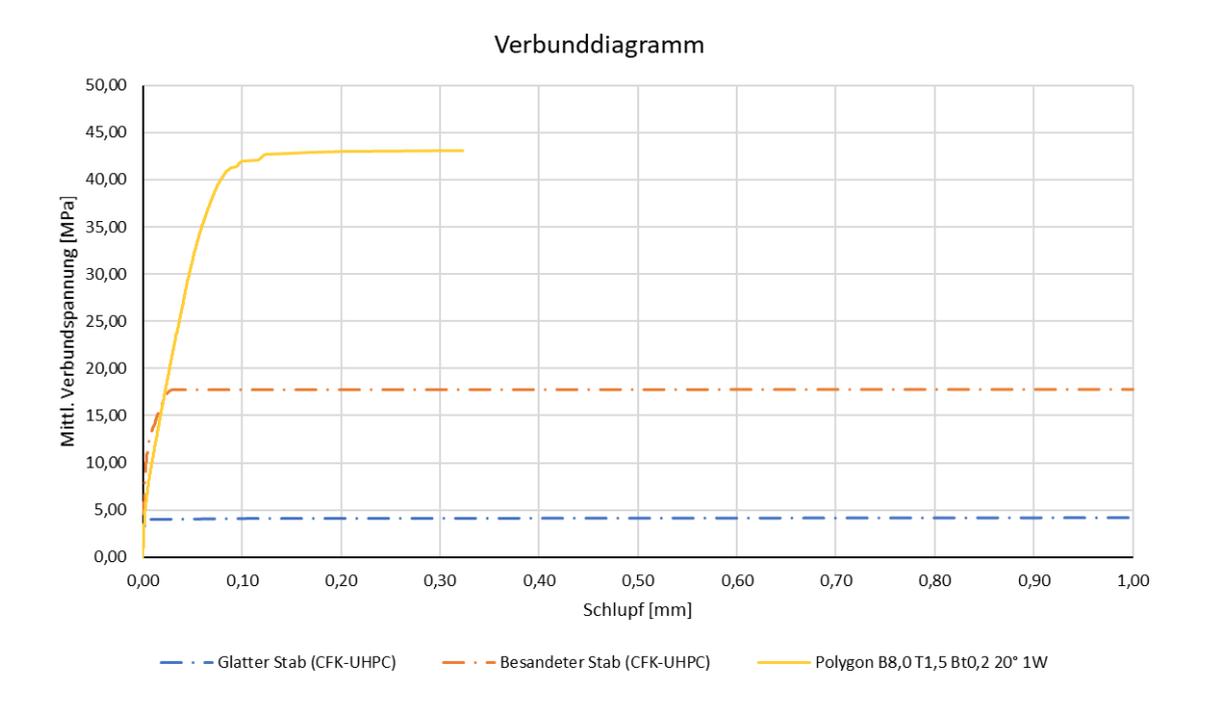
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



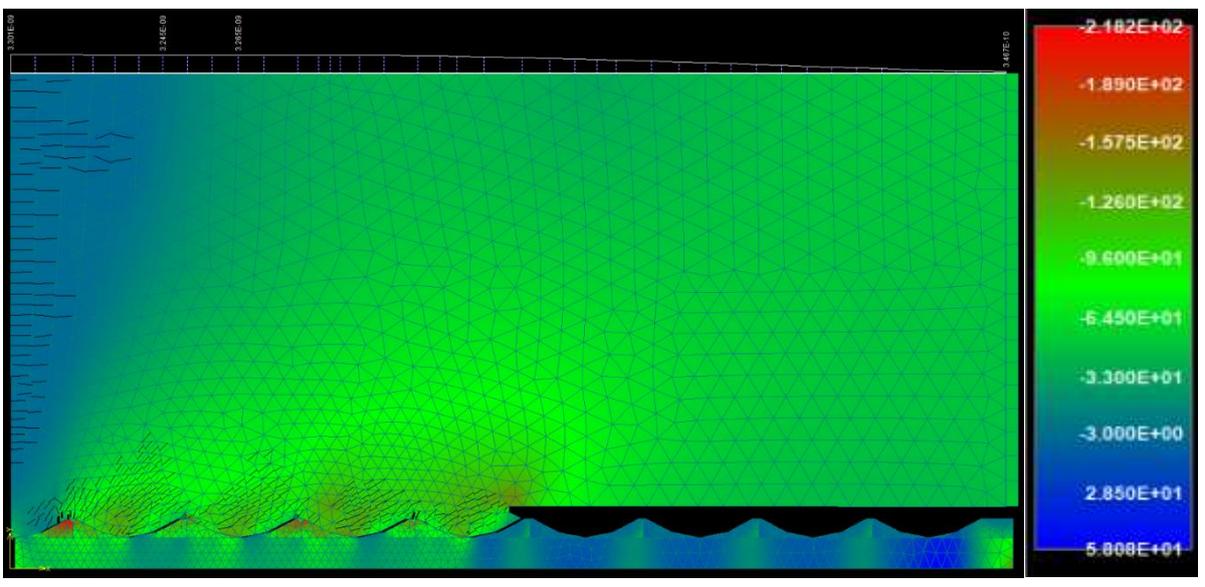
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>43,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,323 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

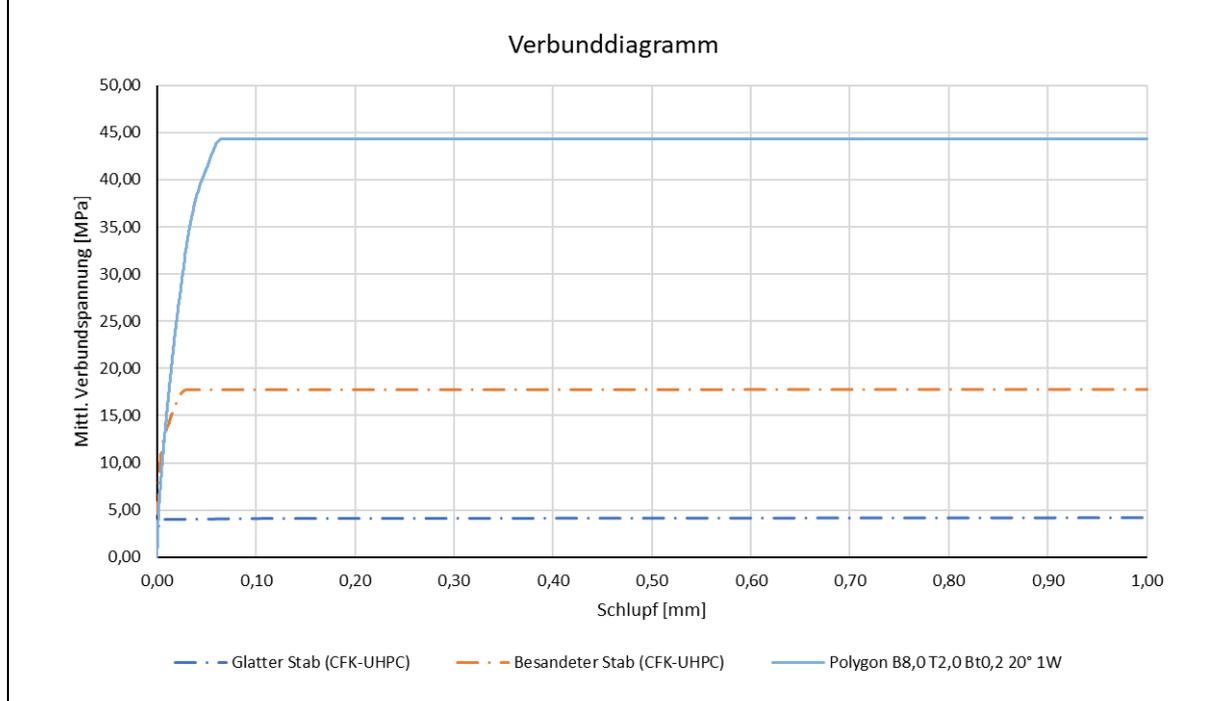


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

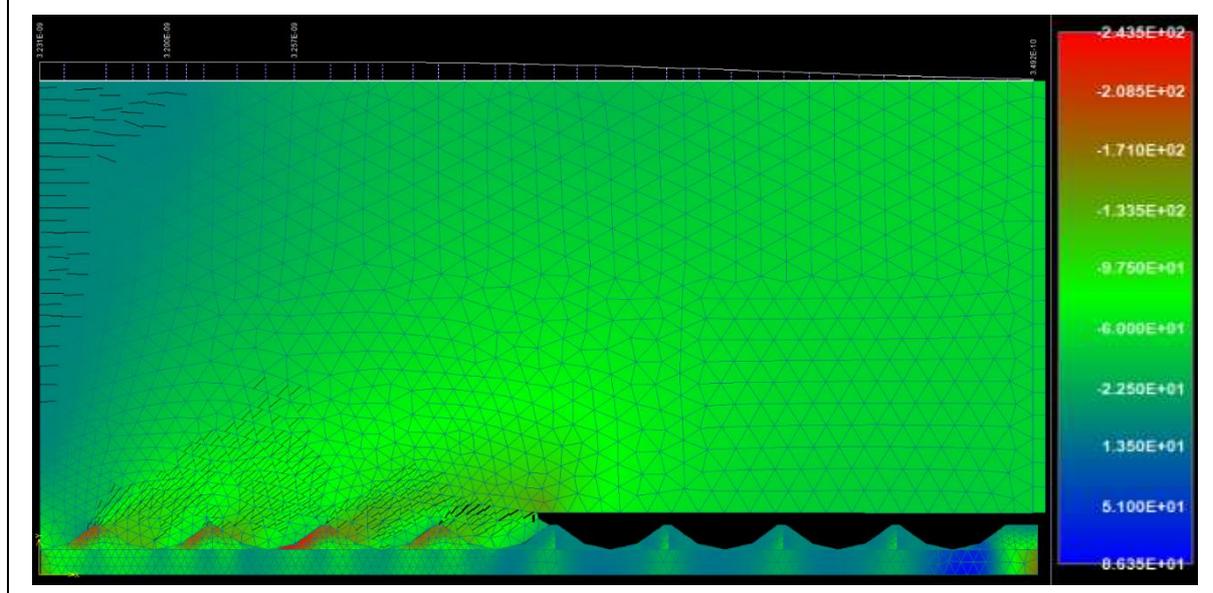


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	20°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>44,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,064 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



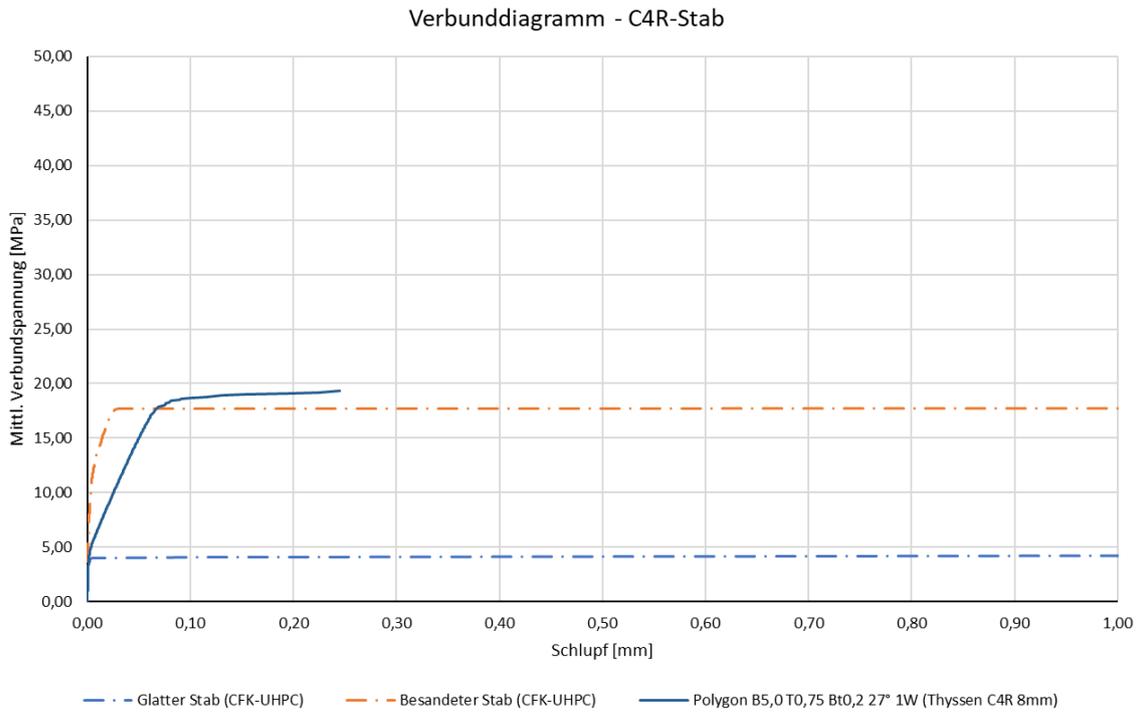
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



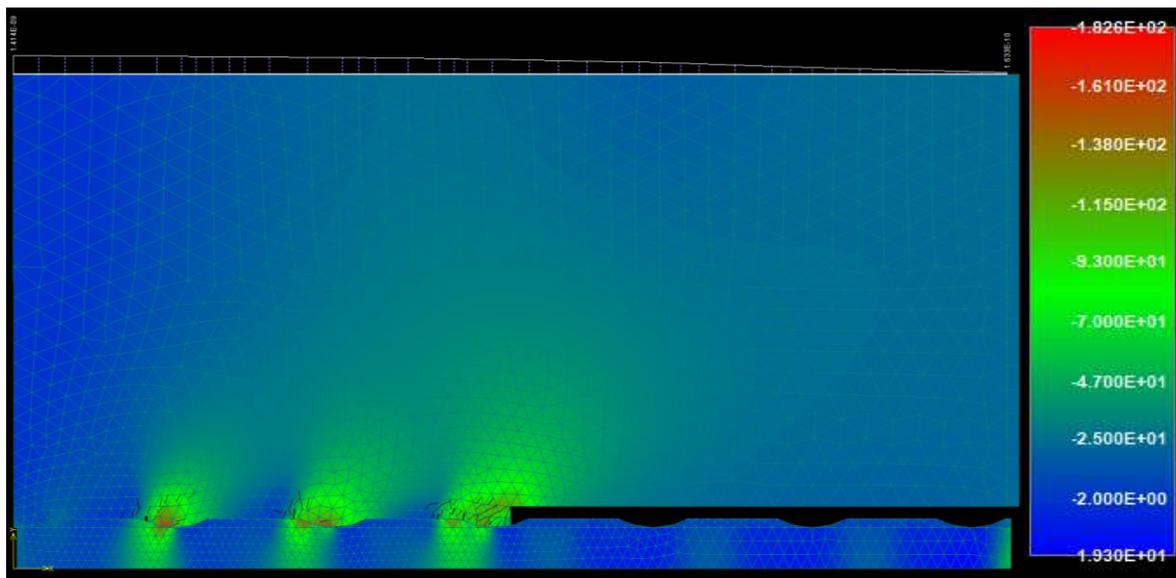
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	27°
(C4R-Stab DN 8 mm)	Kerbenbreite:	5,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>19,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,245 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

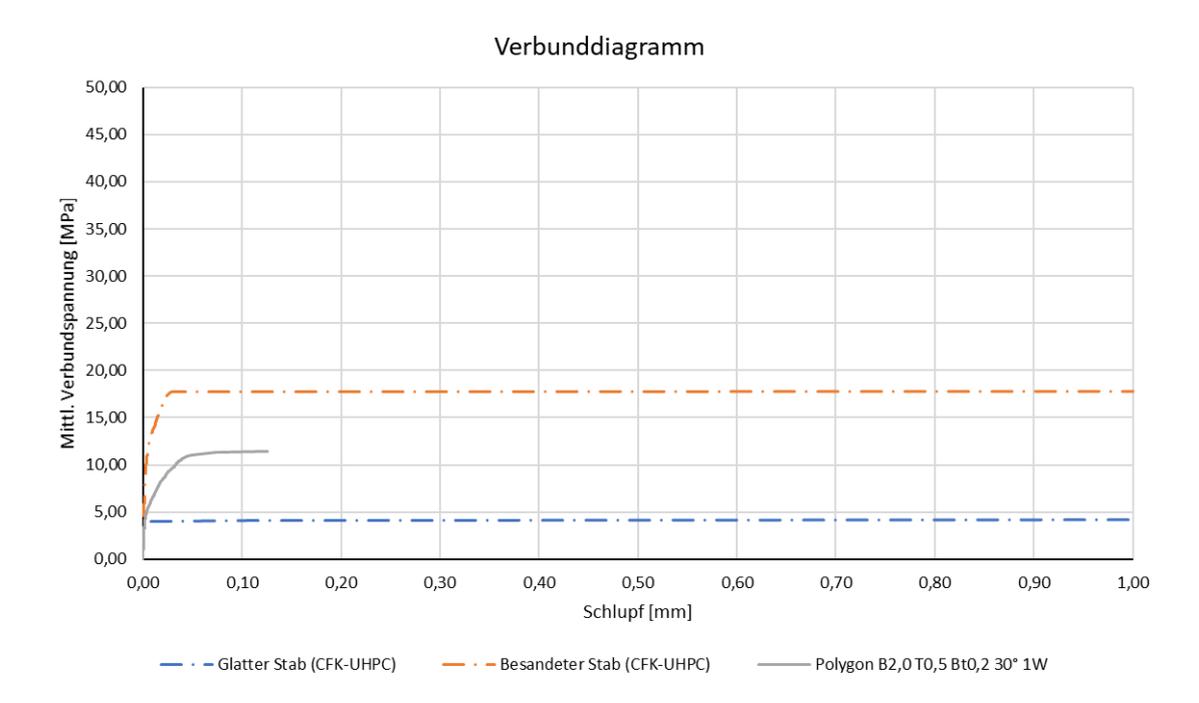


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

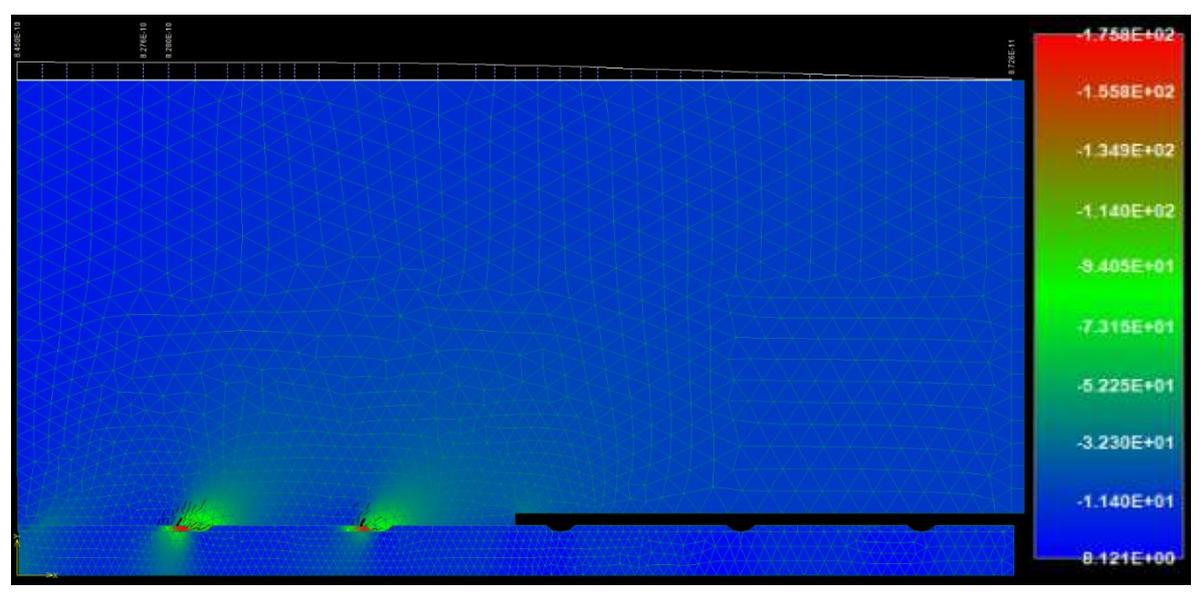


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>11,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,125 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



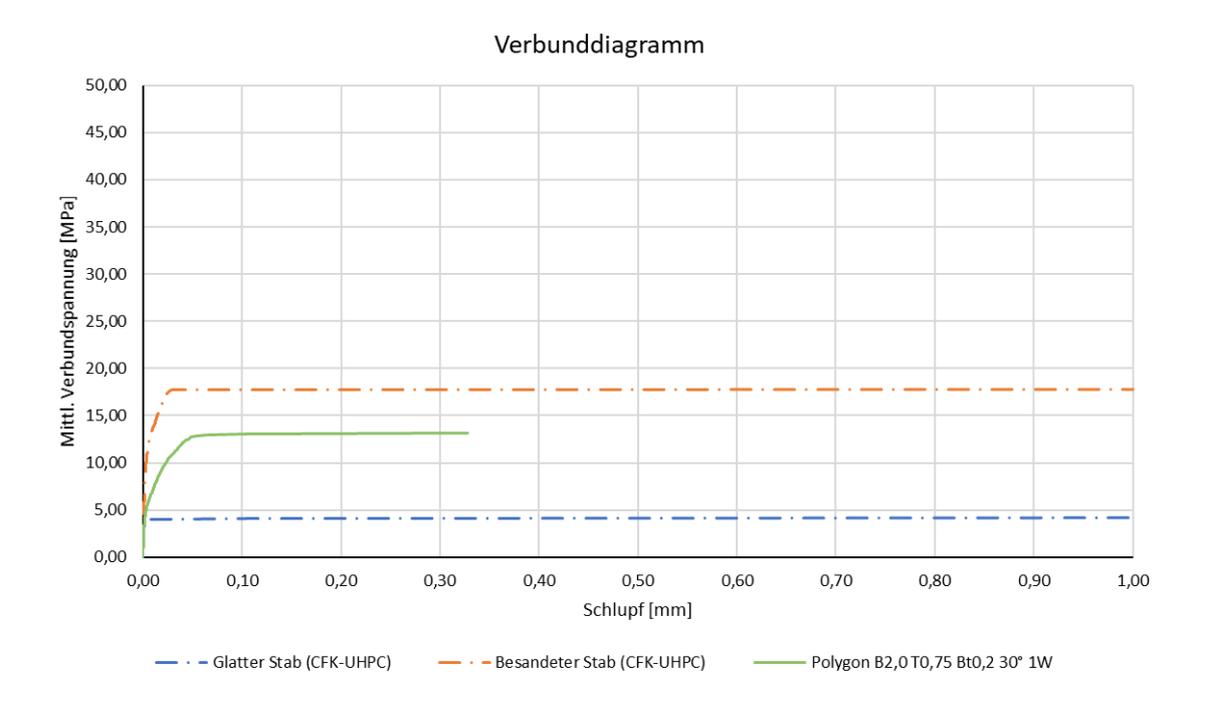
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



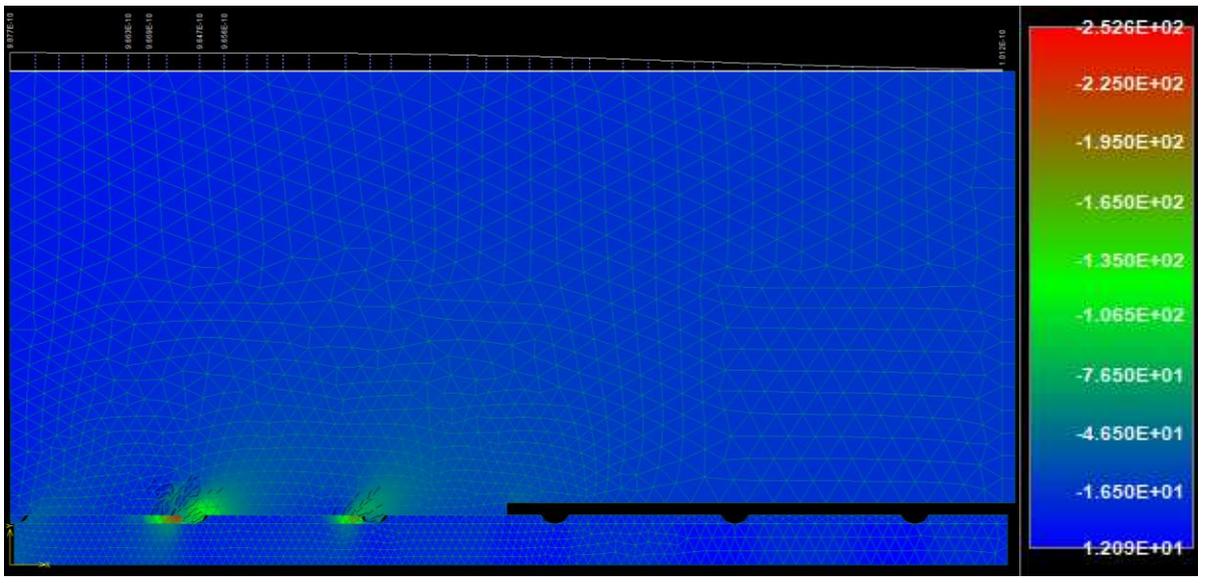
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>13,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,328 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

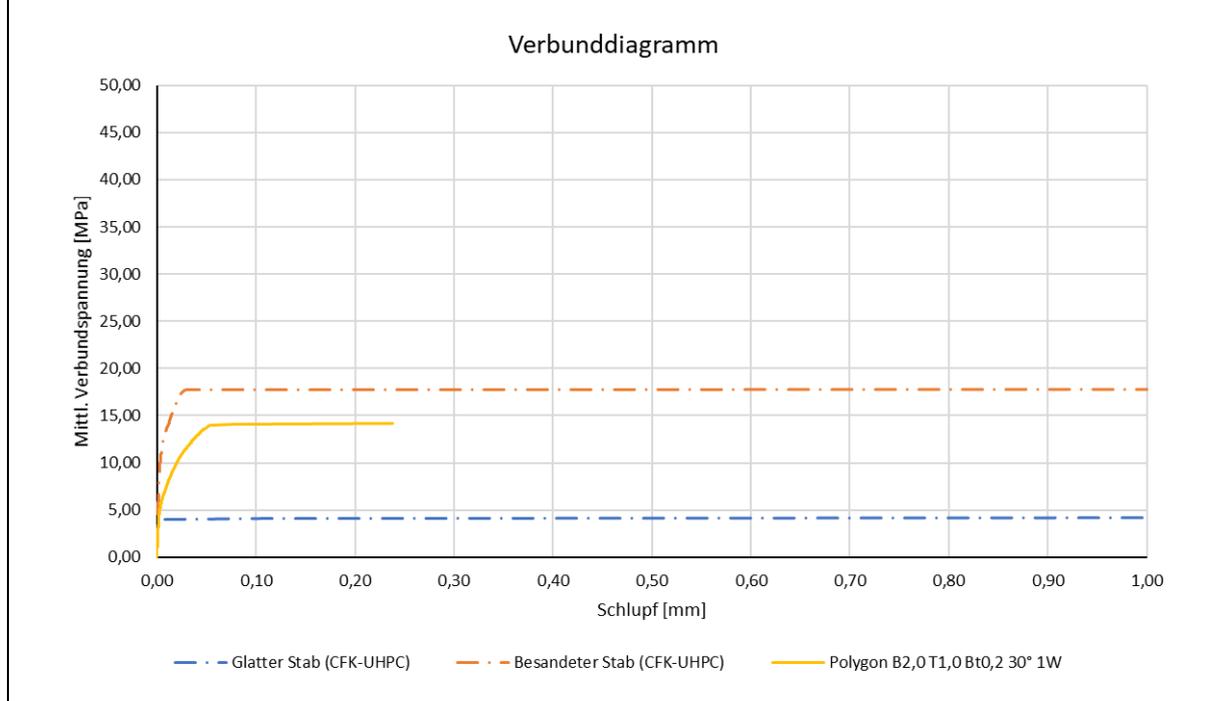


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

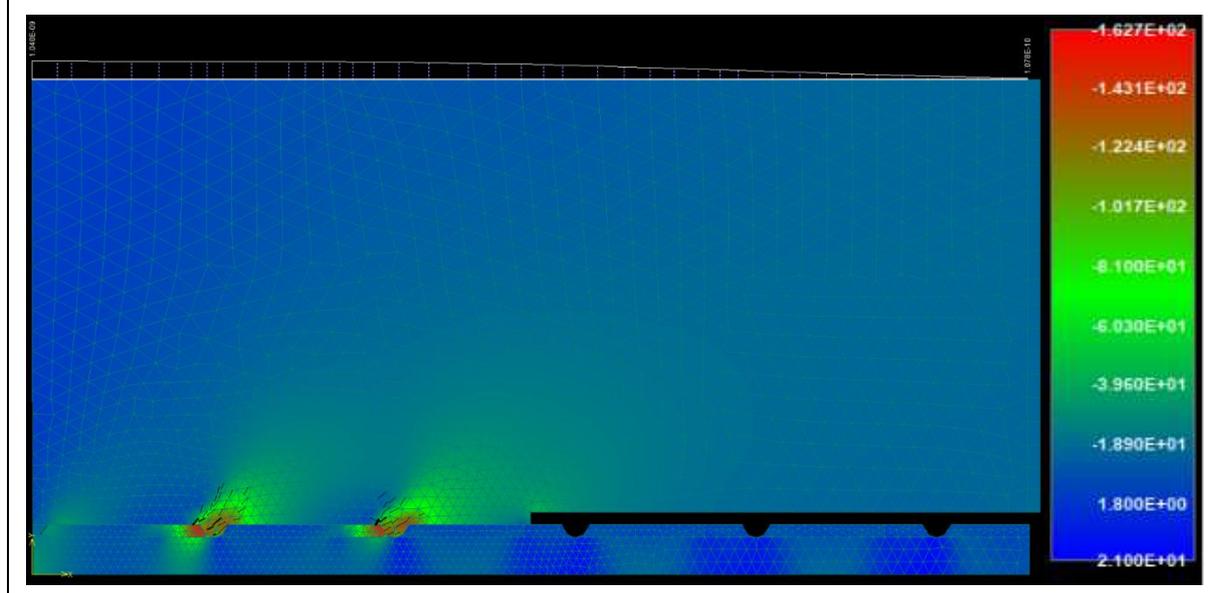


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>14,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,238 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

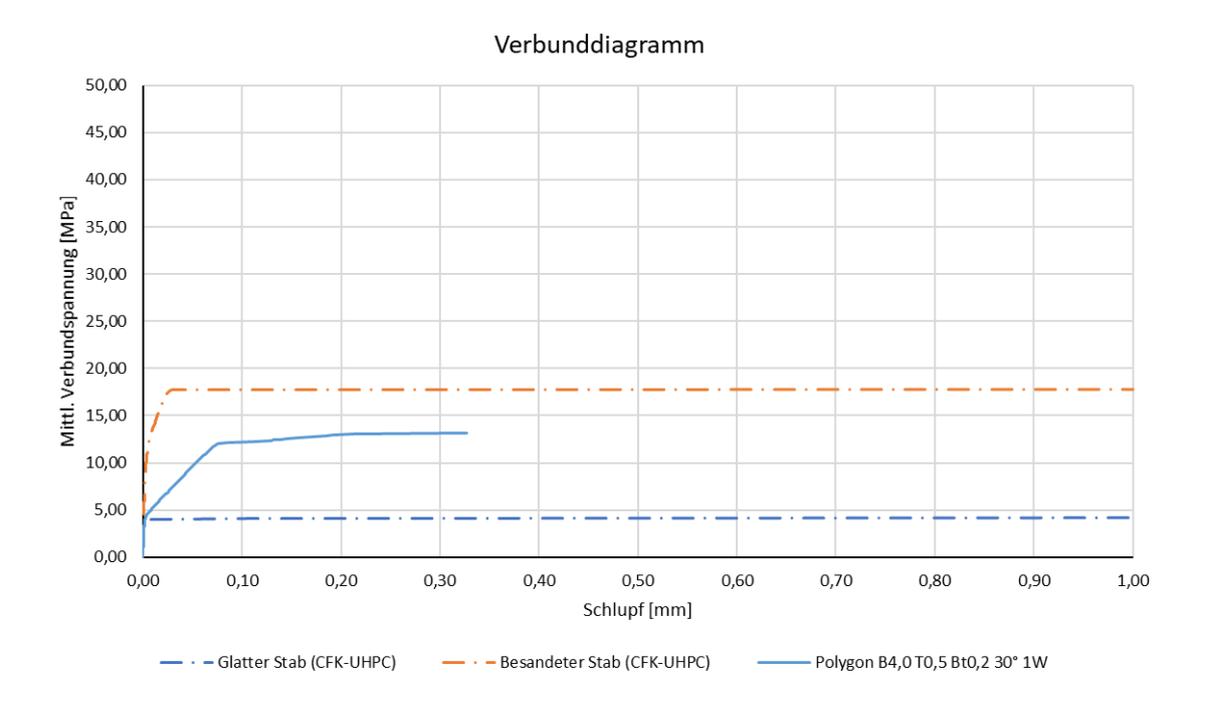


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

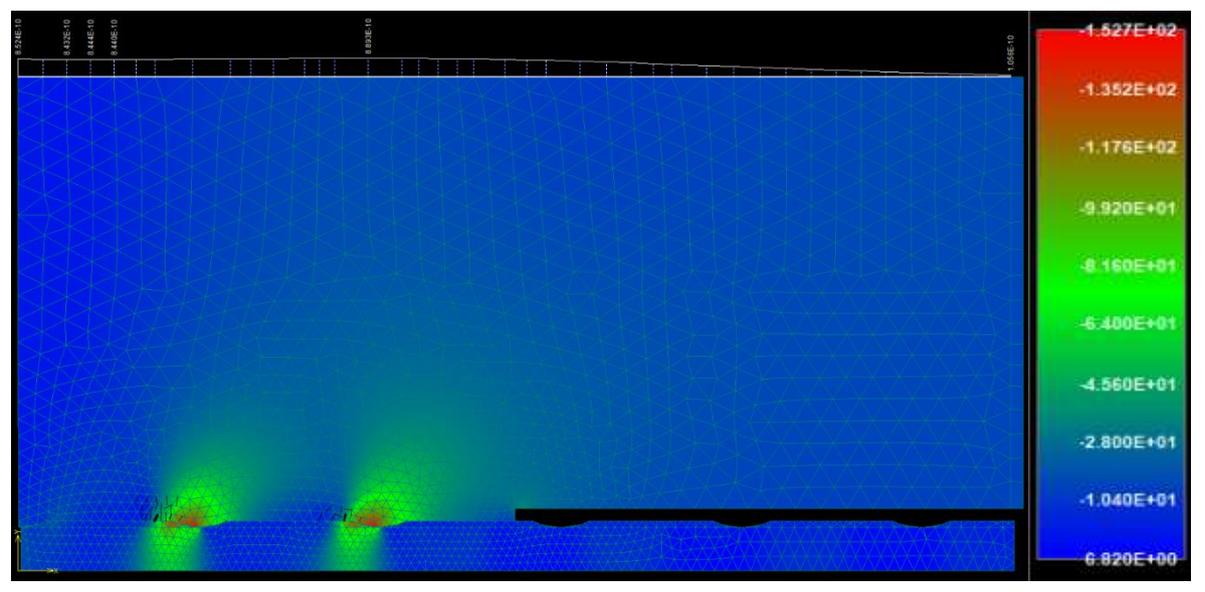


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>13,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,327 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

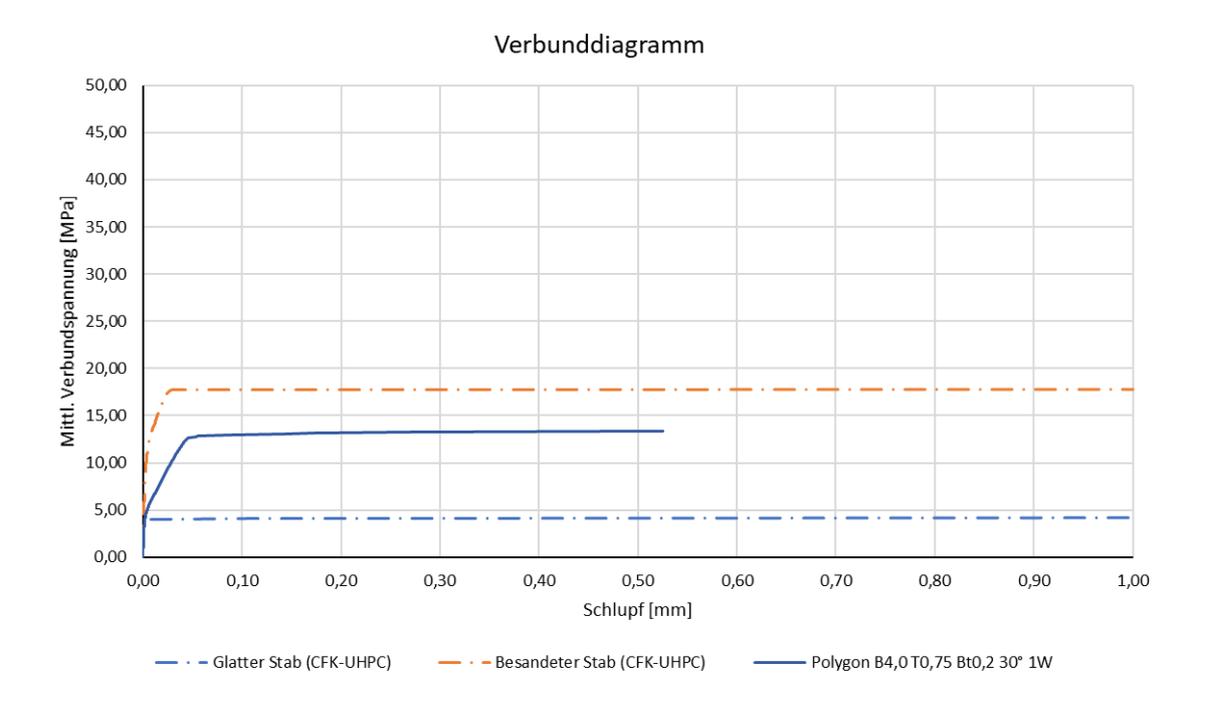


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

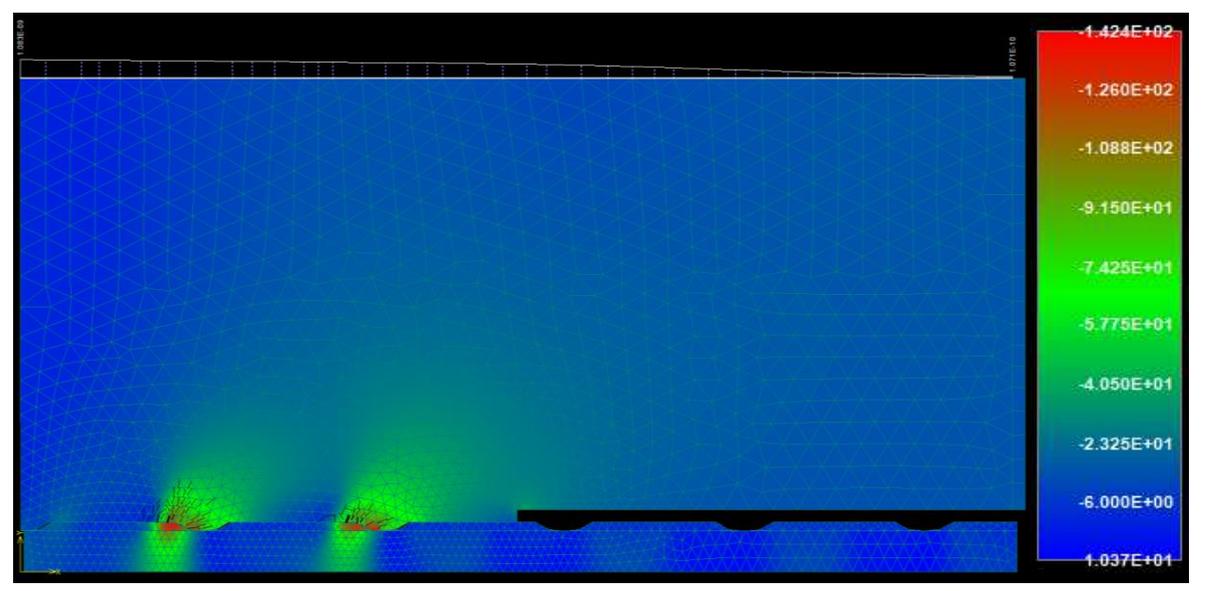


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>13,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,271 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



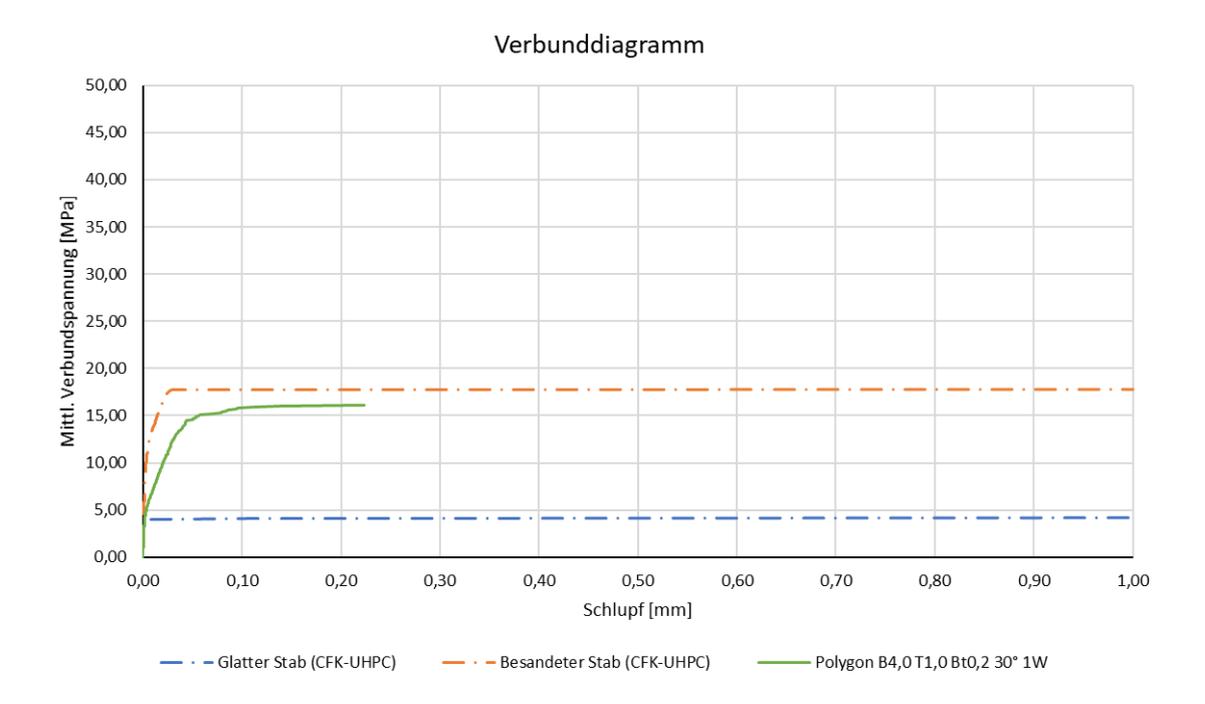
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



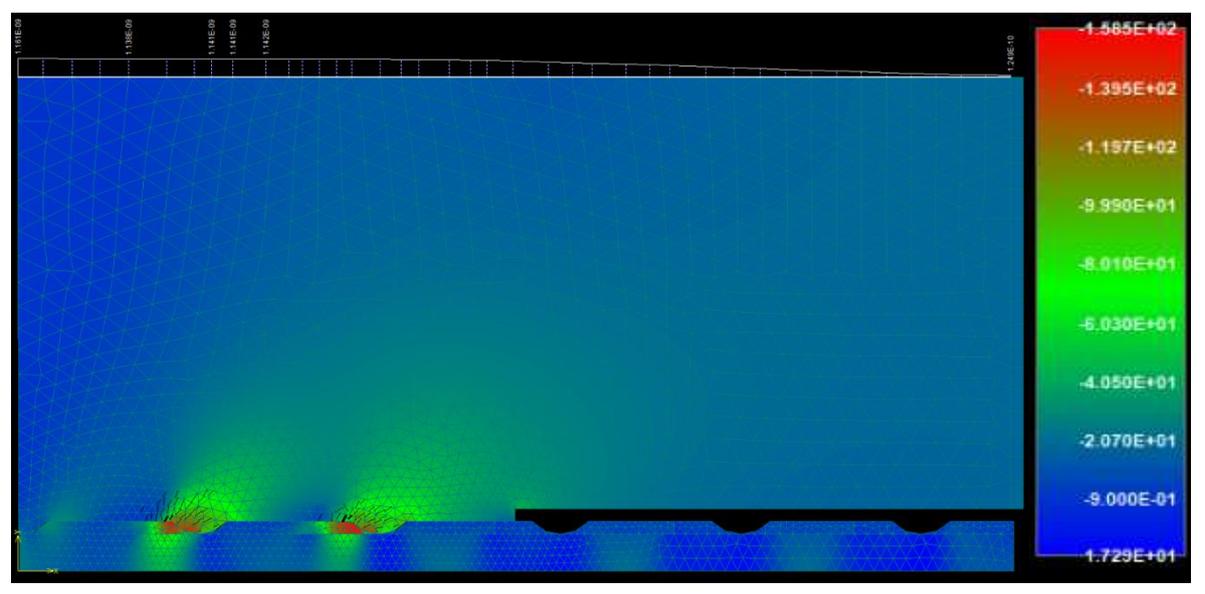
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>16,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,223 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

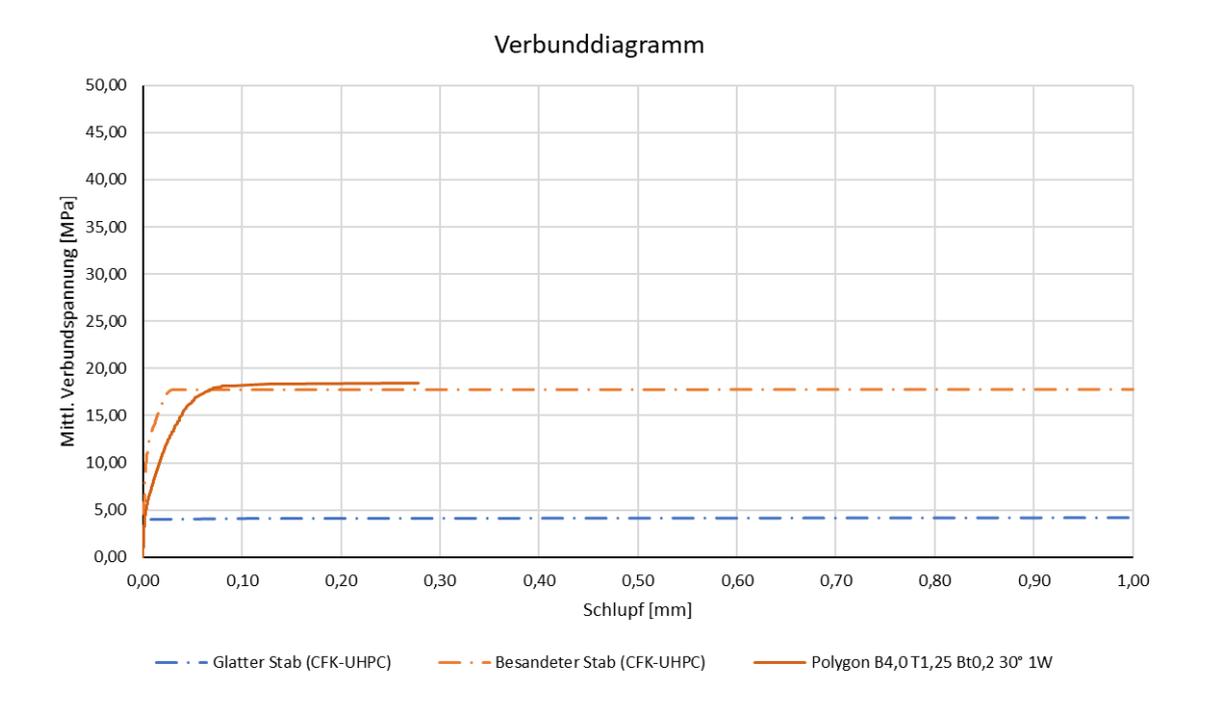


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

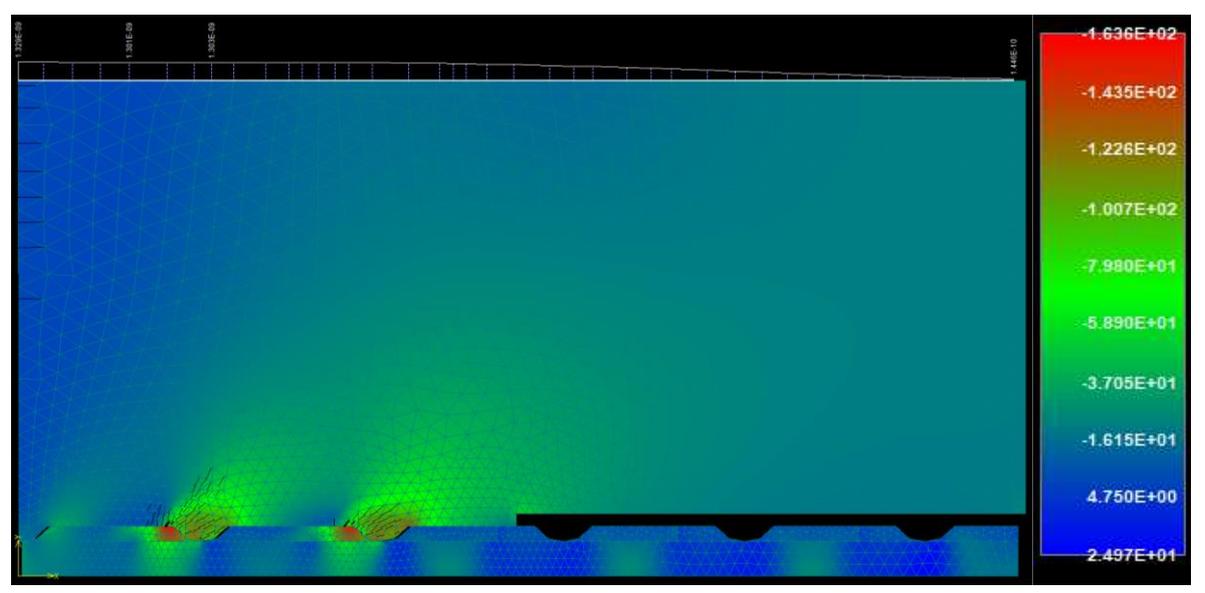


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>18,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,278 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



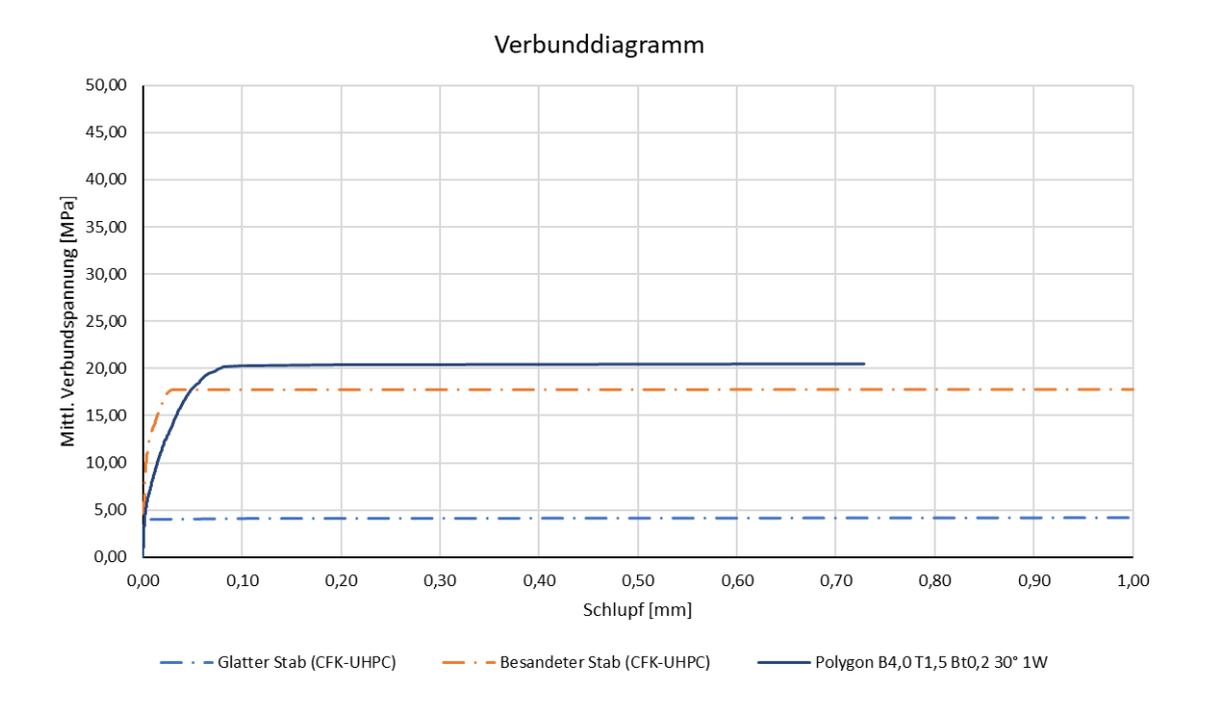
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



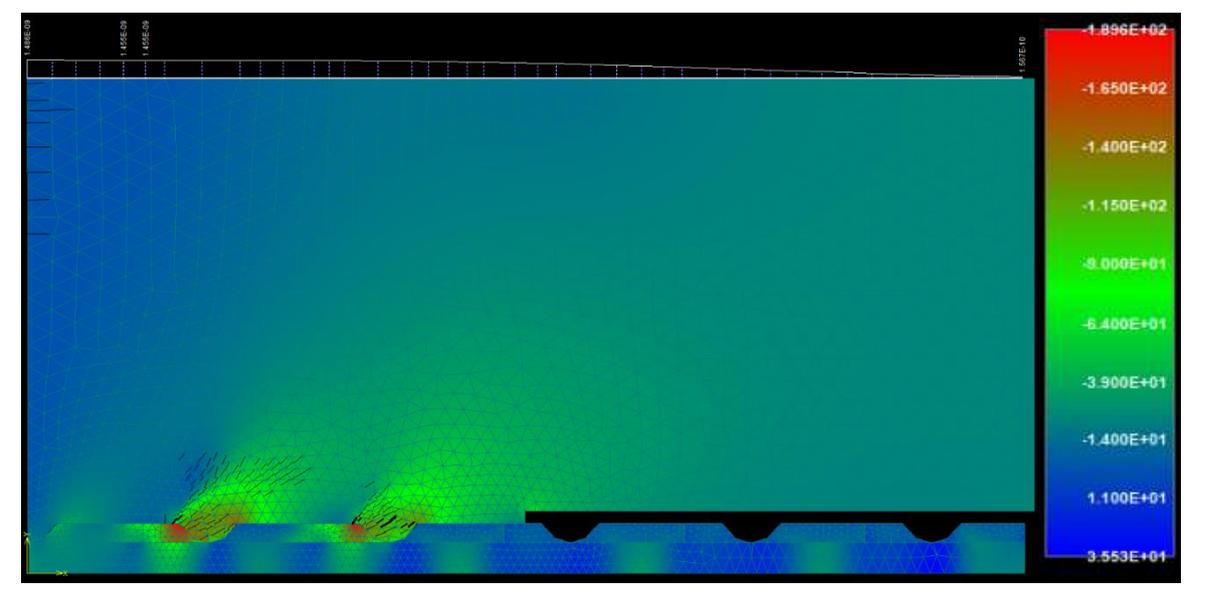
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>20,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,193 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

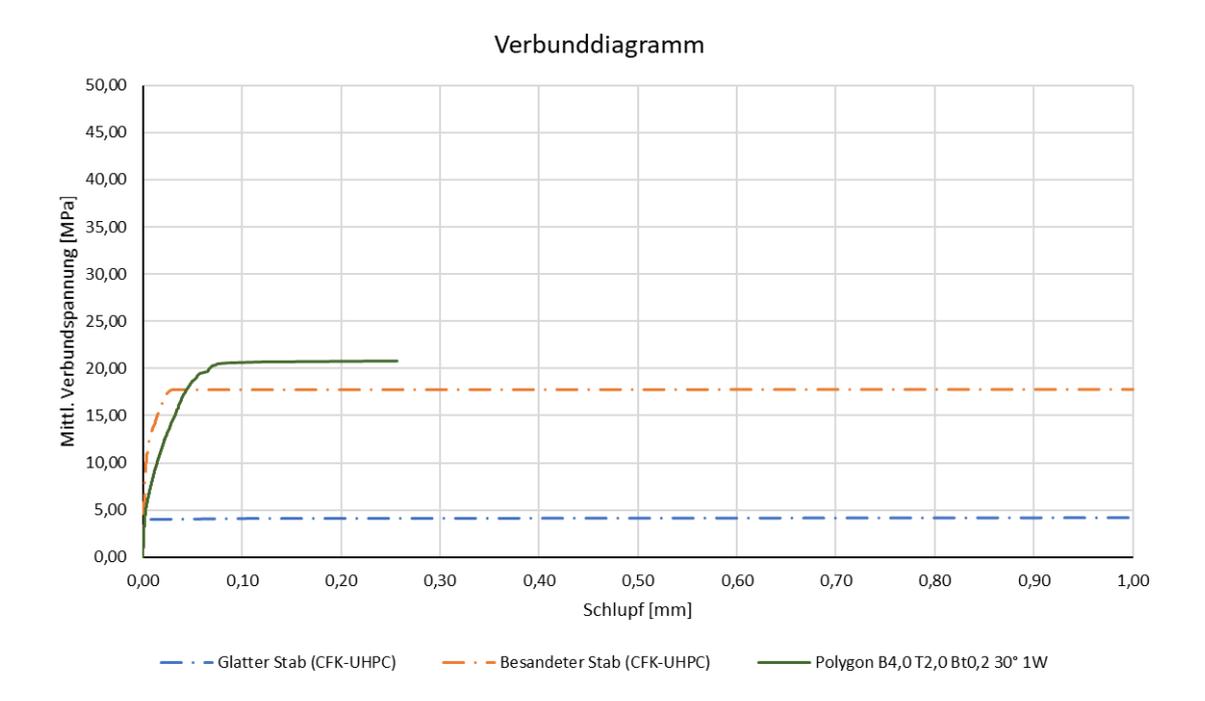


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

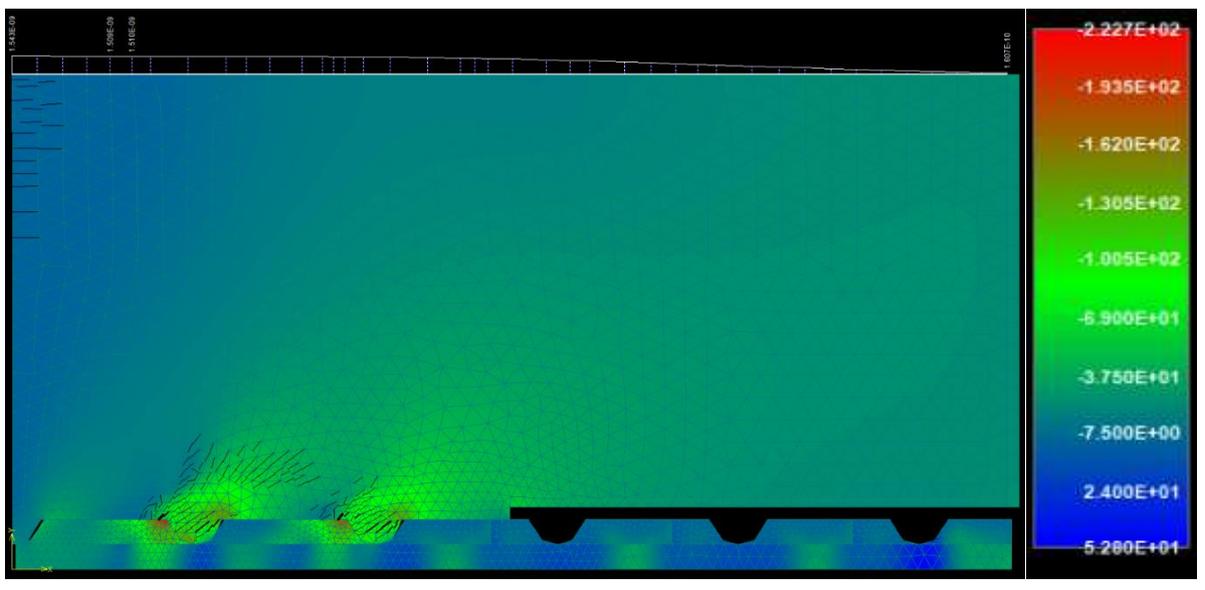


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>20,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,257 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



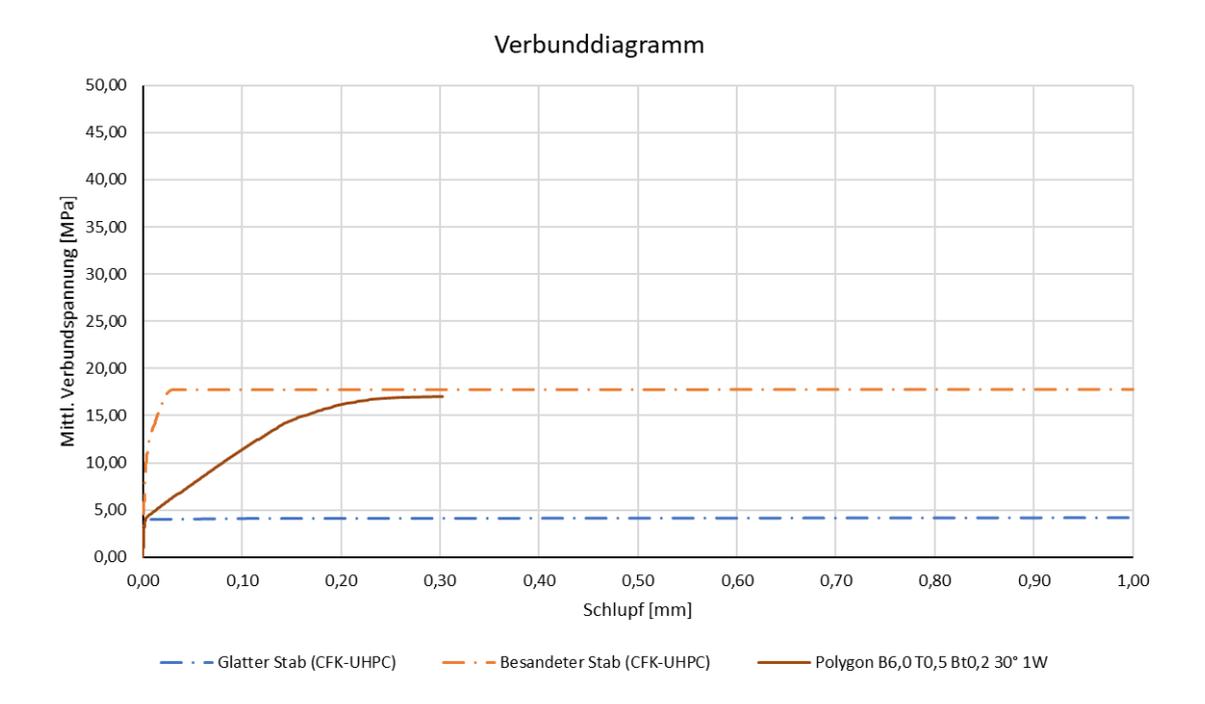
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



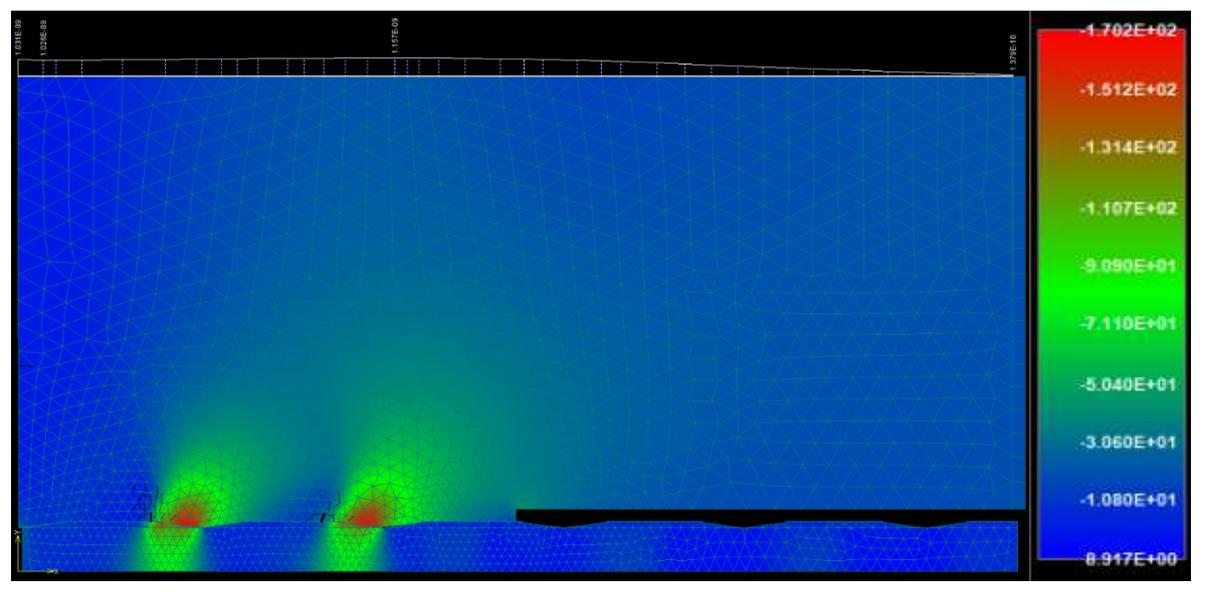
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>17,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,302 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

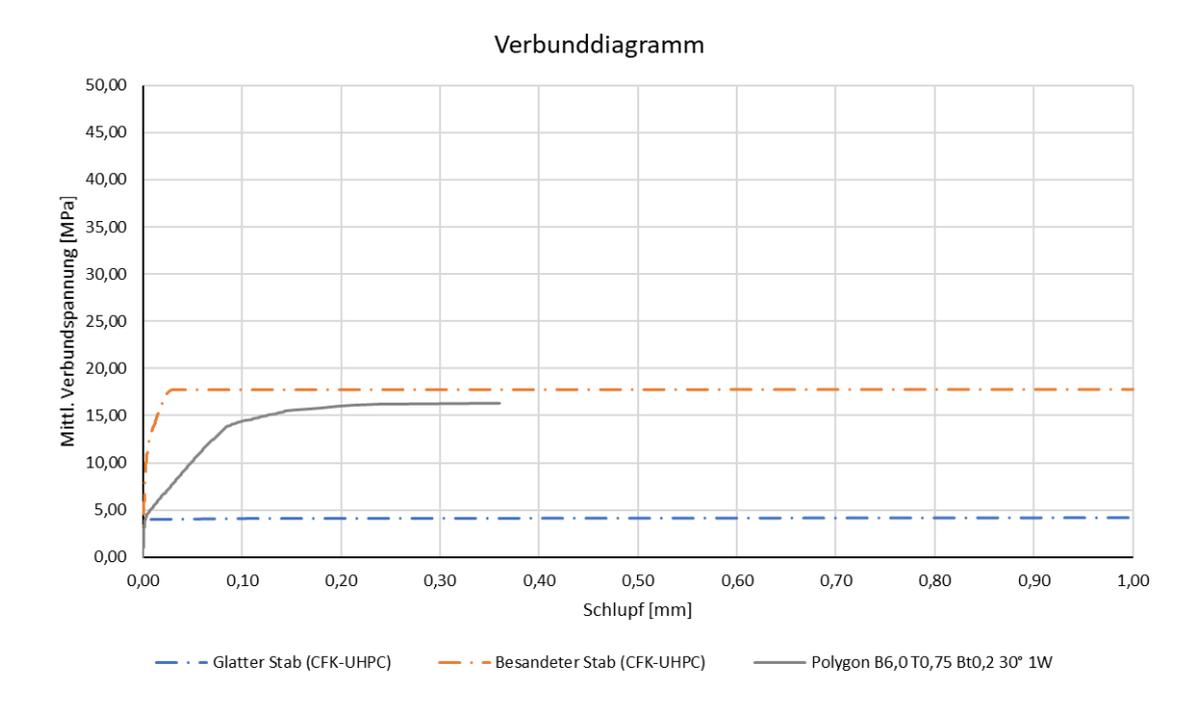


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

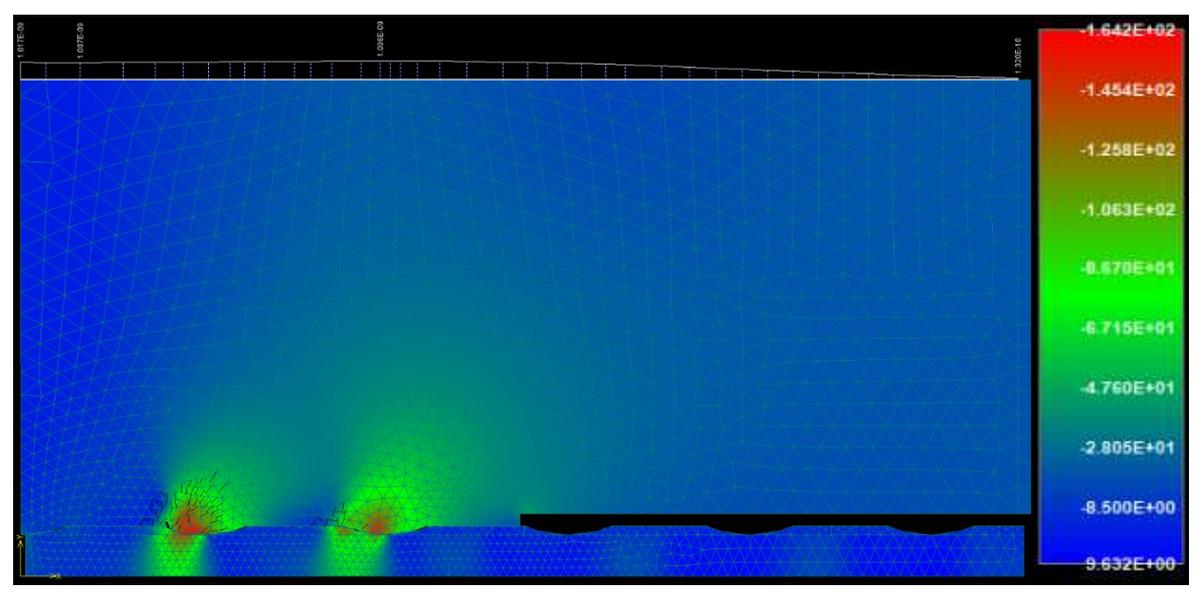


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>16,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,360 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



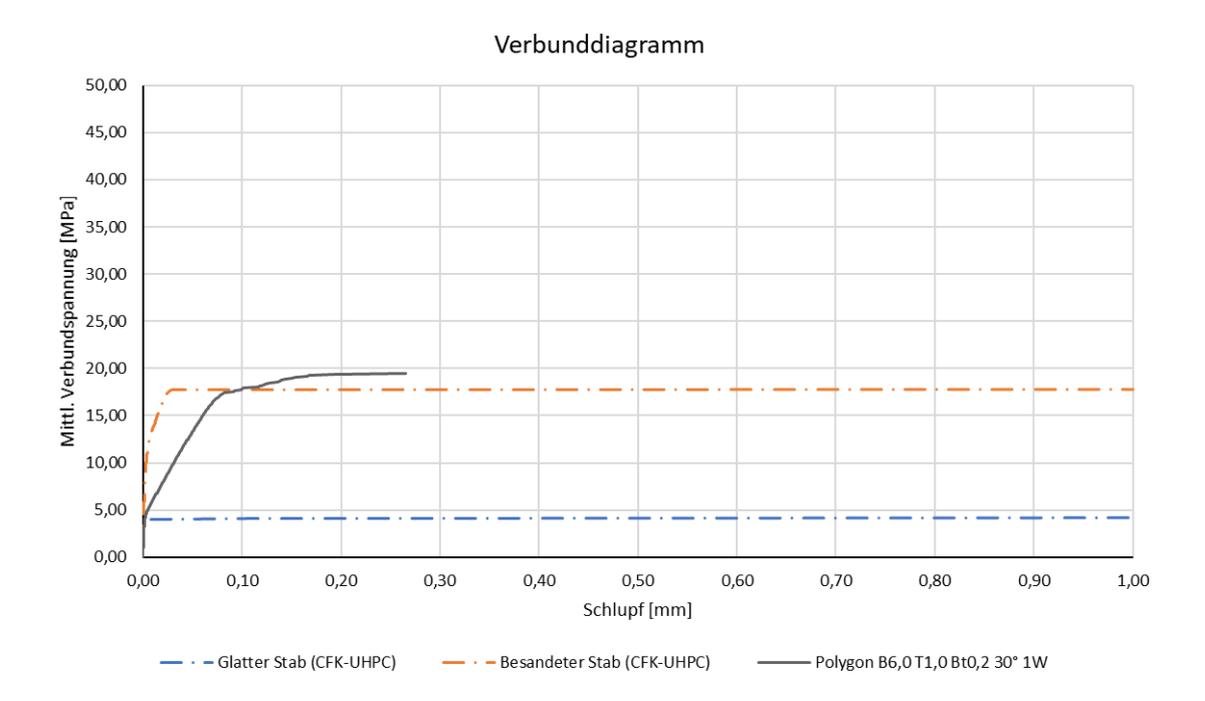
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



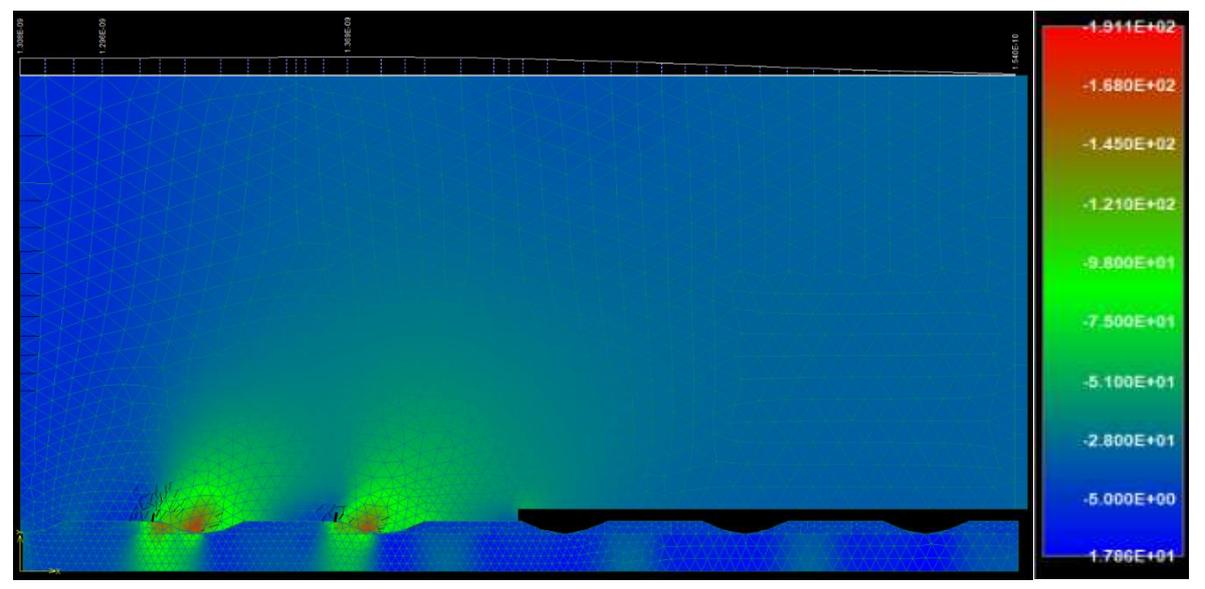
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>19,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,265 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

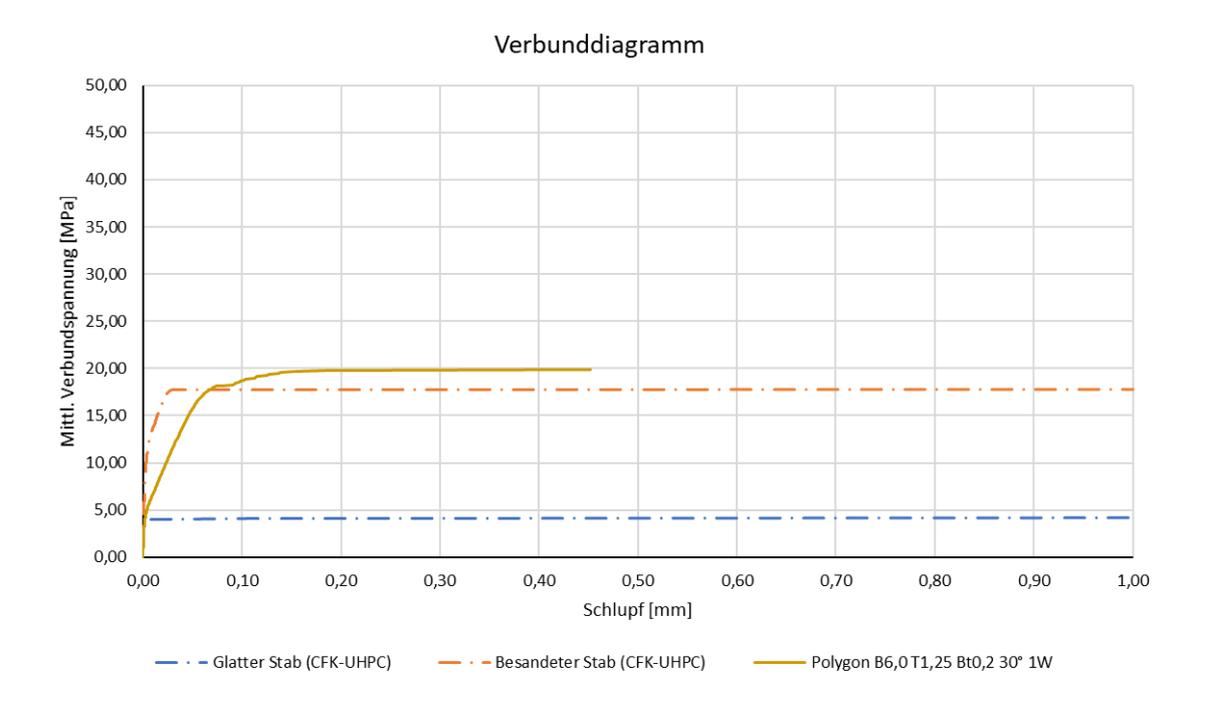


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

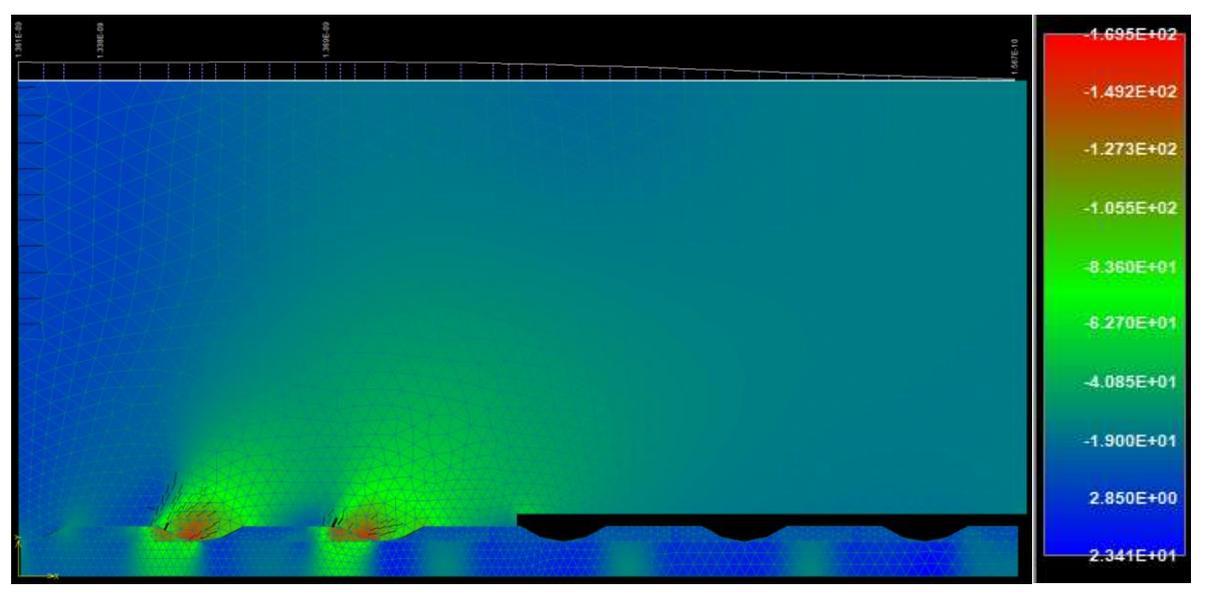


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>19,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,184 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



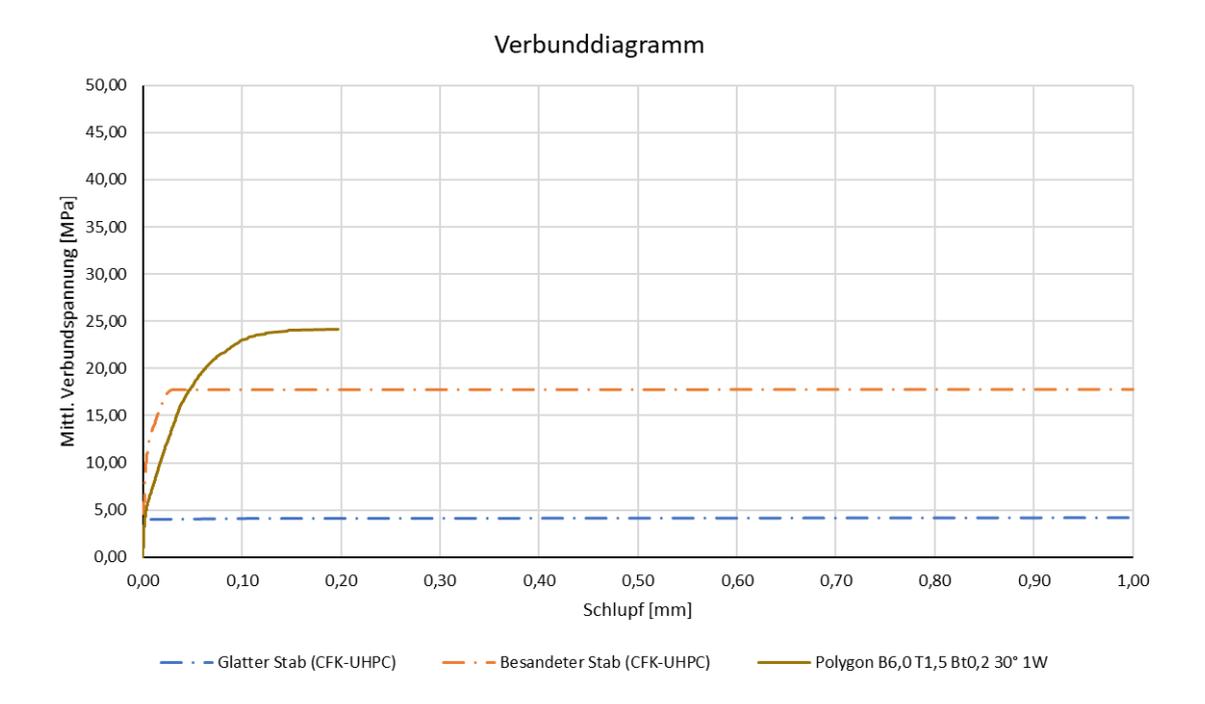
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



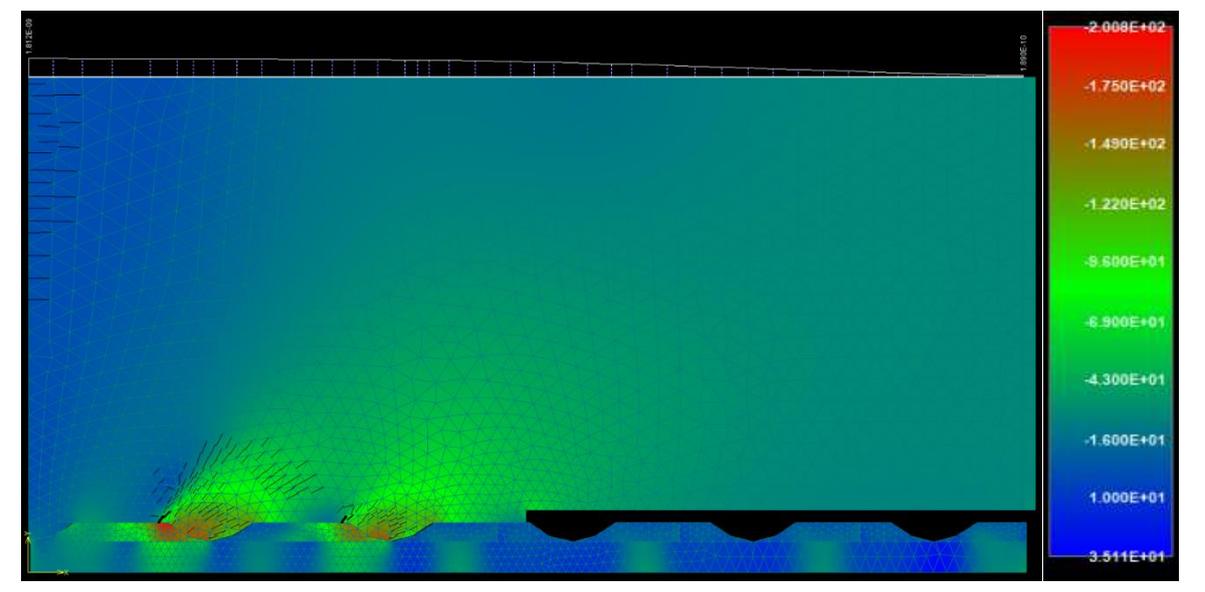
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>24,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,197 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

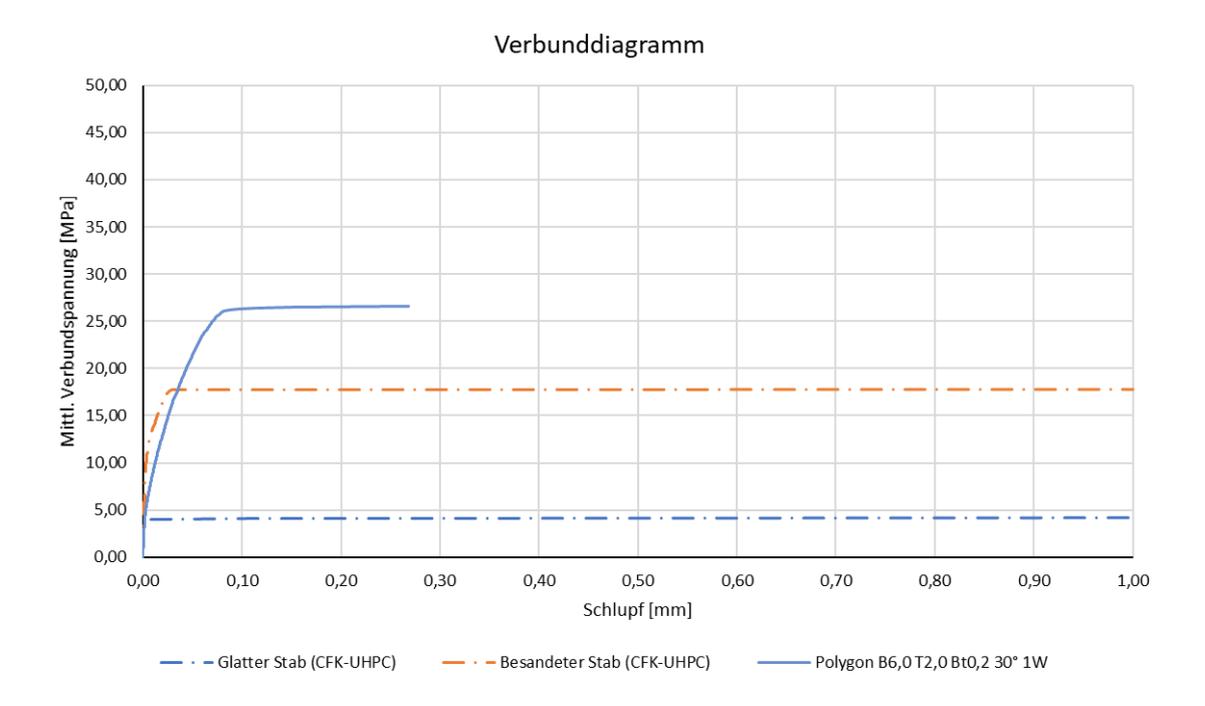


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

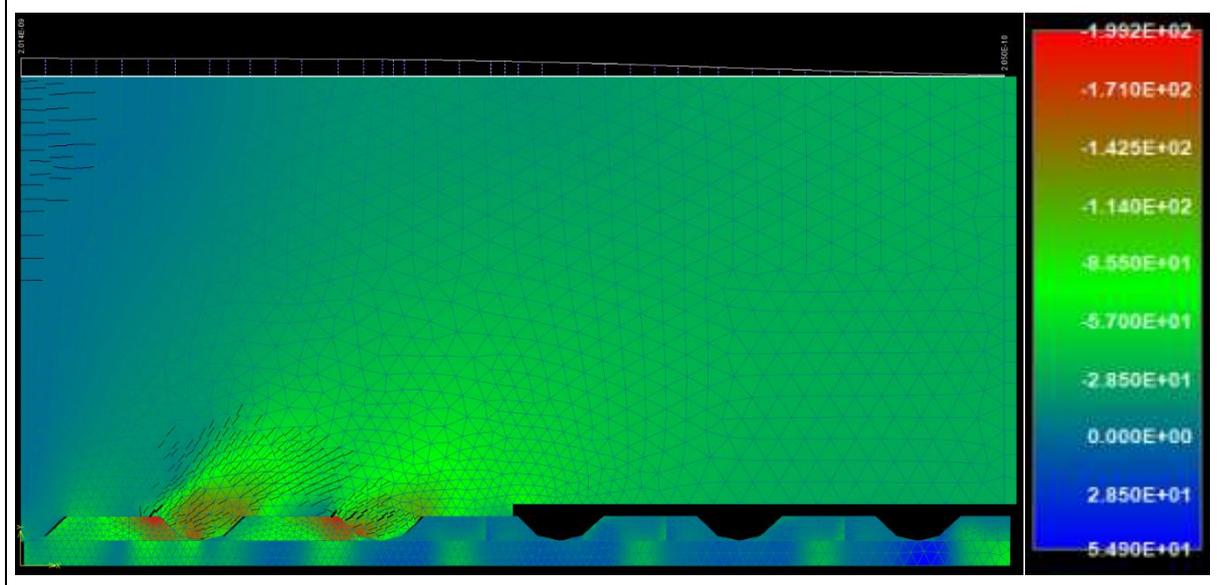


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>26,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,268 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



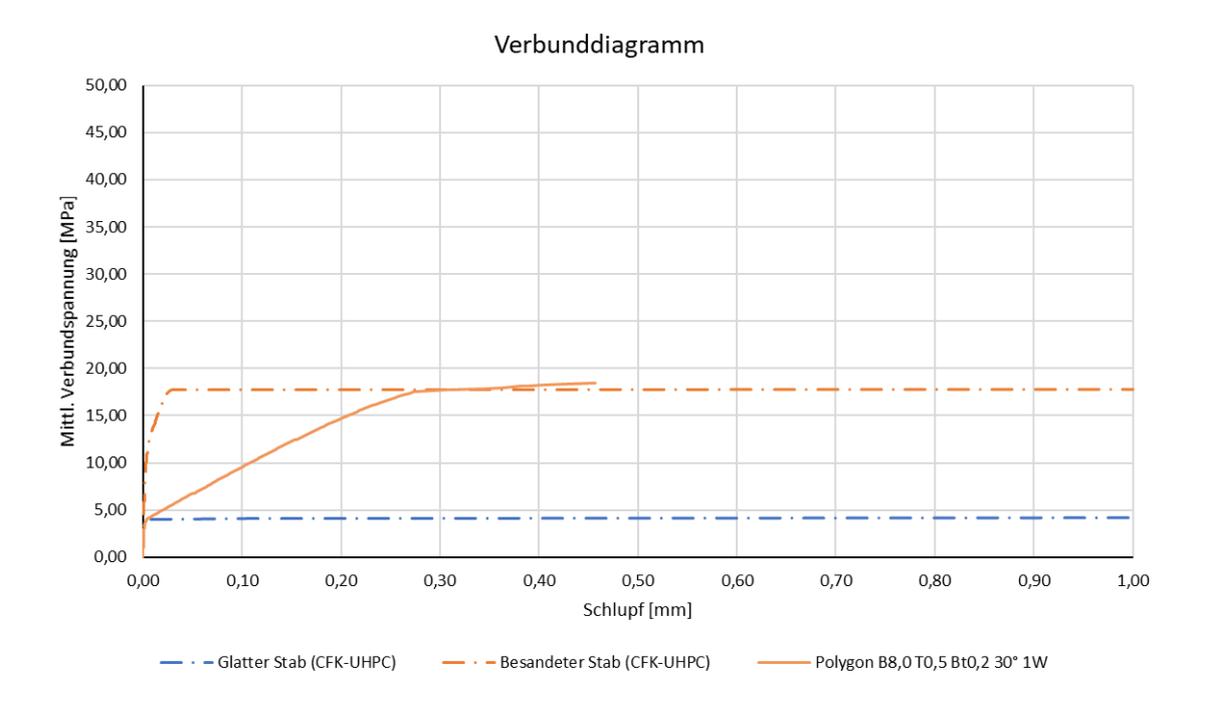
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



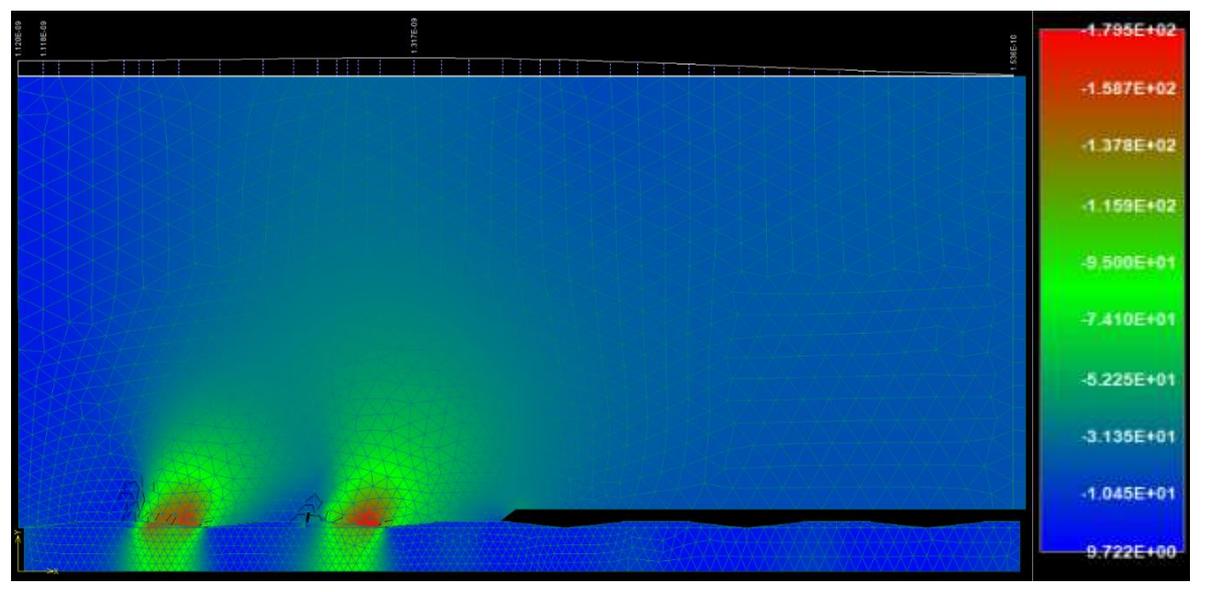
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>18,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,390 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

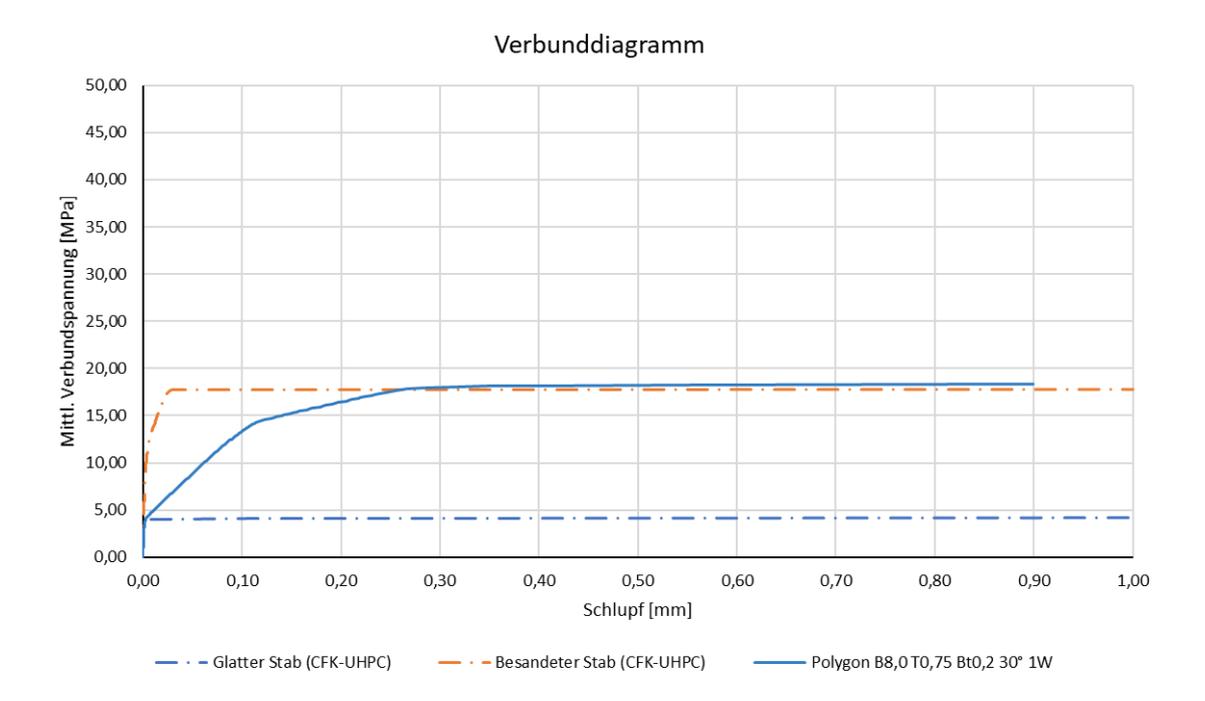


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

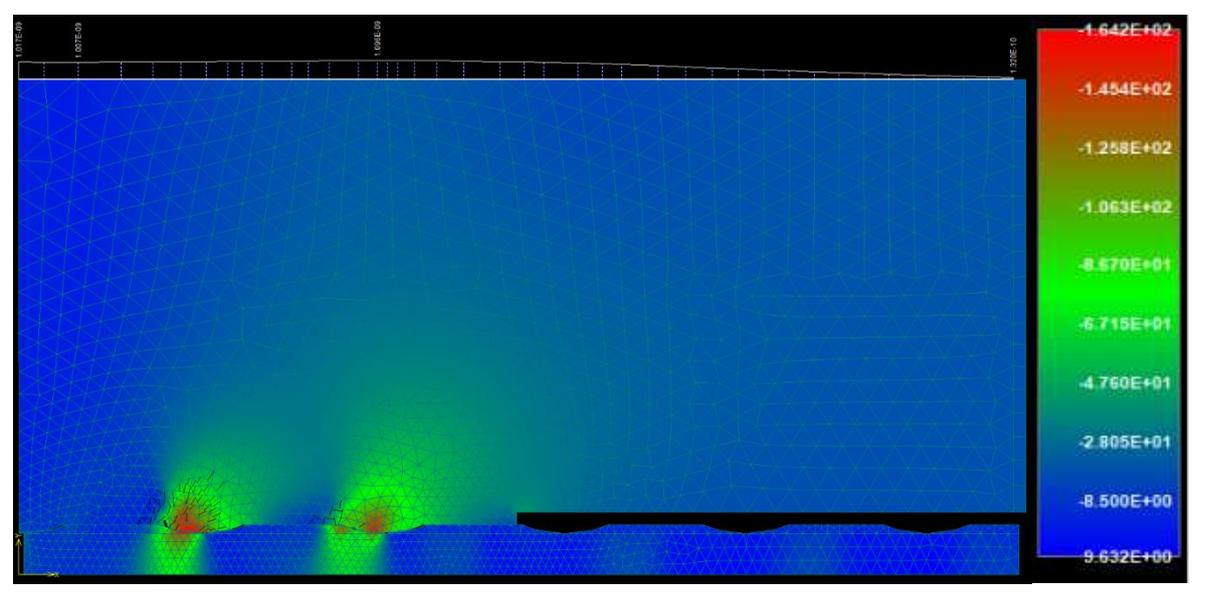


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>18,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,396 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



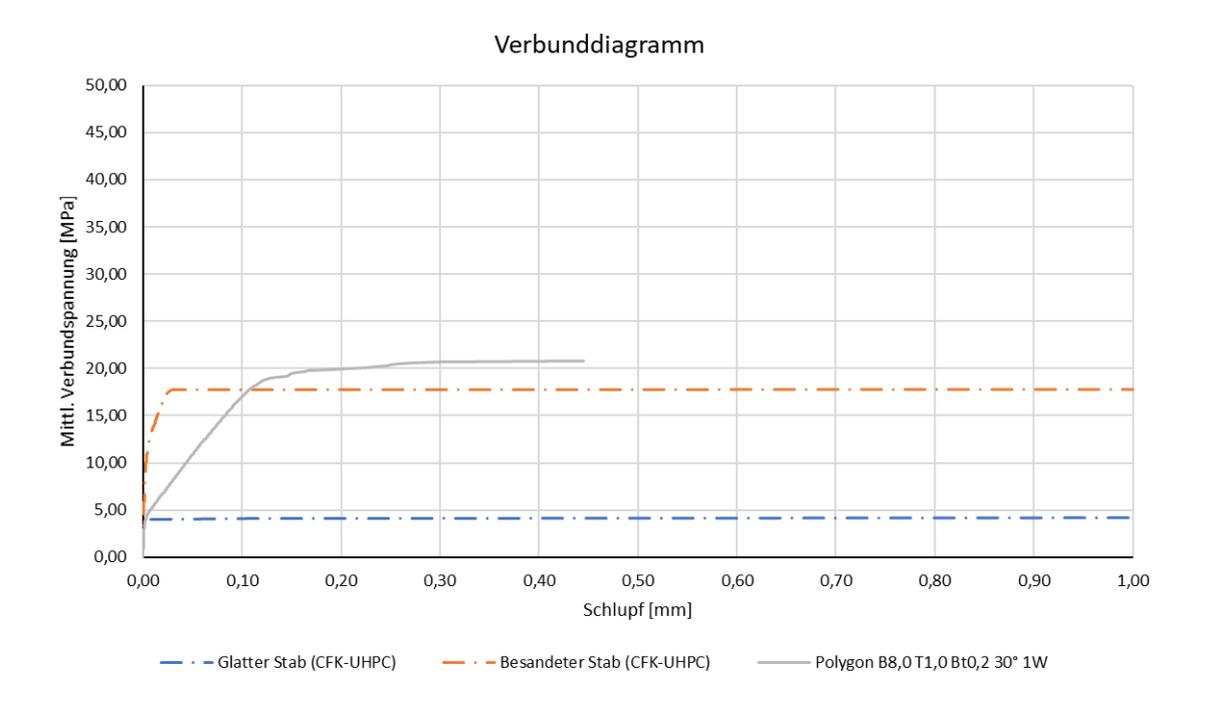
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



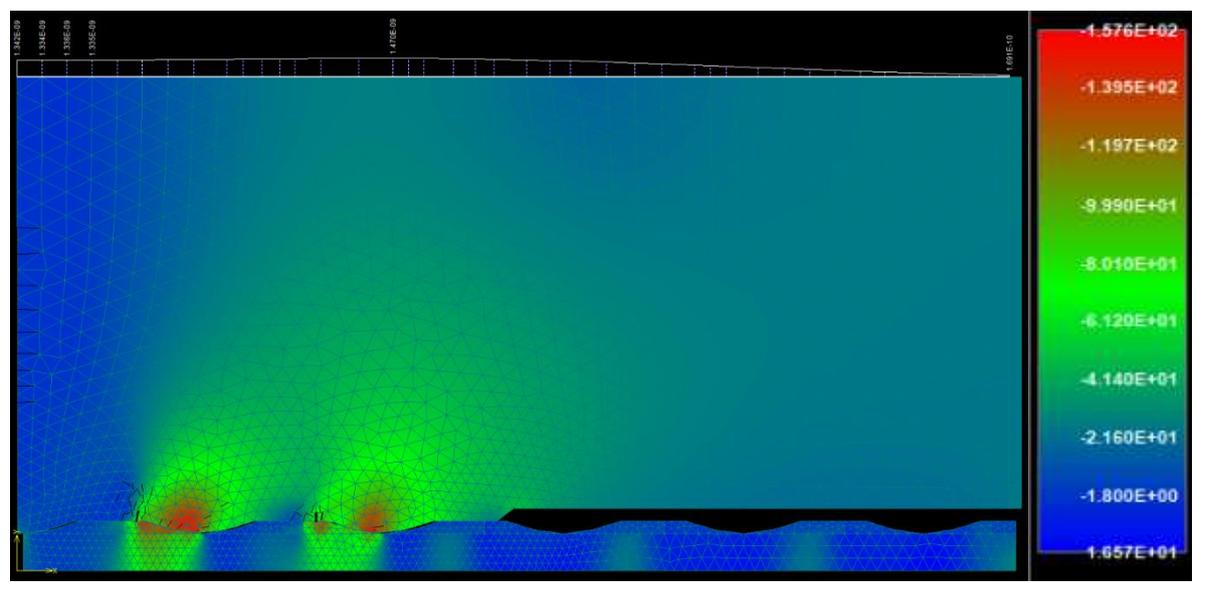
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>20,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,300 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

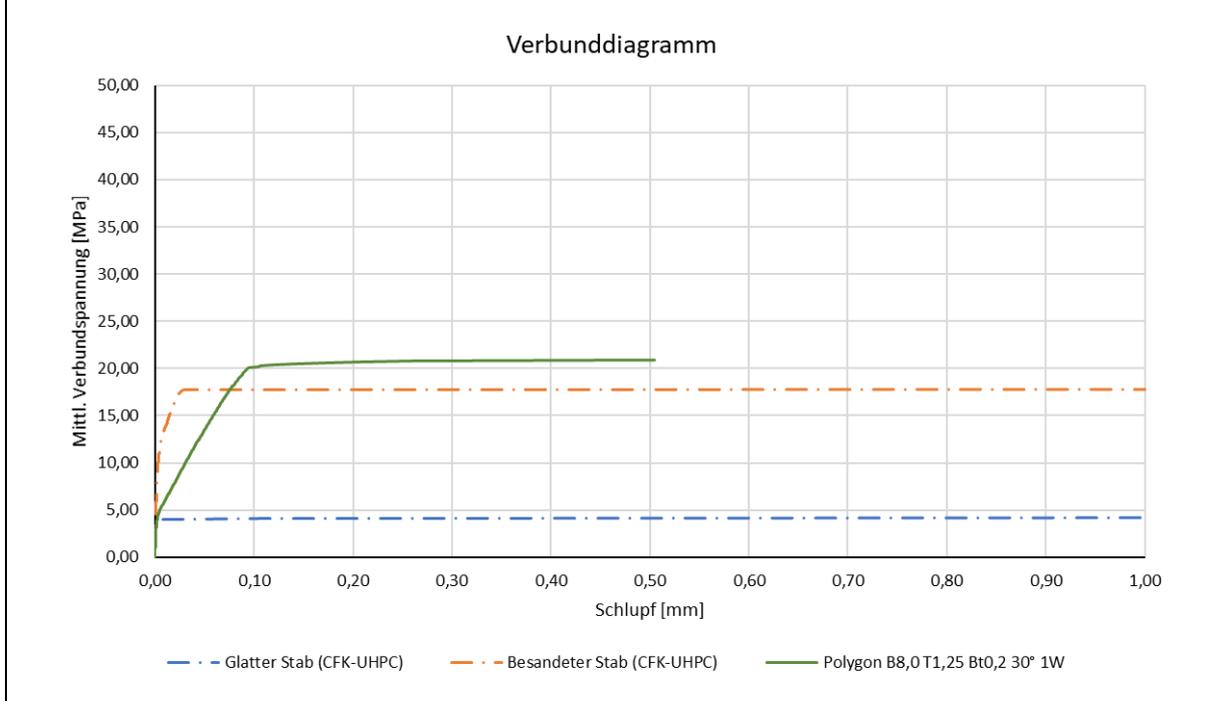


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

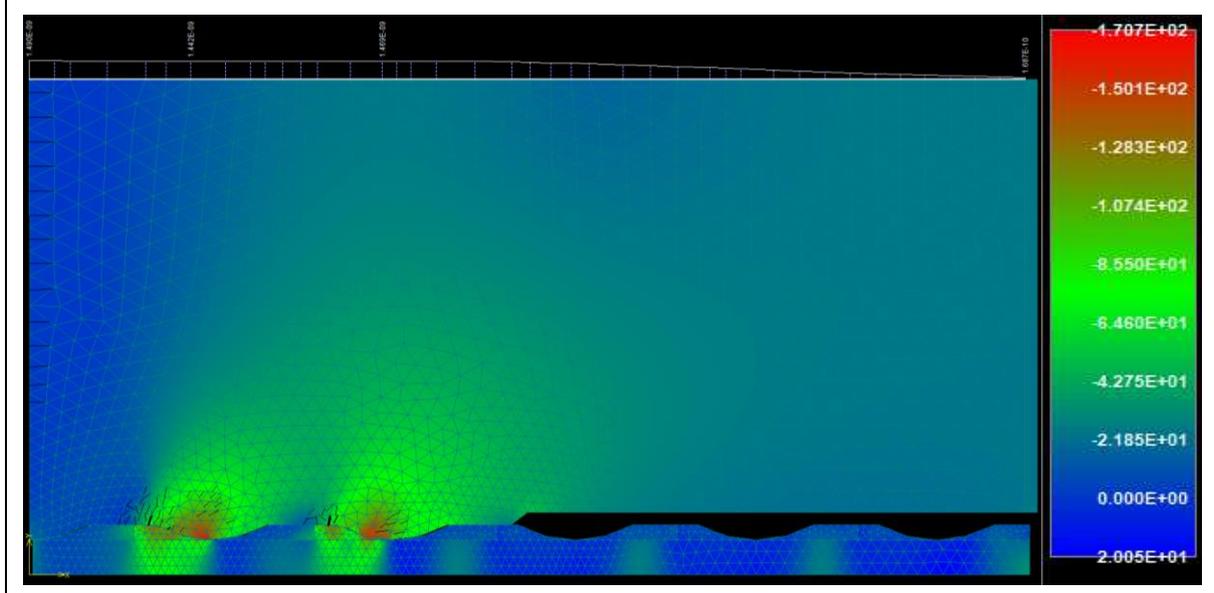


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>20,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,259 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



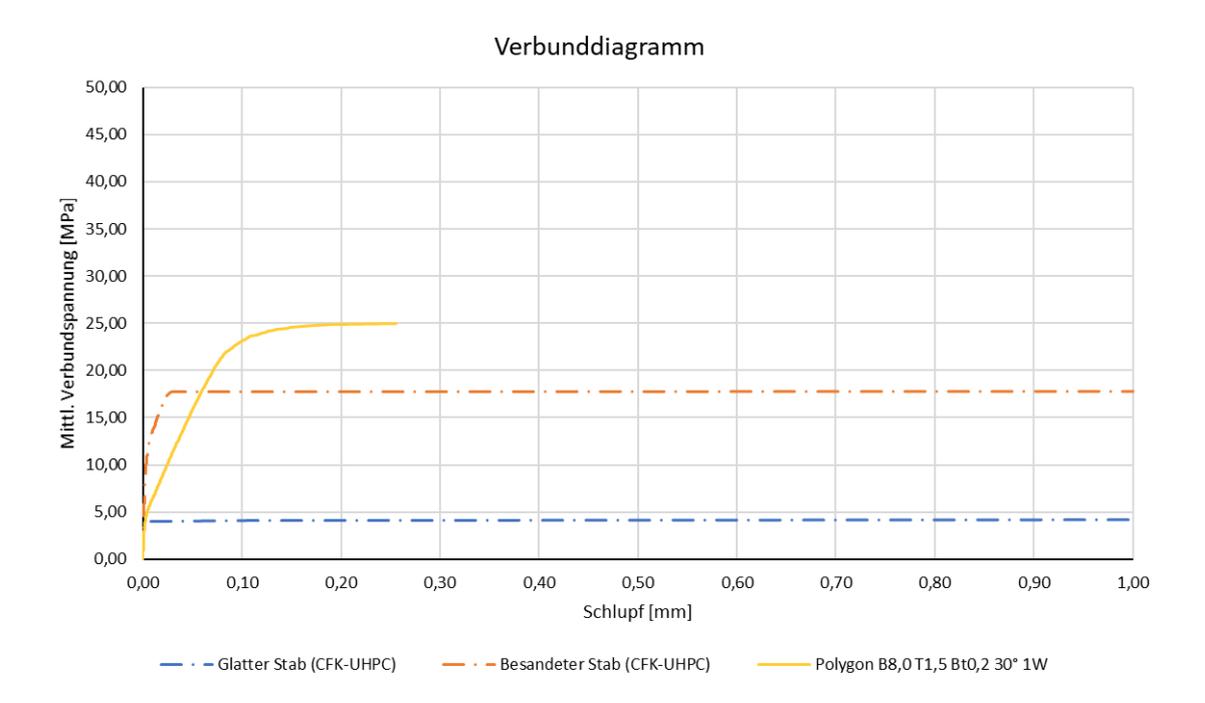
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



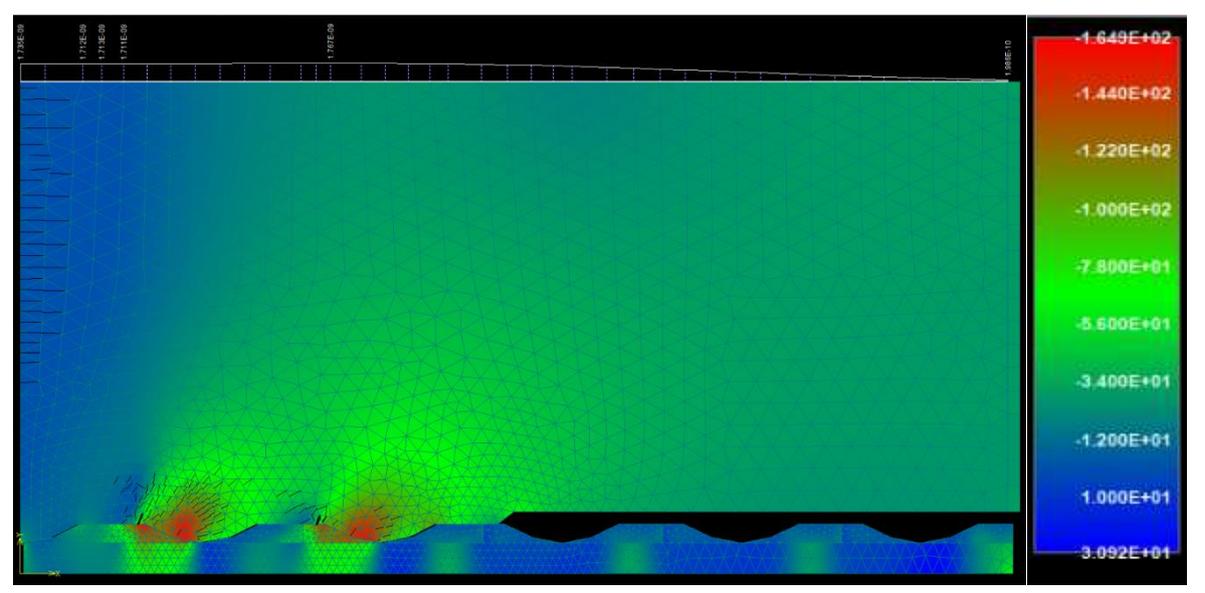
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>25,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,256 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

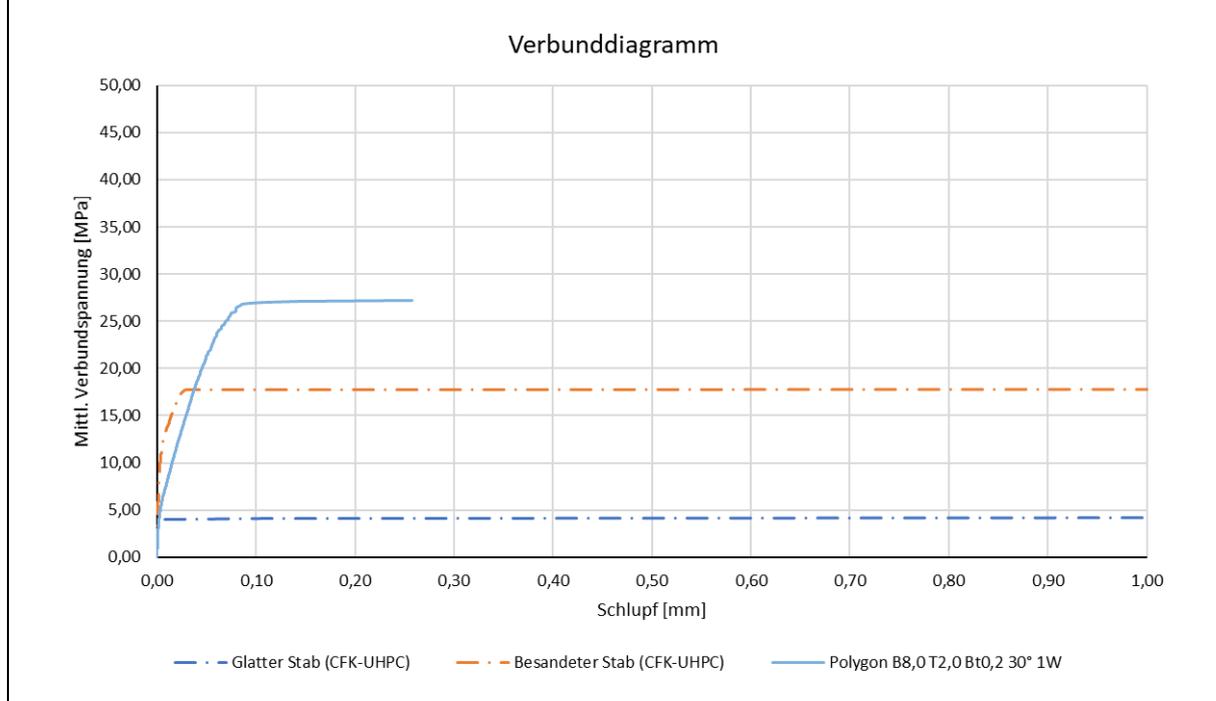


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

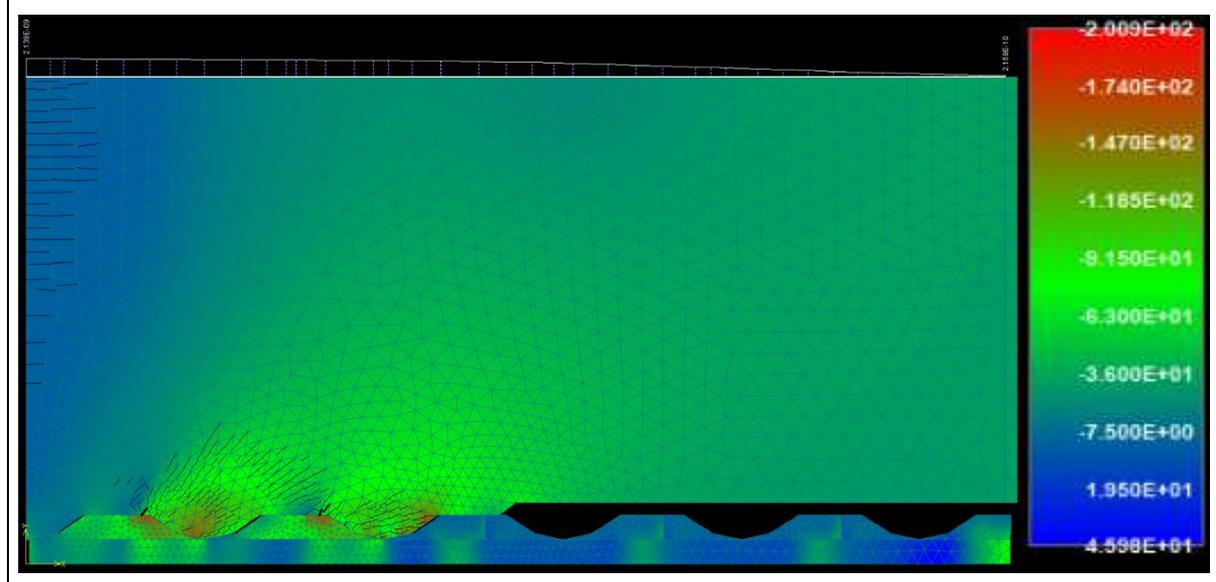


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	30°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>27,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,257 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

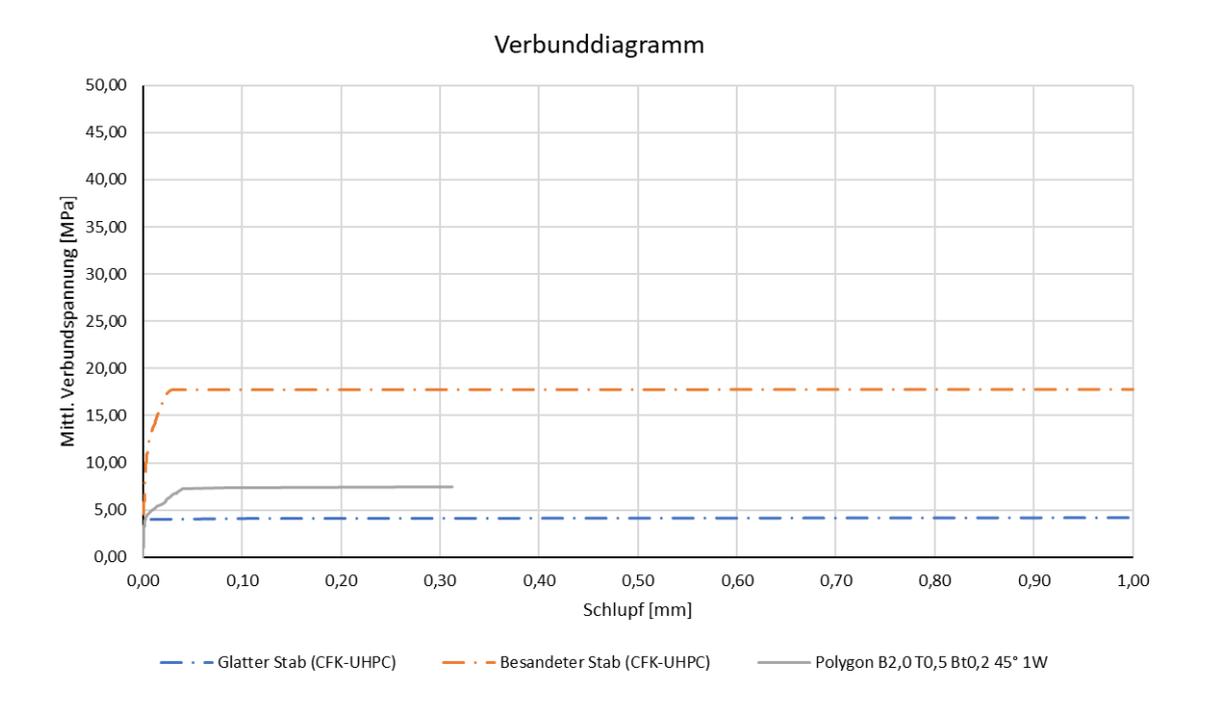


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

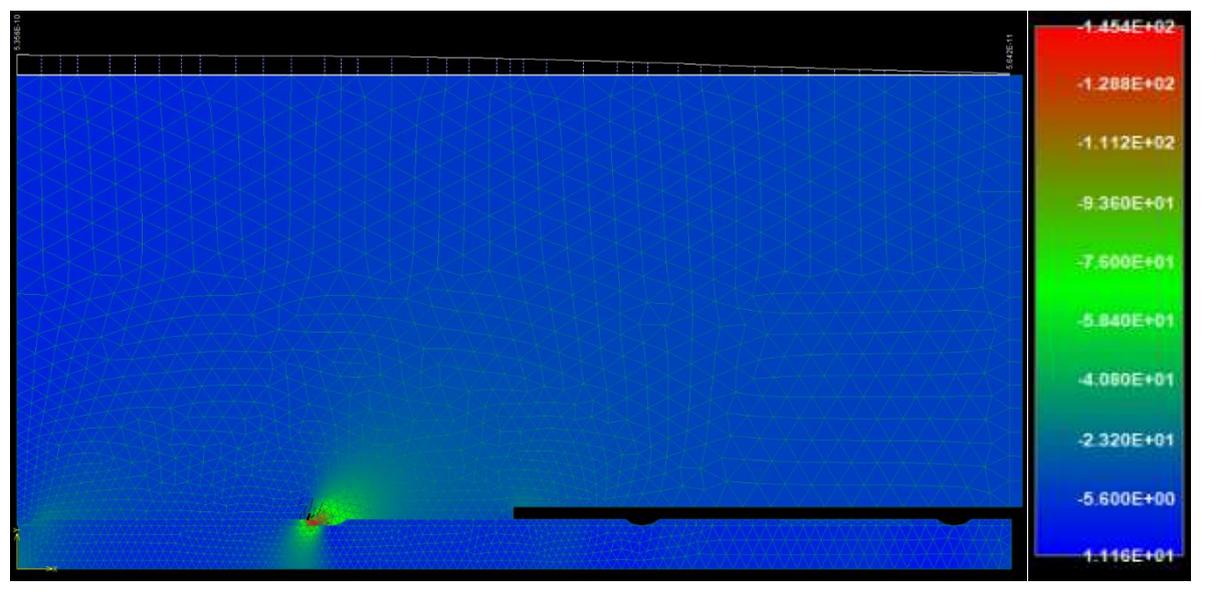


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>7,50 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,312 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

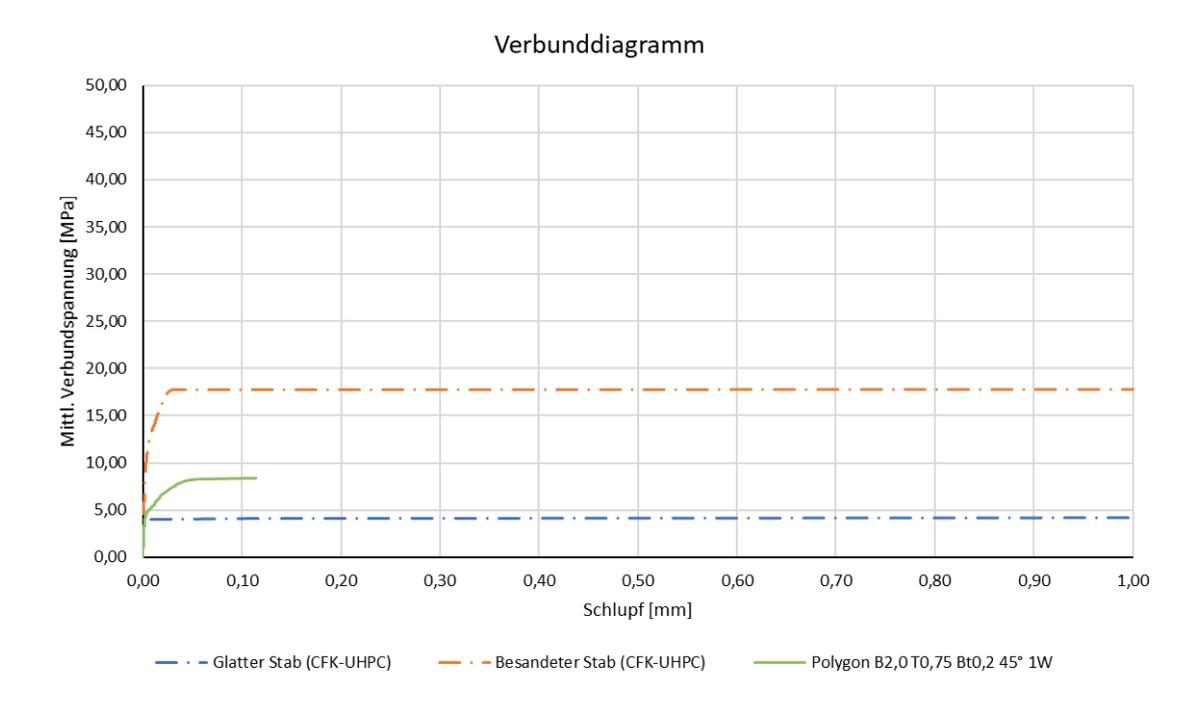


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

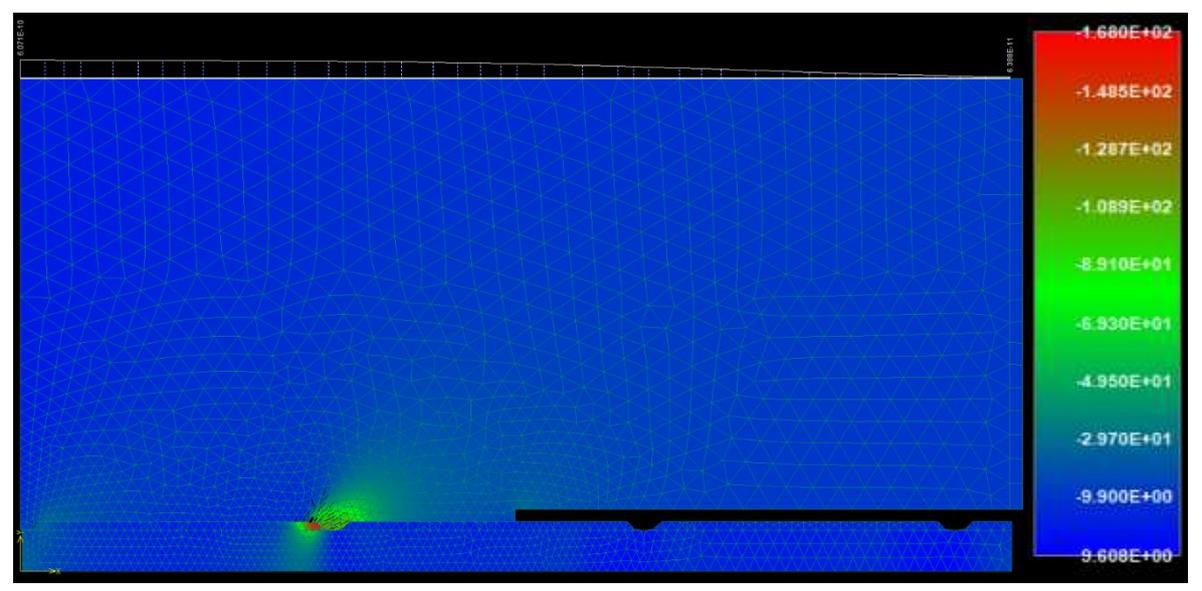


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>8,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,114 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



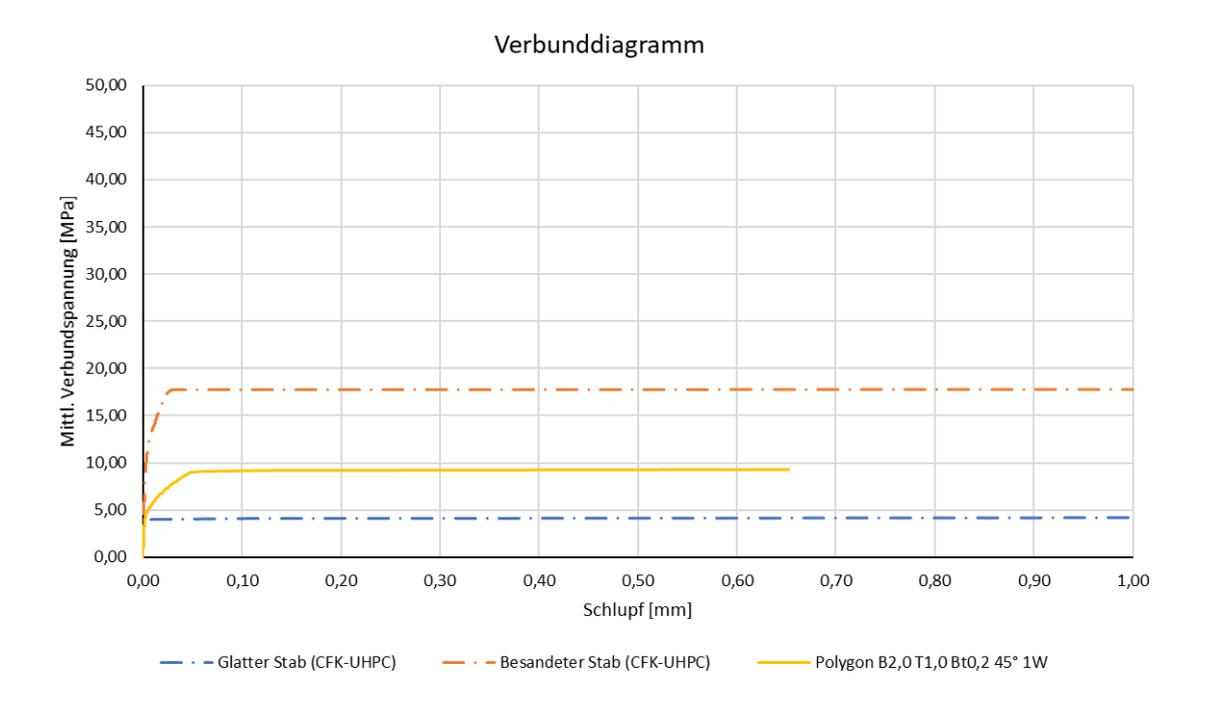
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



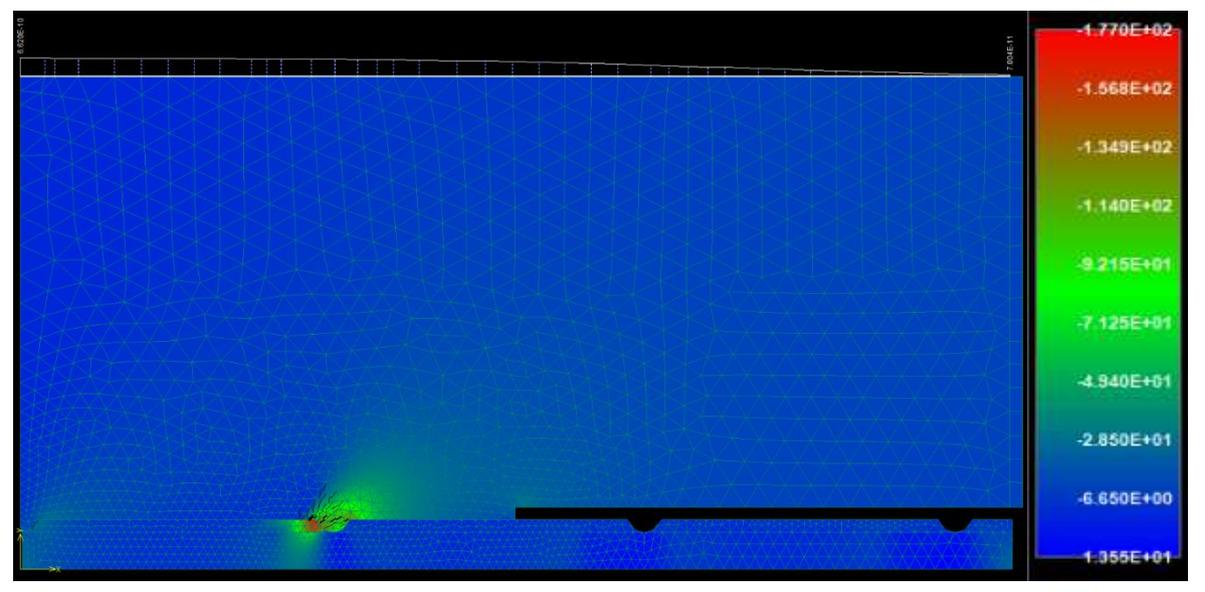
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	2,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>9,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,128 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

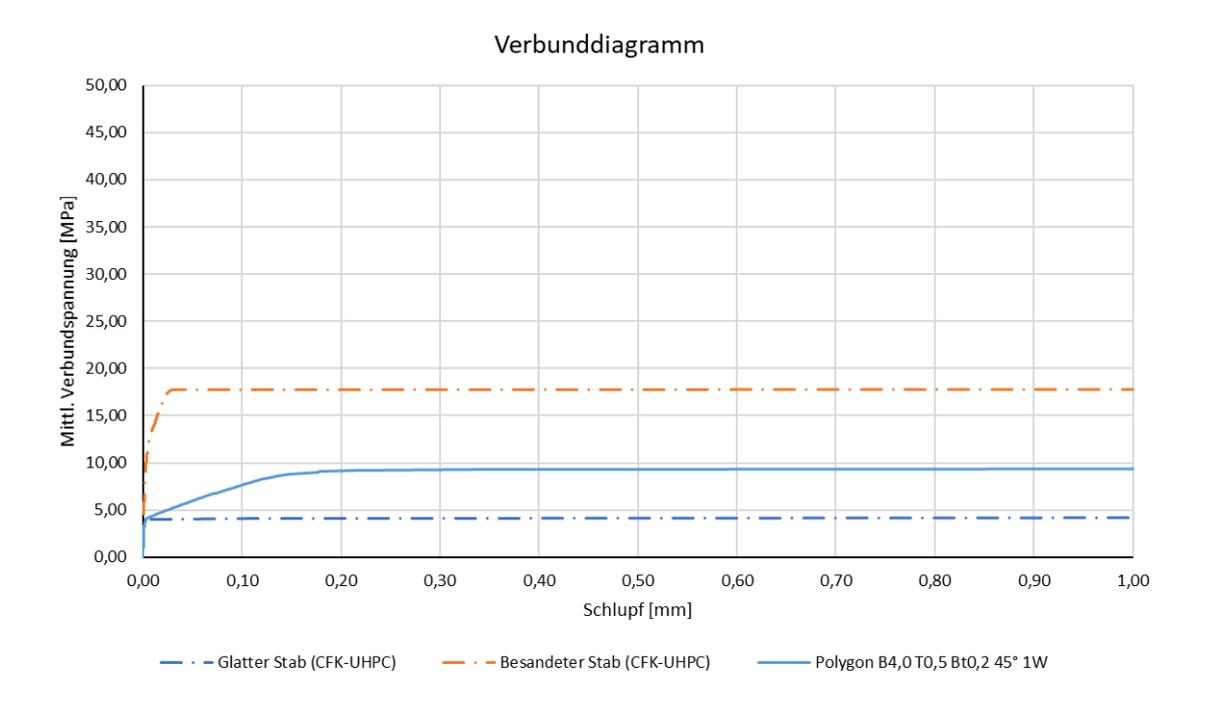


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

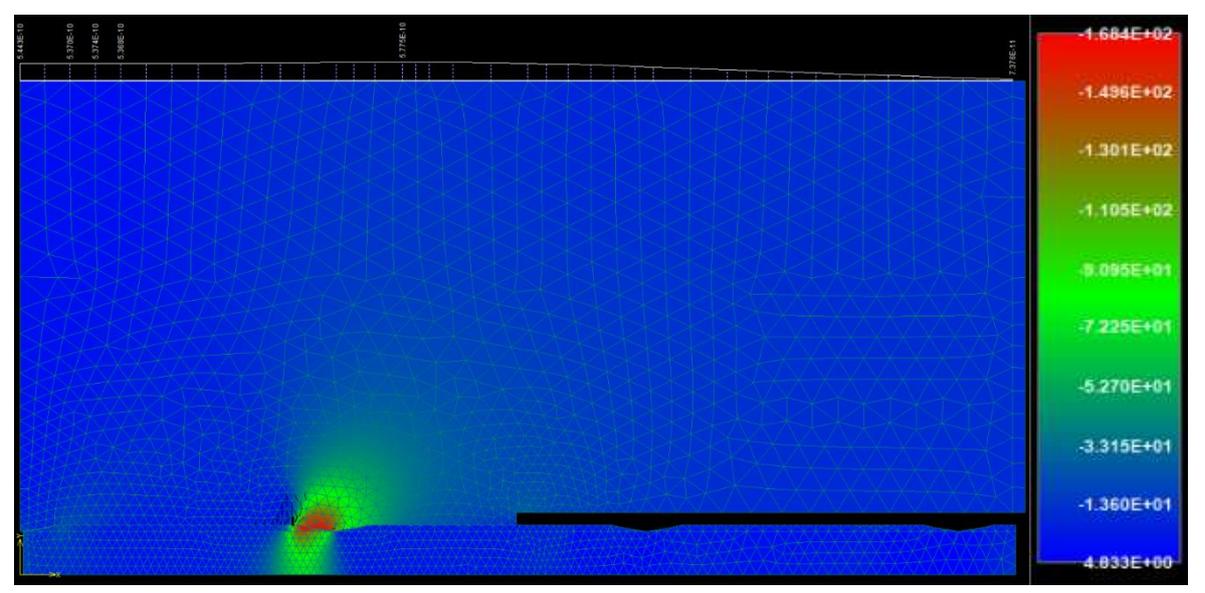


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		9,30 MPa
bei einem Schlupf von:		0,332 mm

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

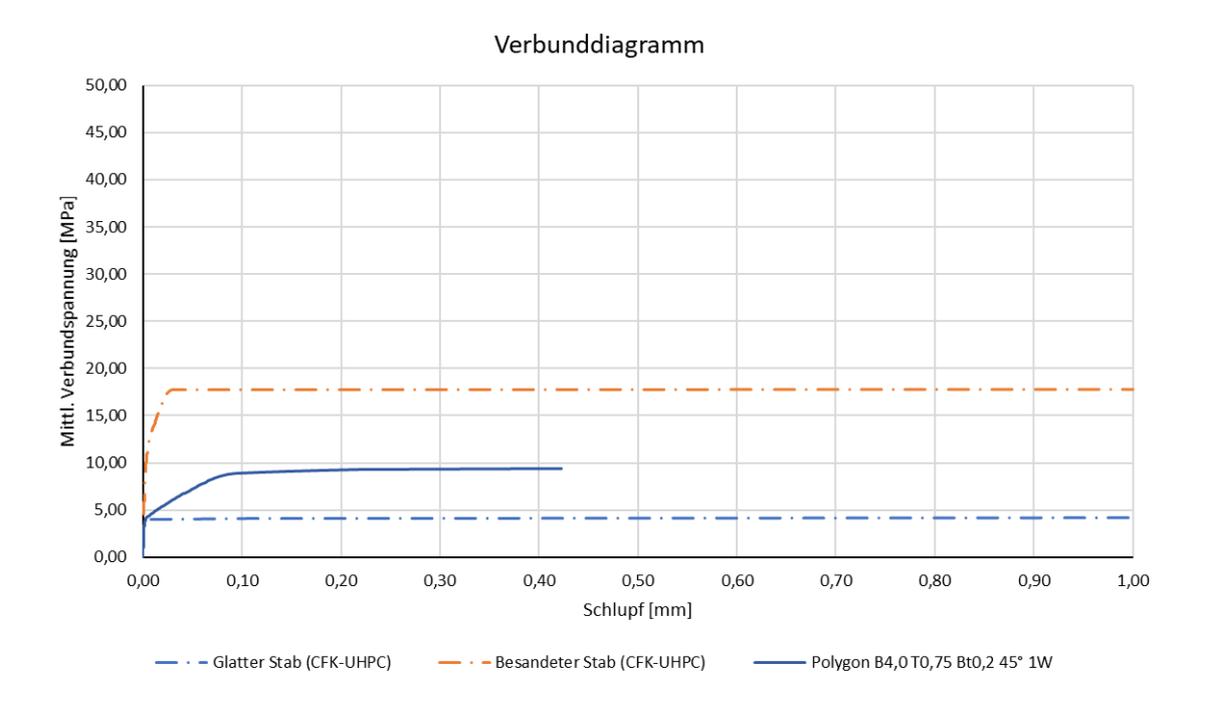


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

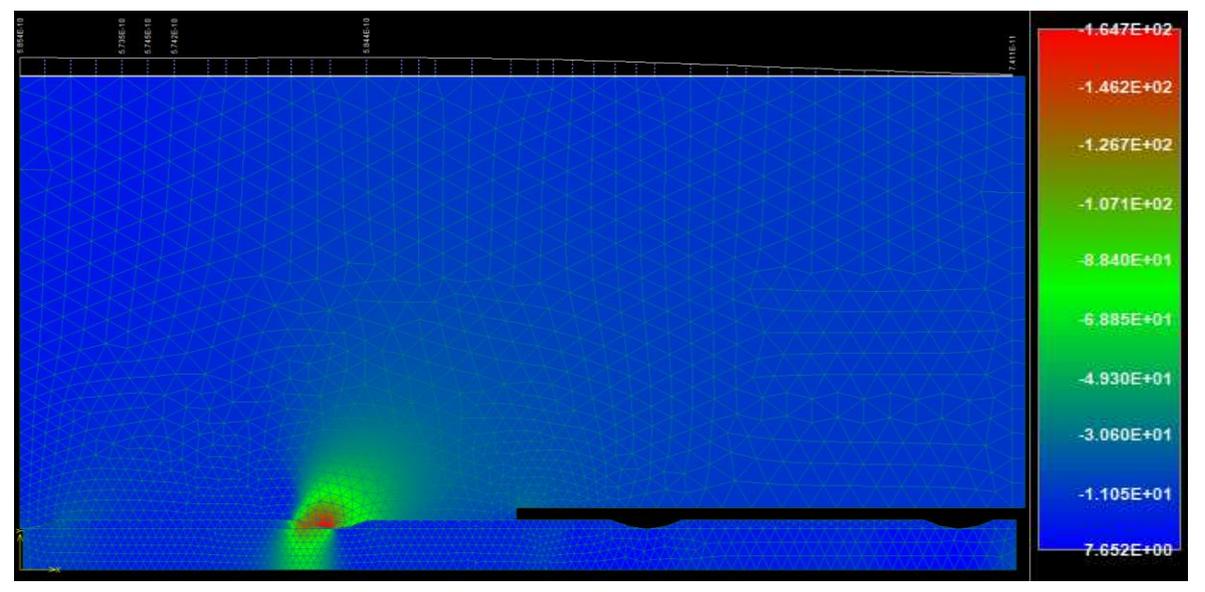


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>9,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,217 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

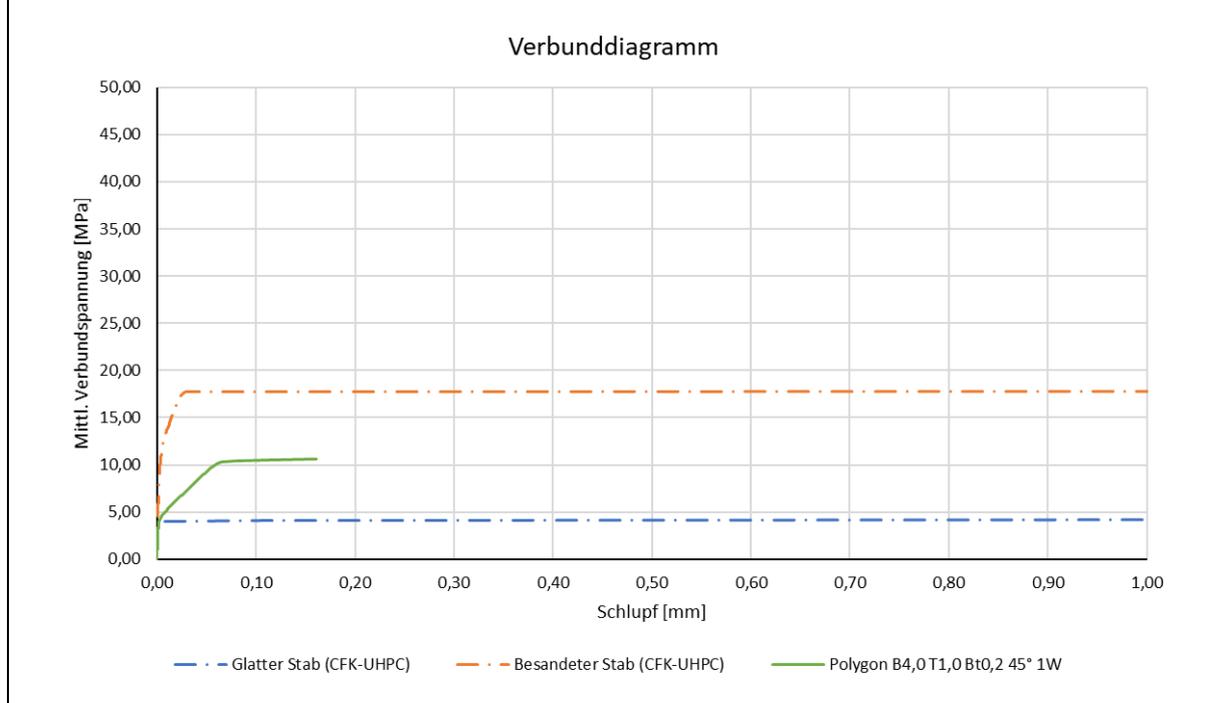


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

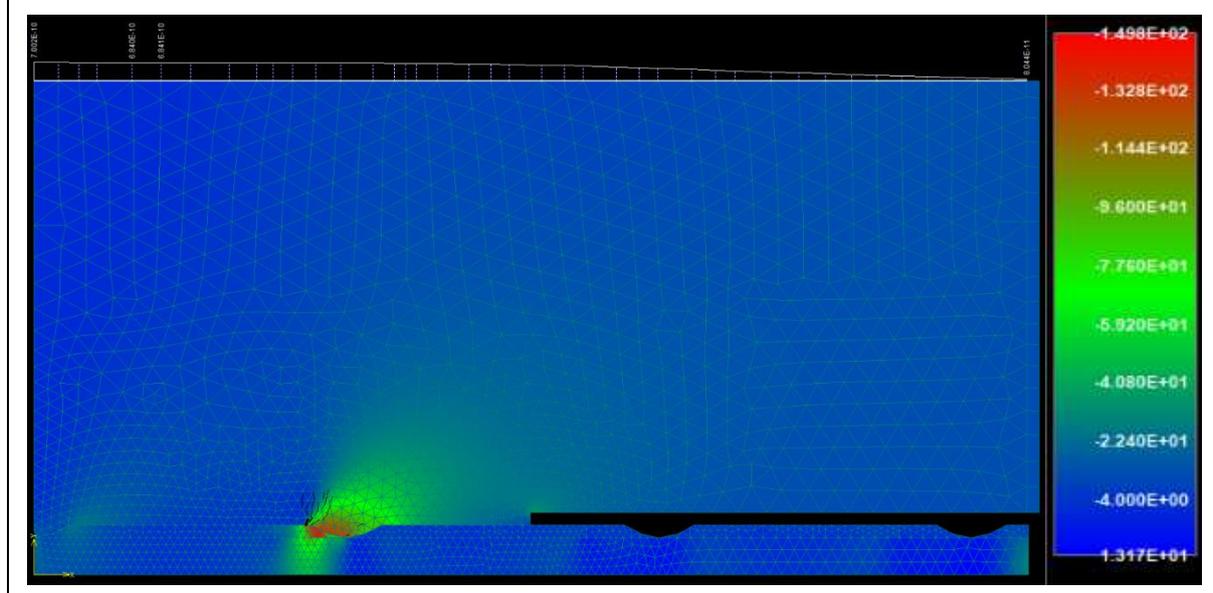


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>10,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,161 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



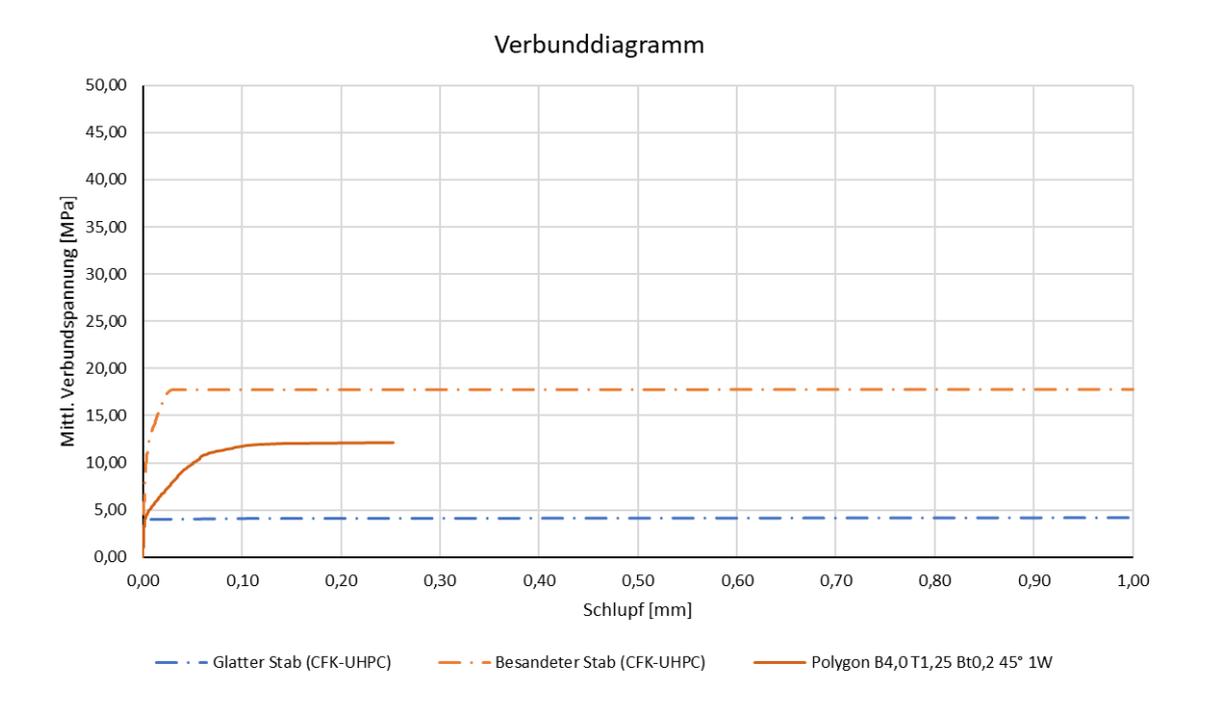
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



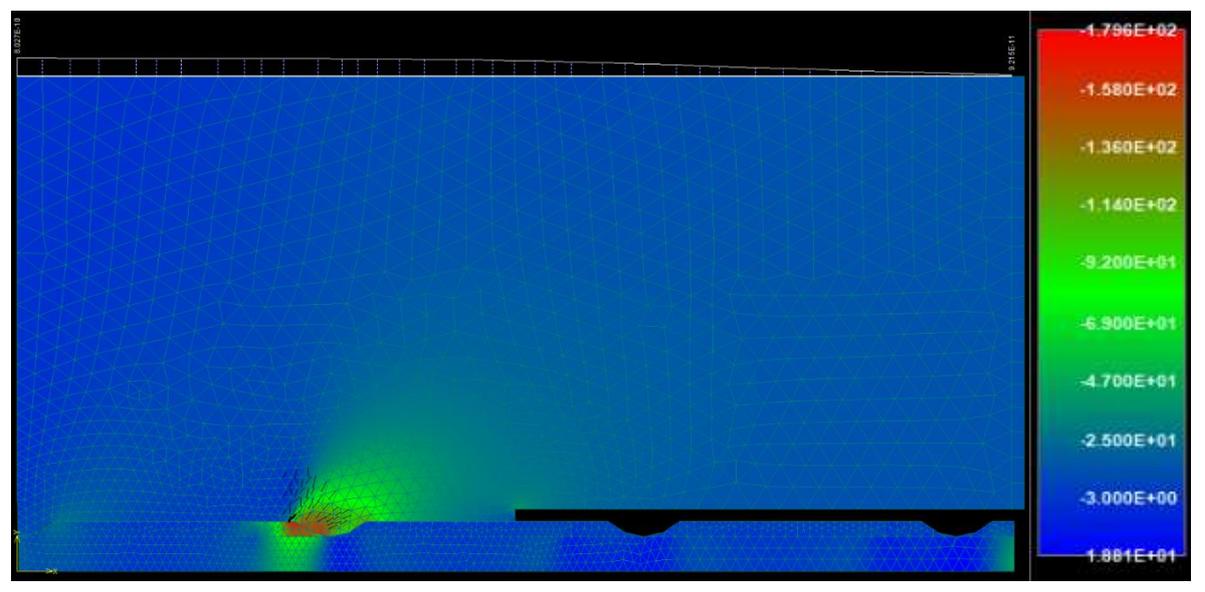
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>12,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,252 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

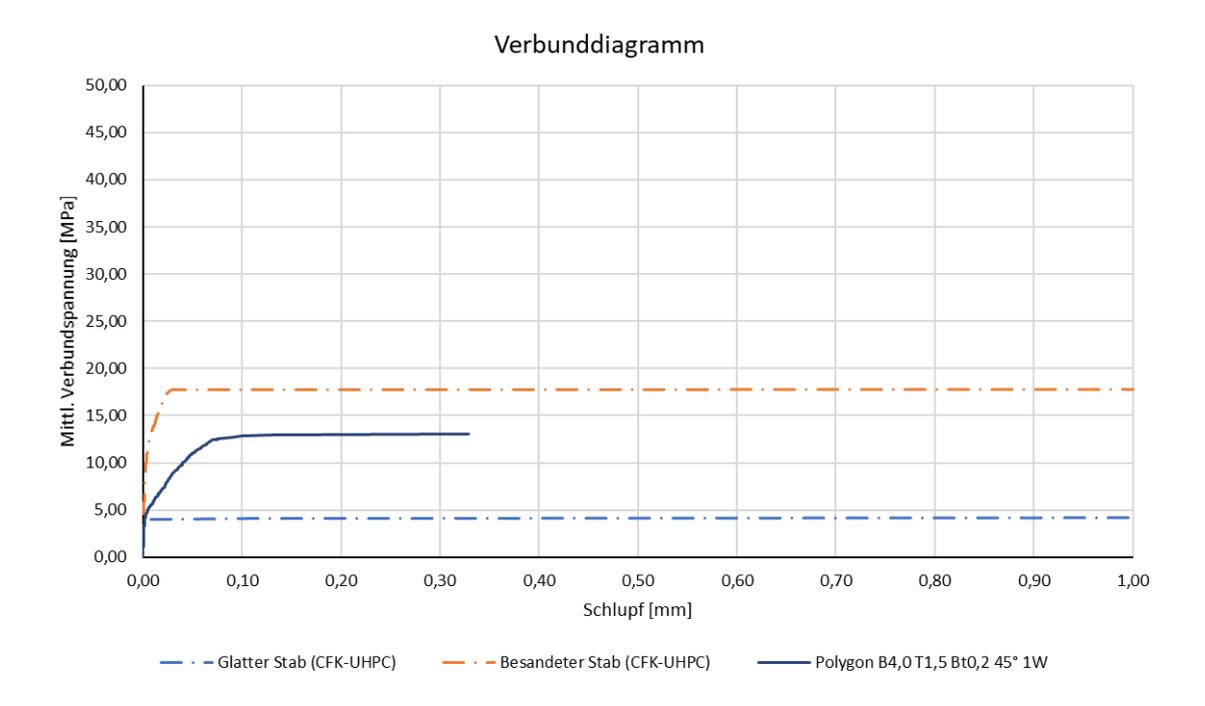


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

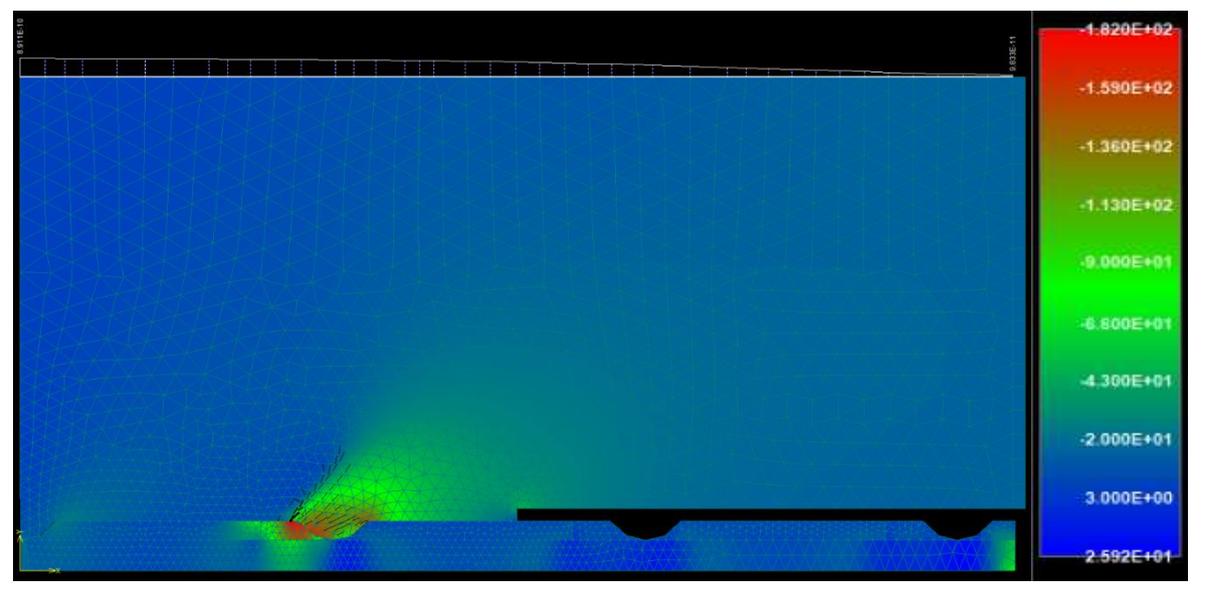


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>13,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,329 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



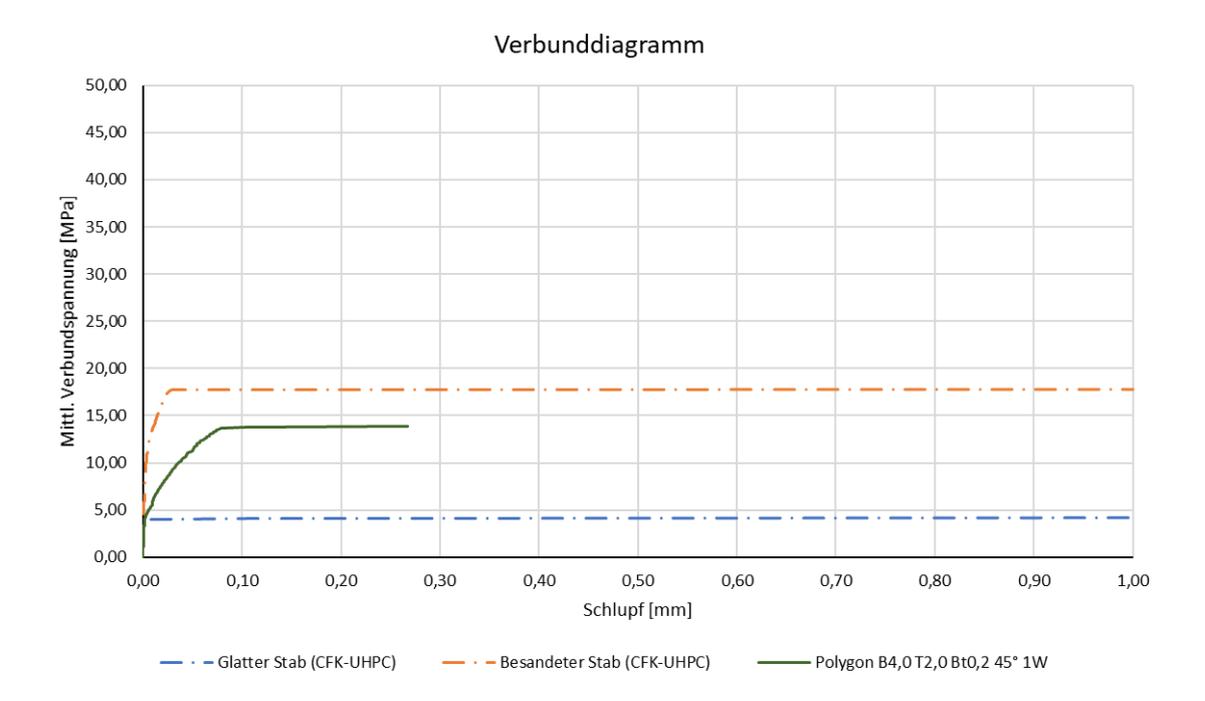
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



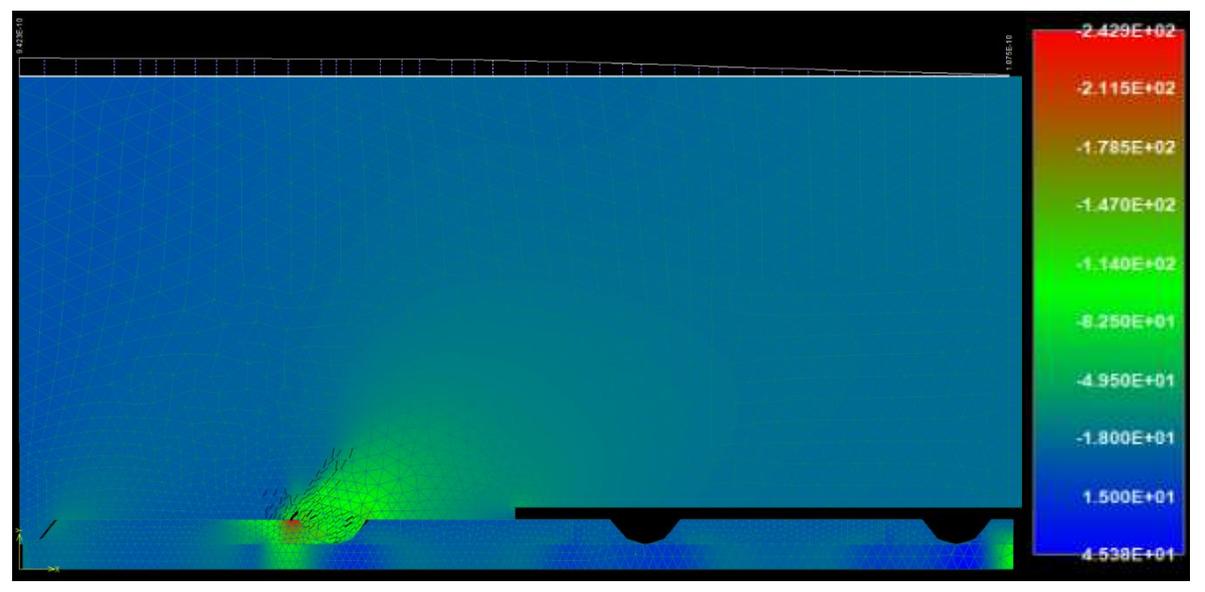
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	4,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>13,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,267 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

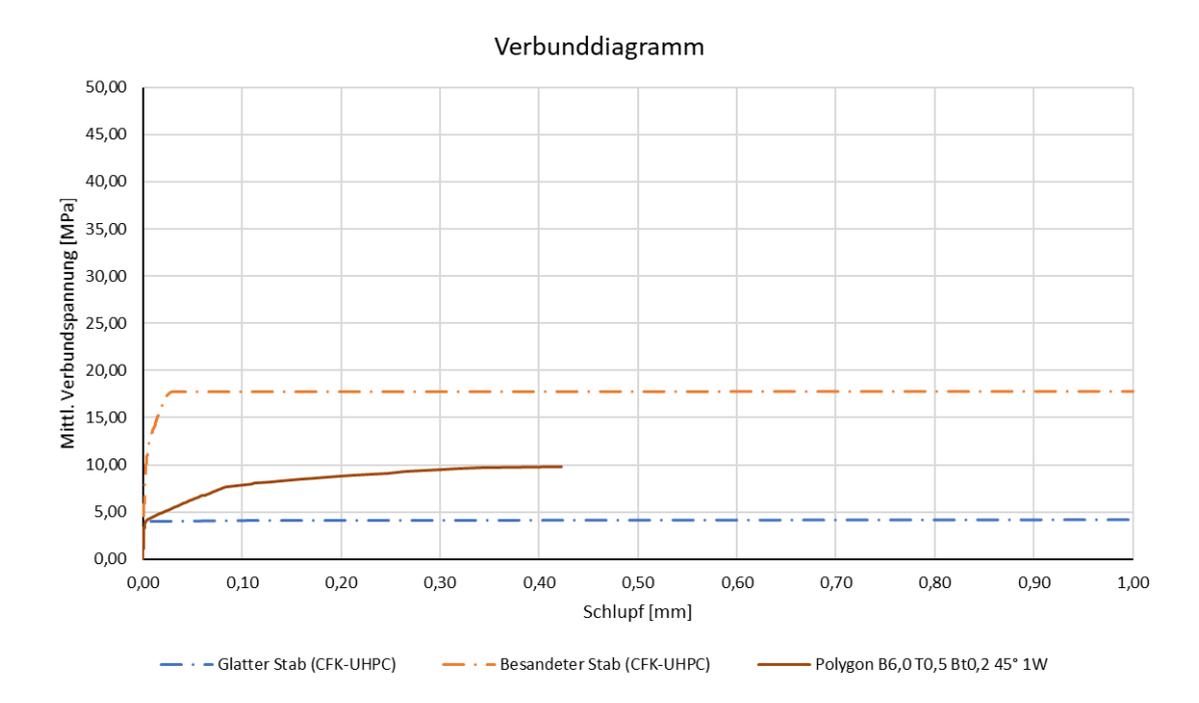


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

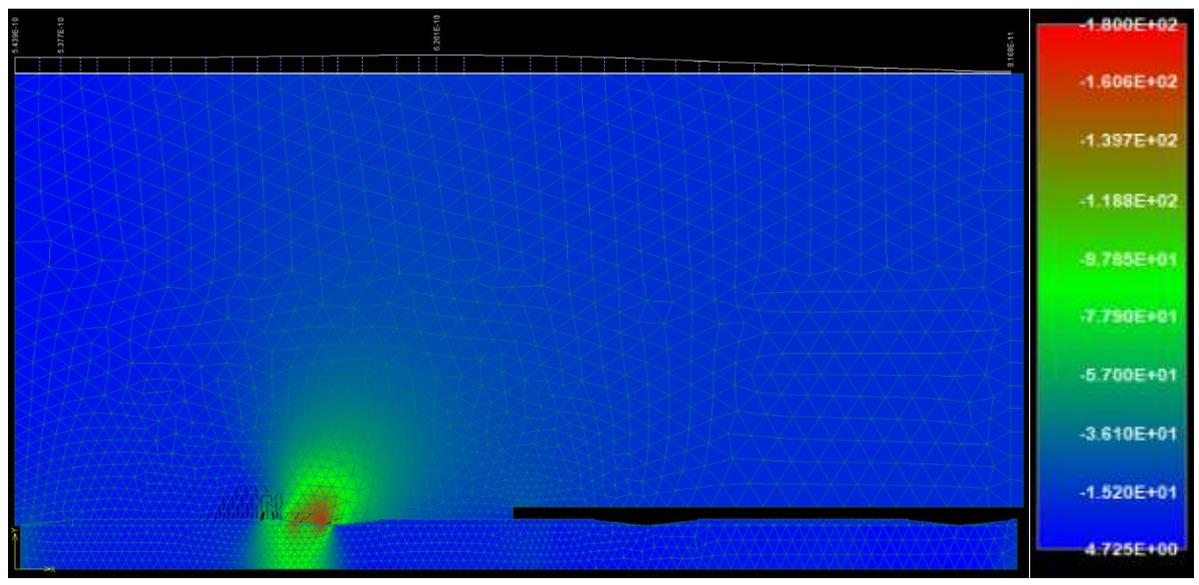


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>9,70 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,342 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



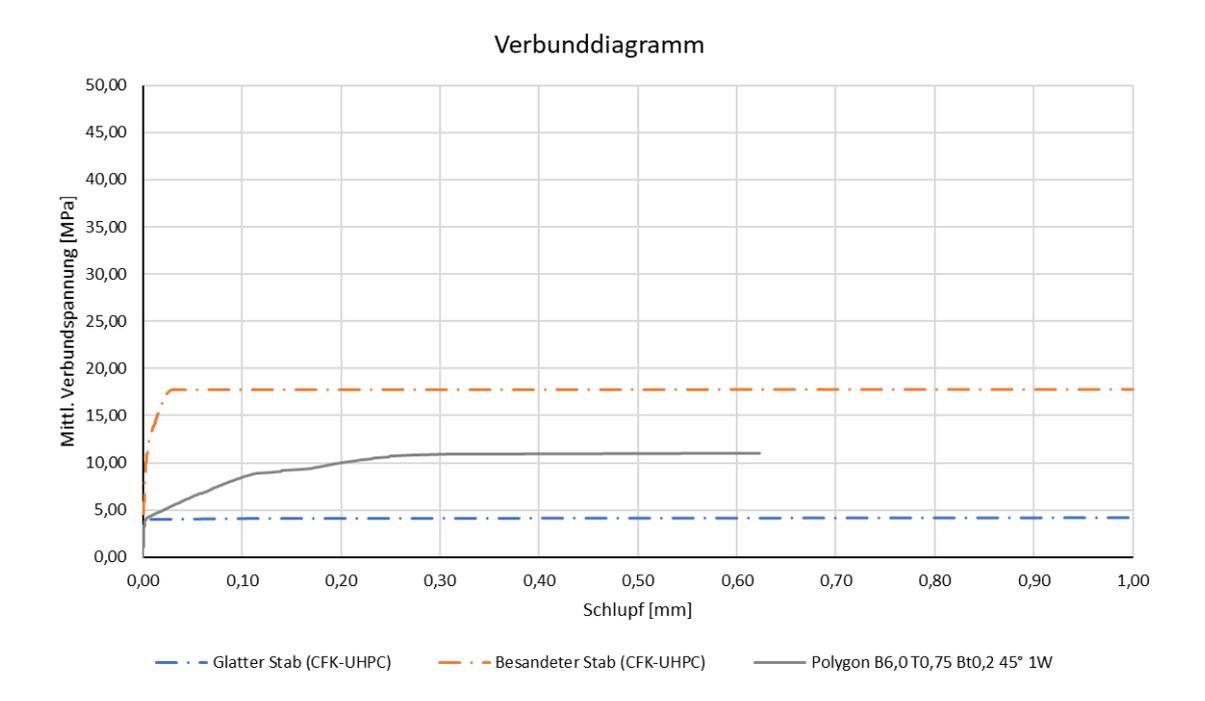
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



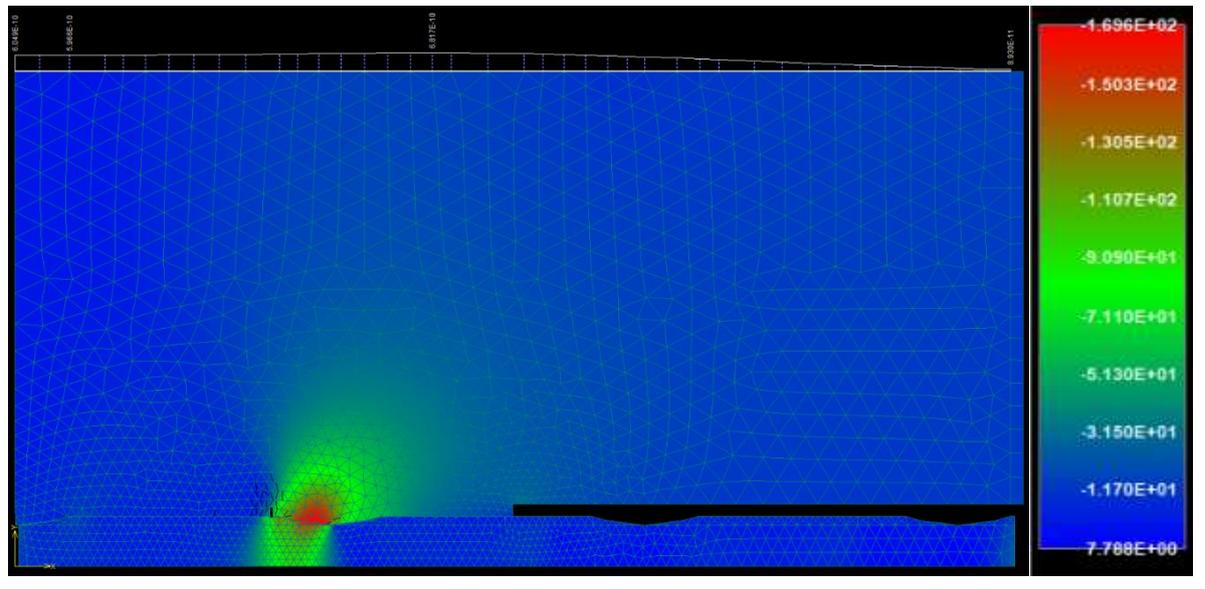
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>10,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,307 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

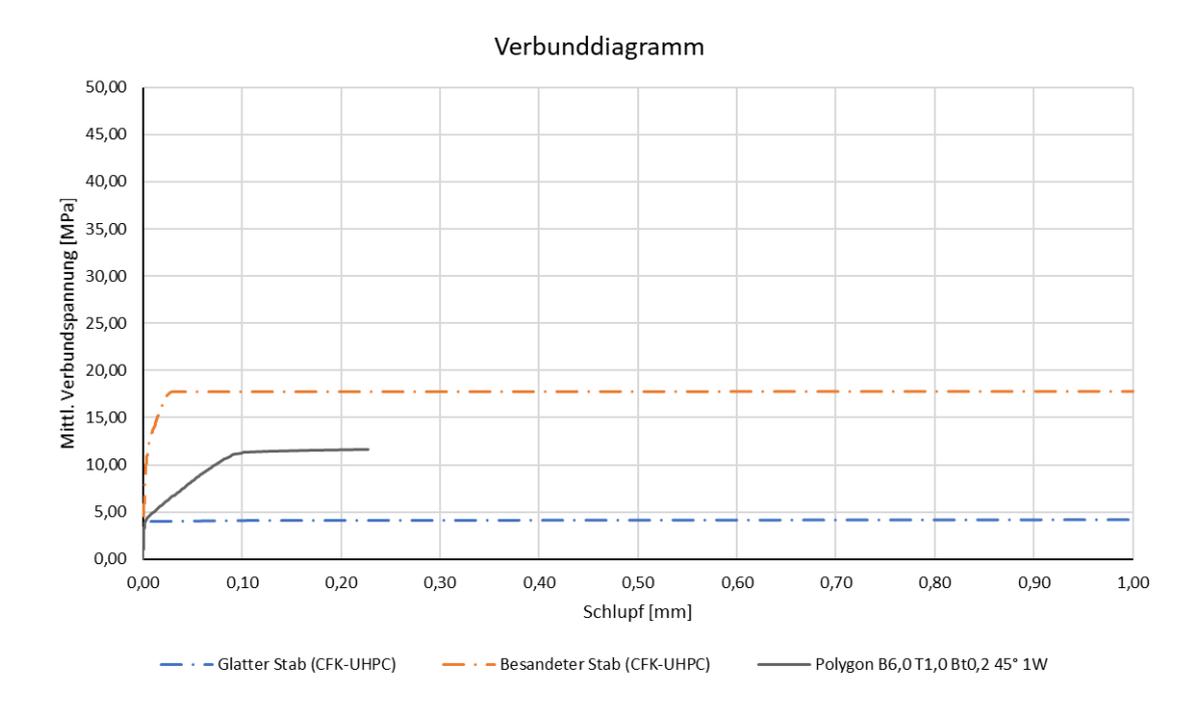


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

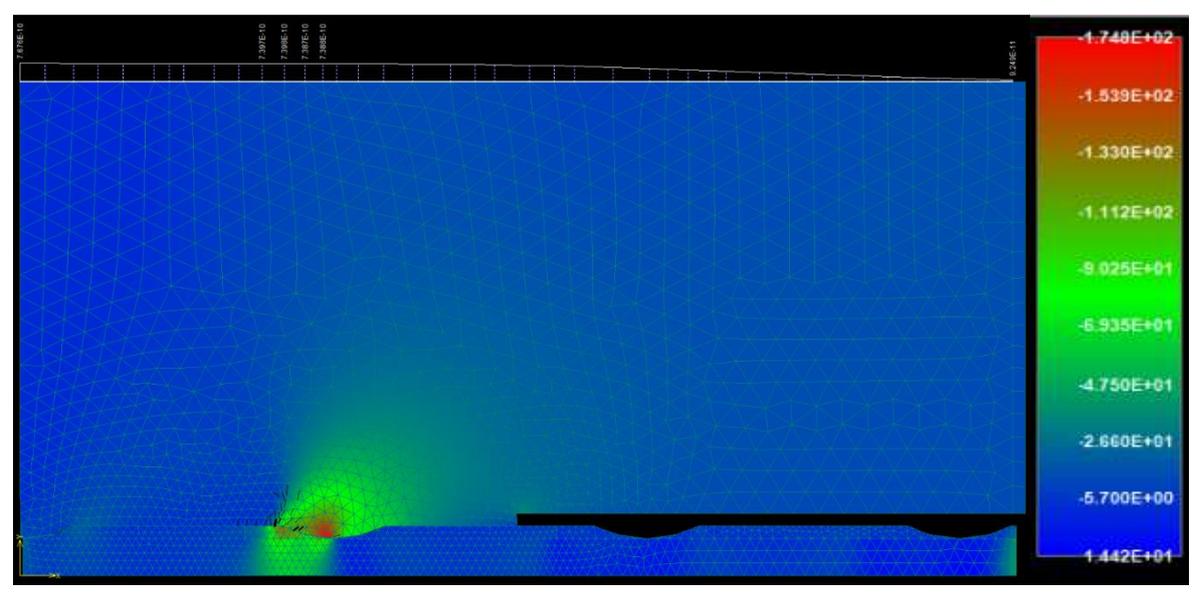


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>11,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,227 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



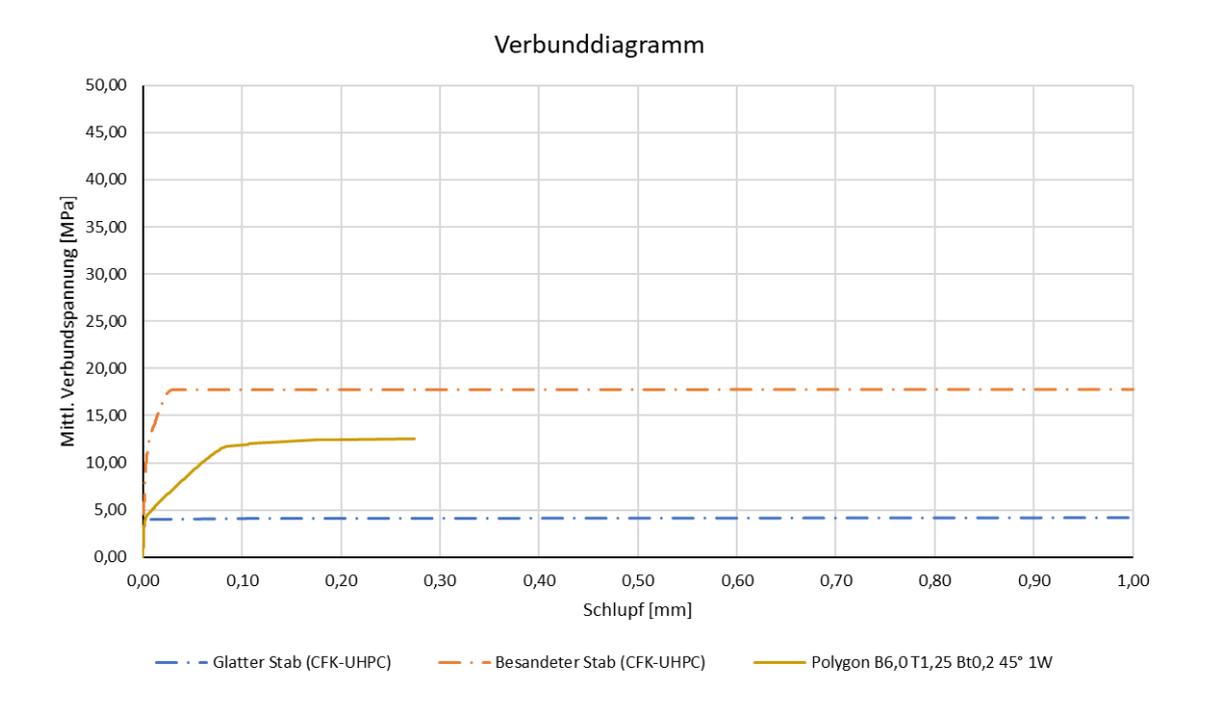
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



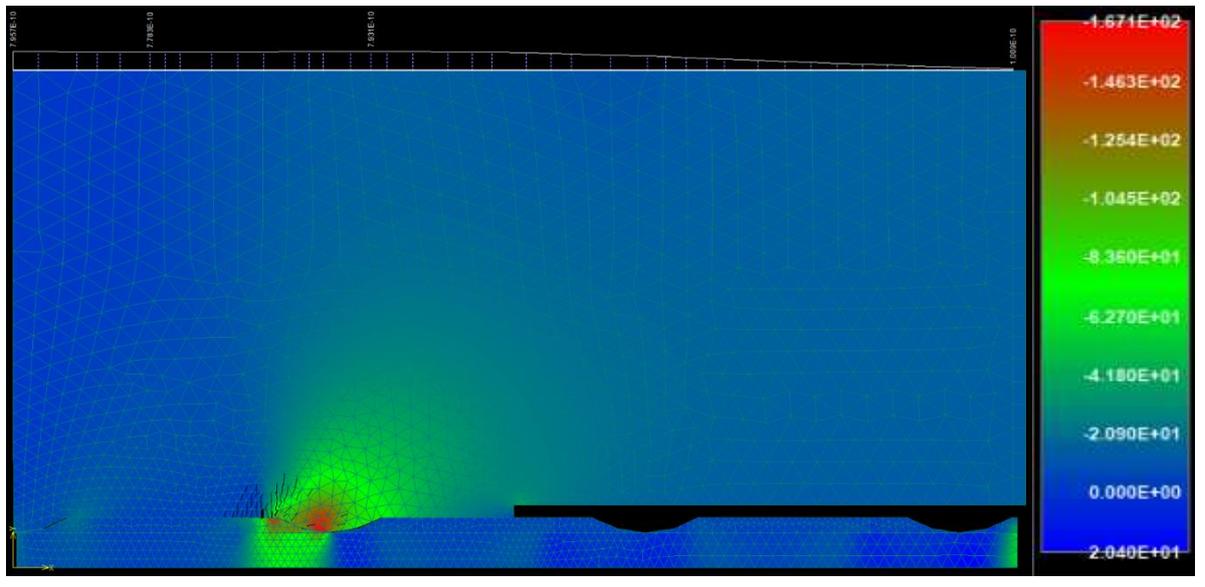
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>12,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,274 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

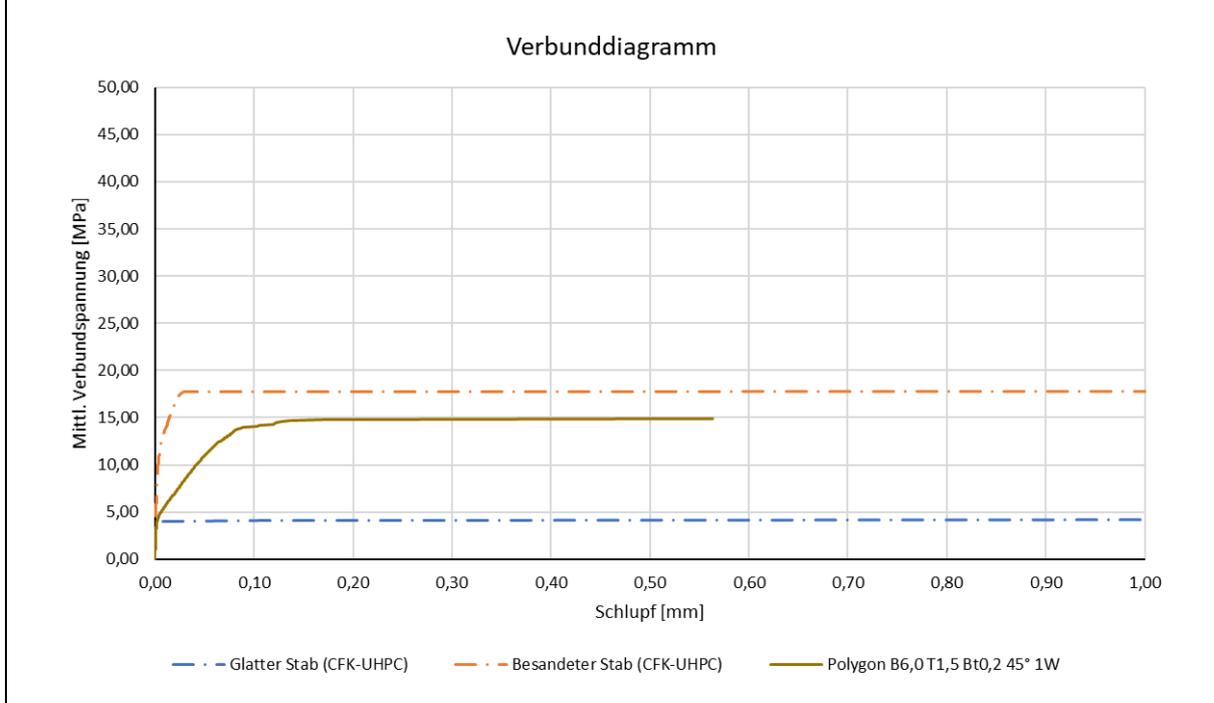


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

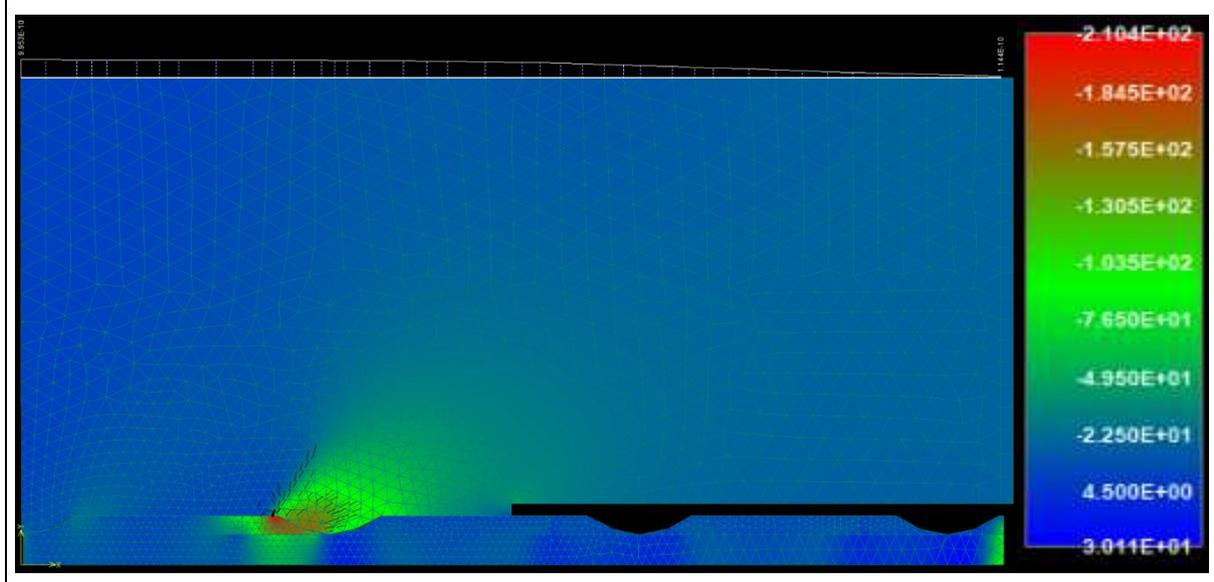


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>14,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,169 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

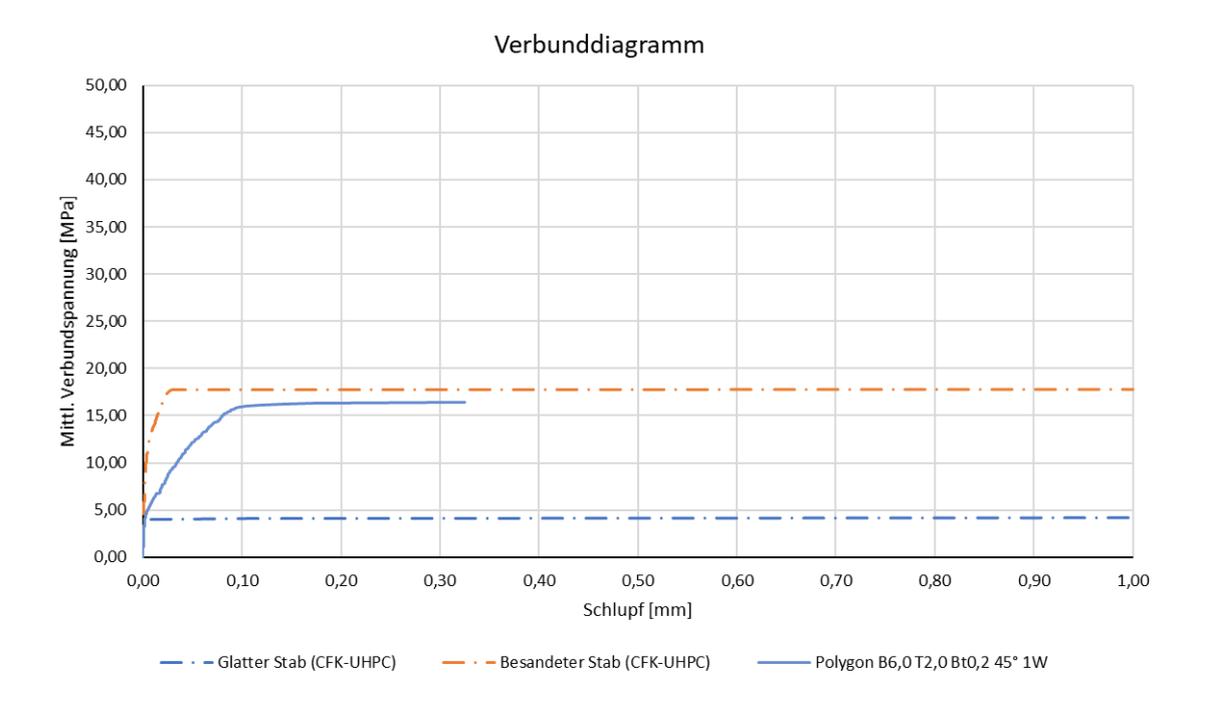


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

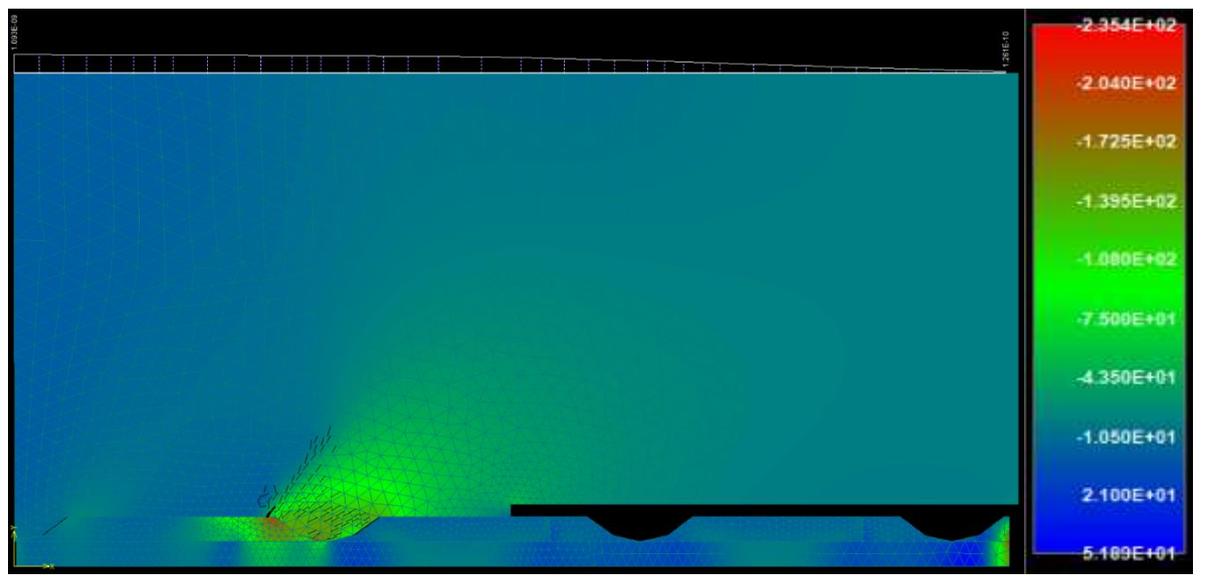


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	6,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>16,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,325 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

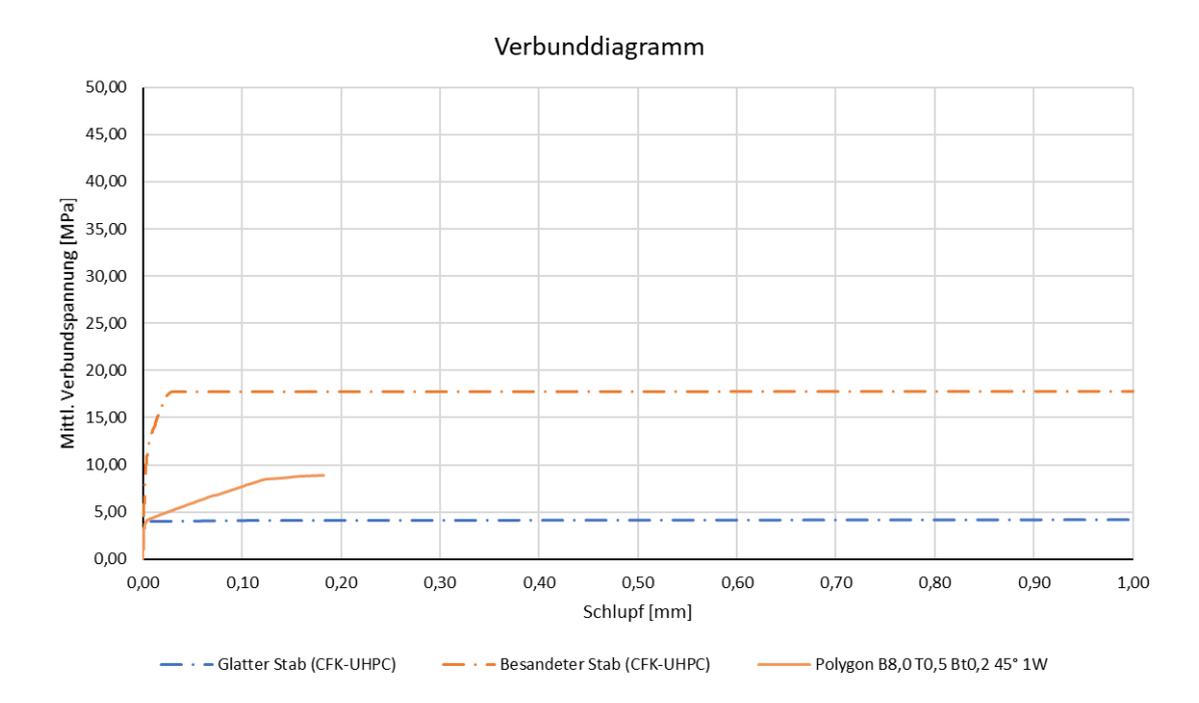


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

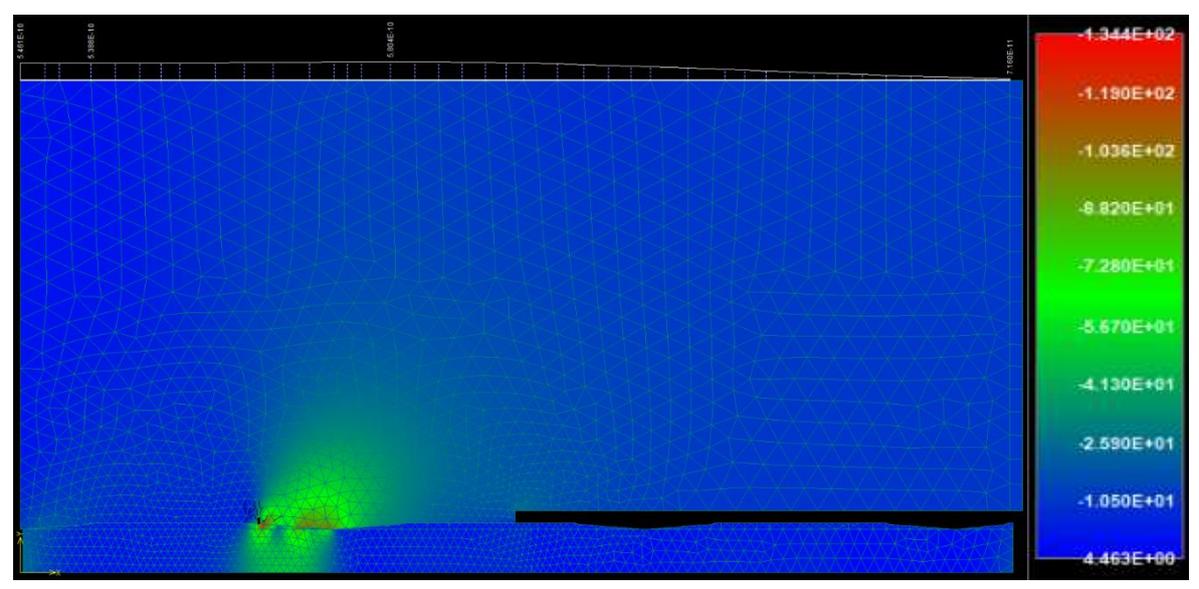


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>8,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,182 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



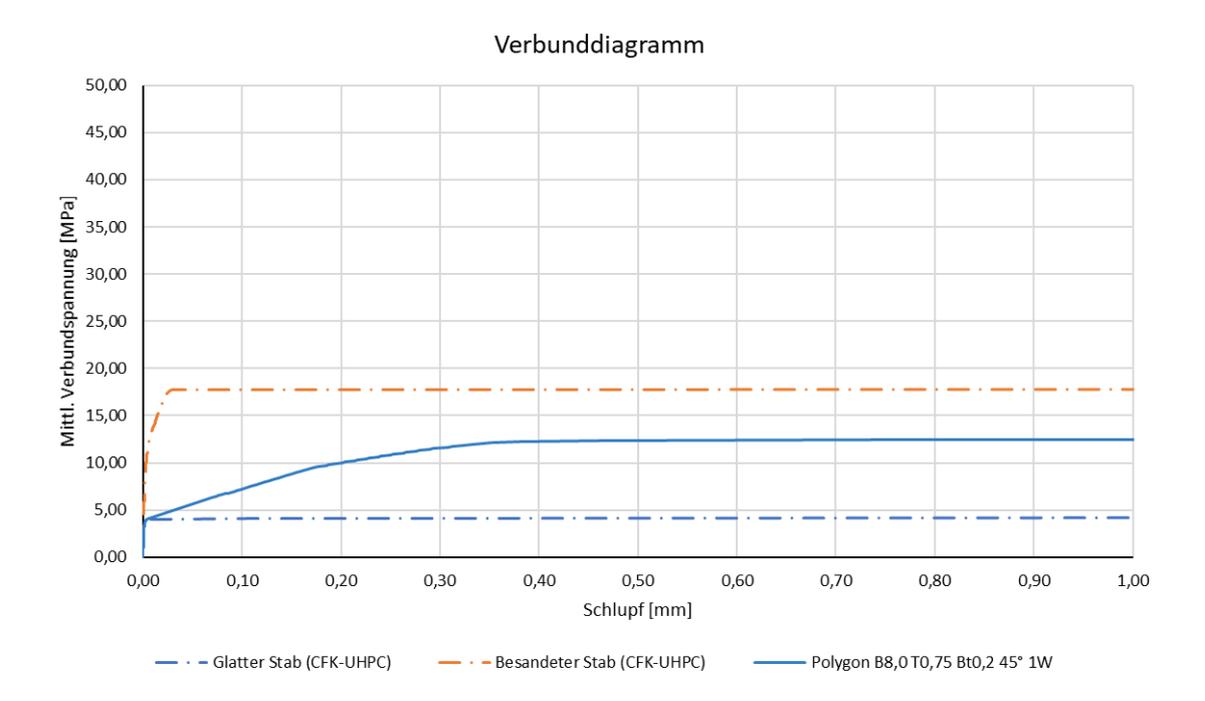
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



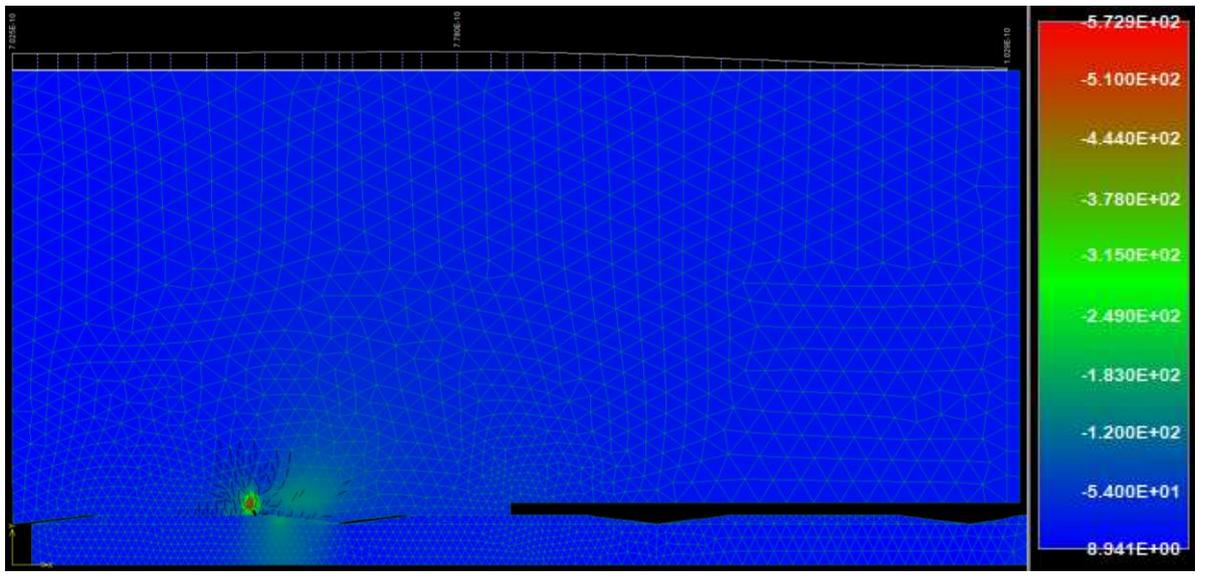
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>12,20 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,380 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

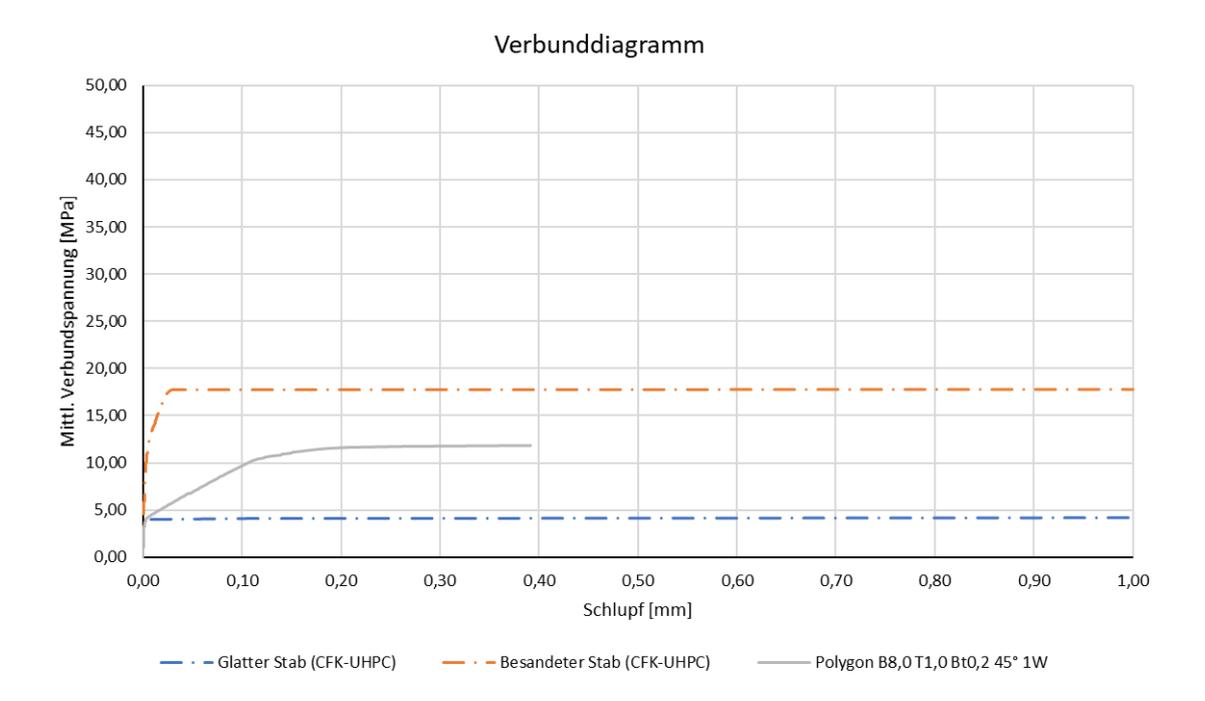


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

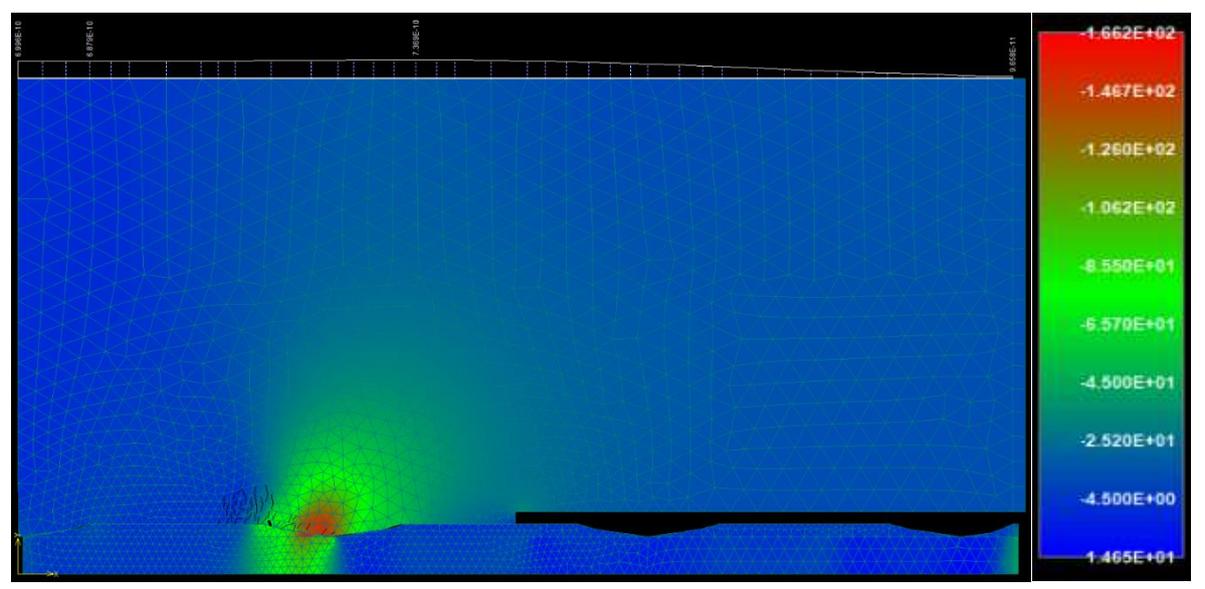


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>11,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,392 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

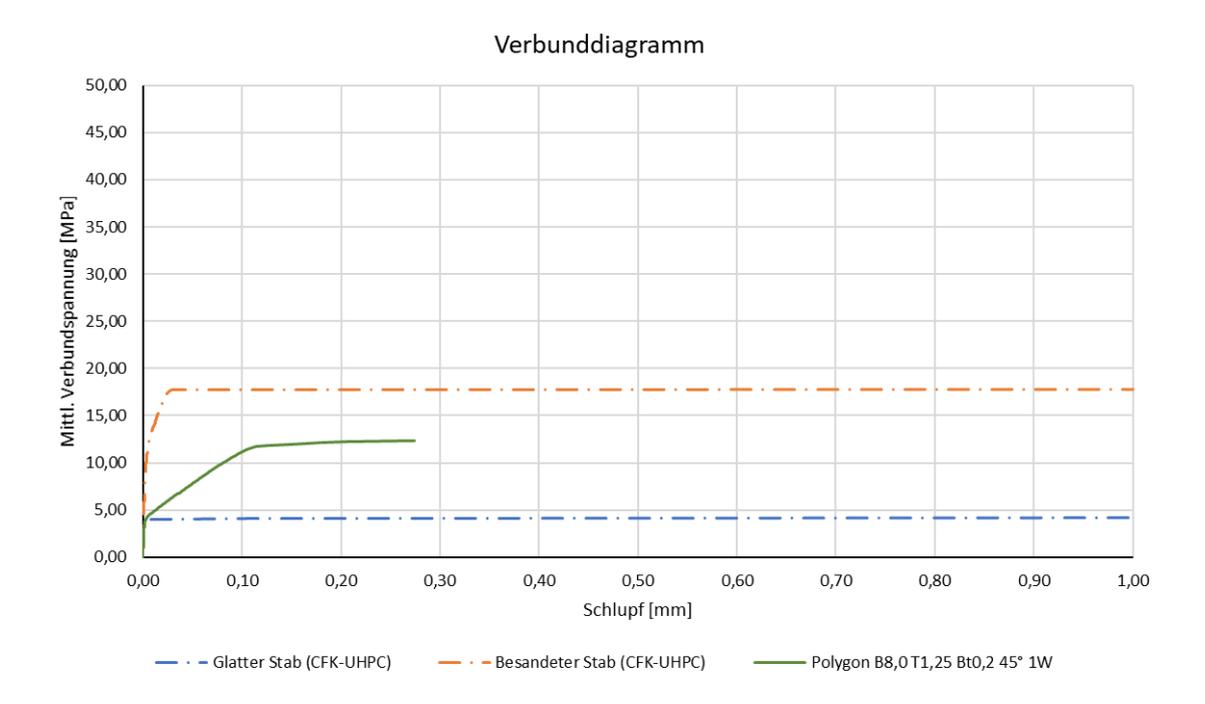


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

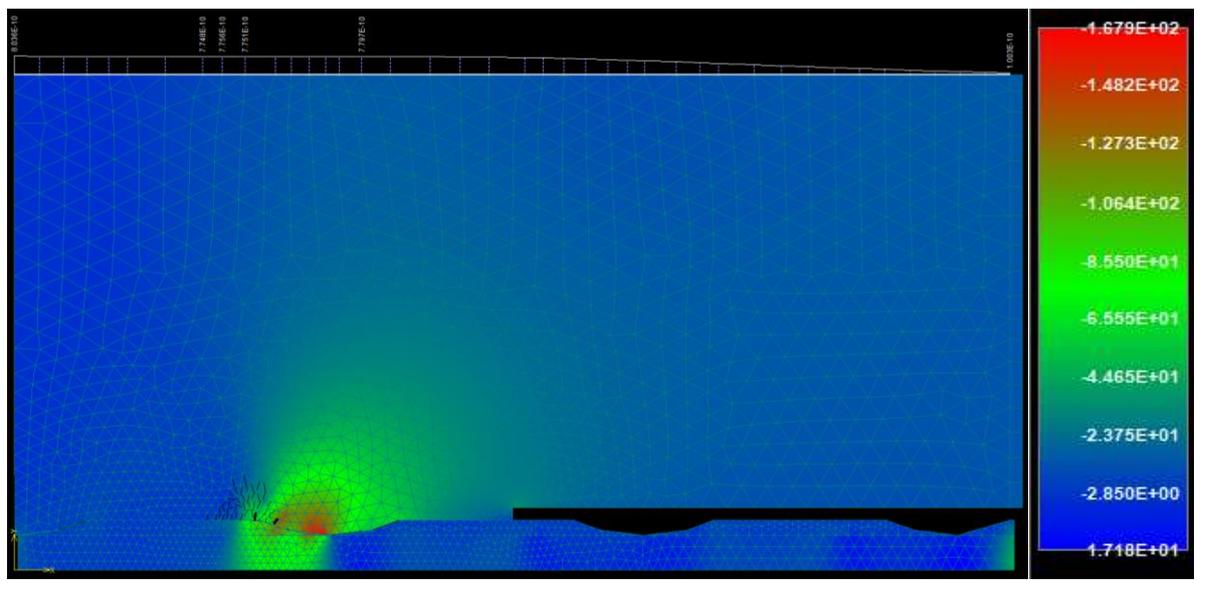


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,25 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>12,30 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,275 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

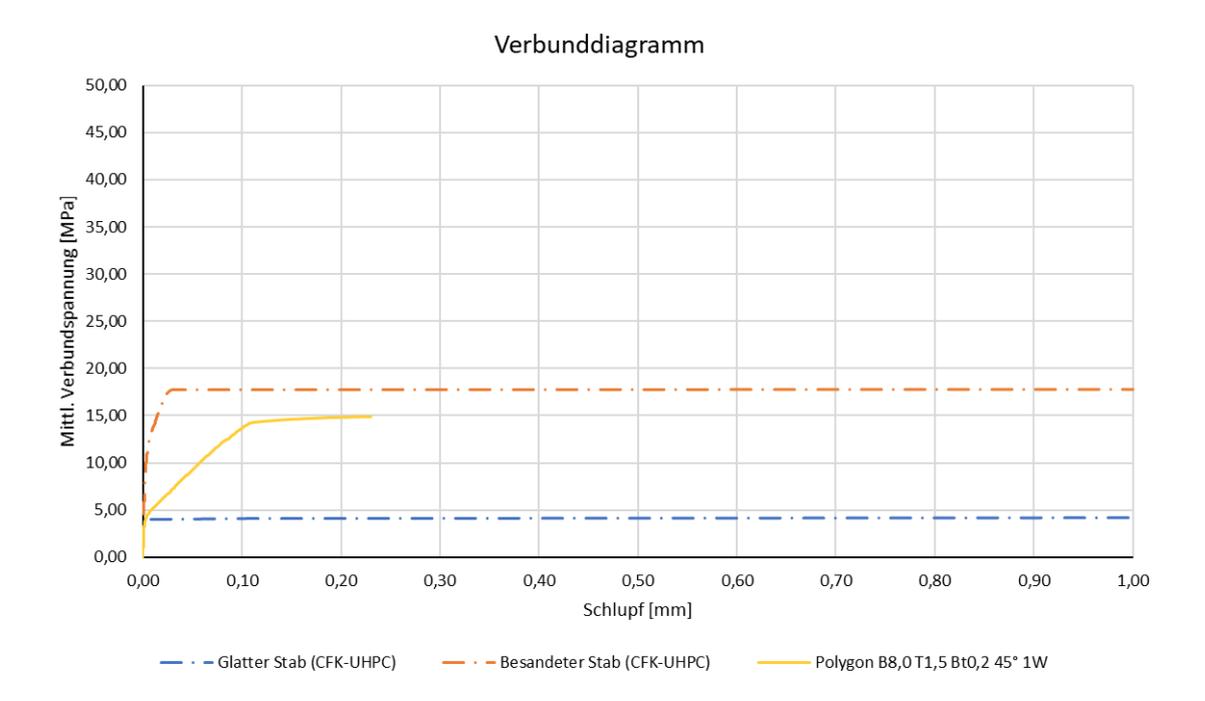


**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**

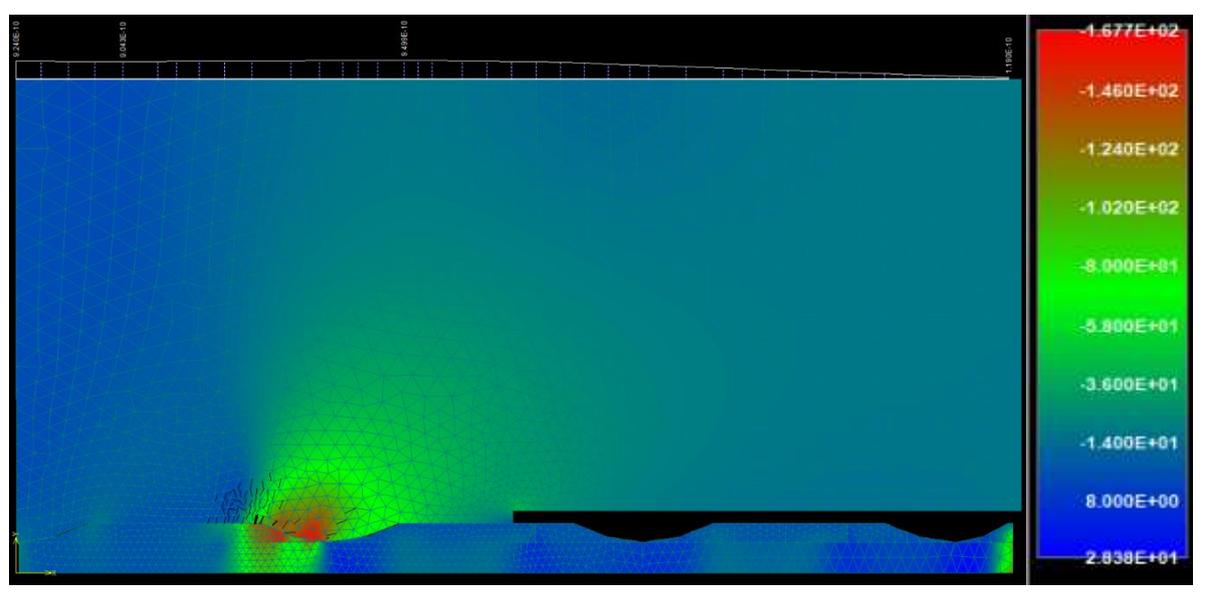


Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	1,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>14,90 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,230 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



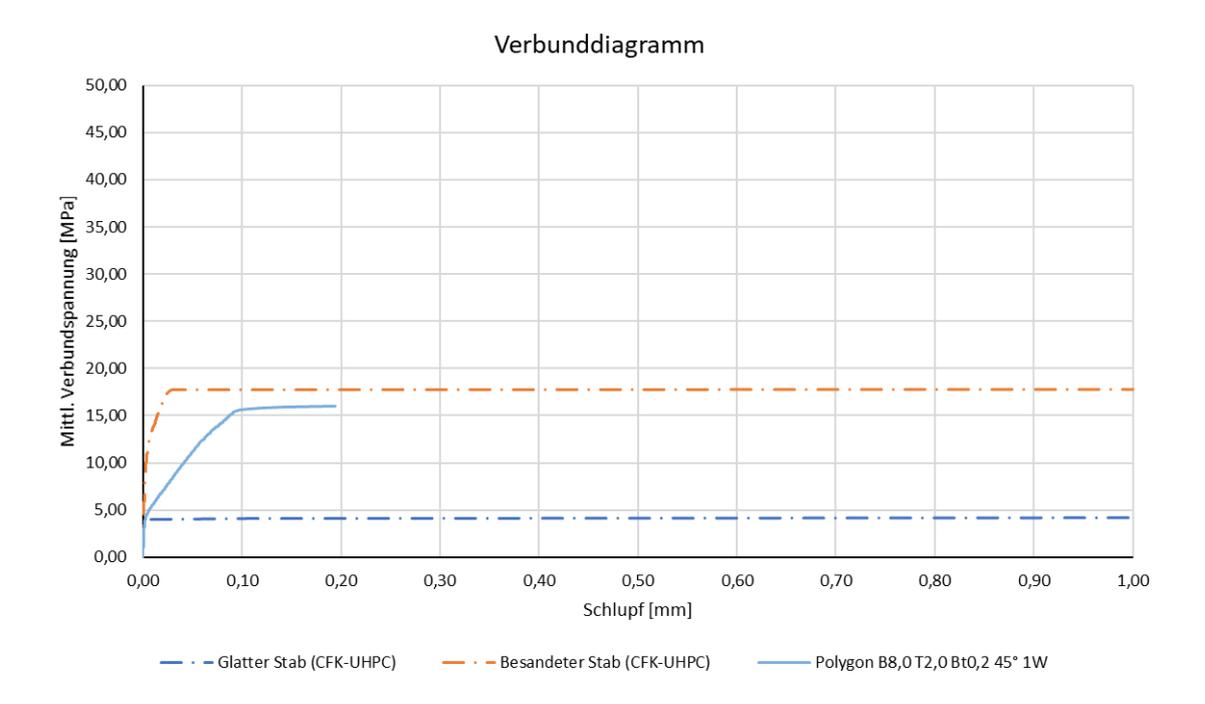
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



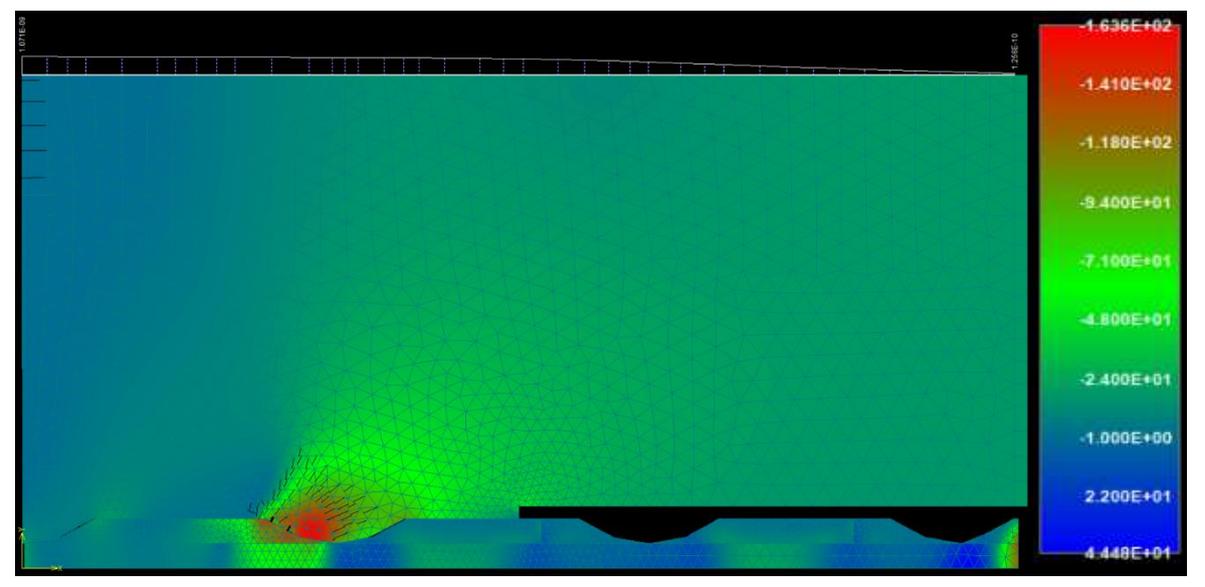
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter der Wendelgeometrie:	Wendelsteigung:	45°
	Kerbenbreite:	8,00 mm
	Kerbentiefe:	2,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:		<b>16,00 MPa</b>
bei einem Schlupf von:		<b>0,194 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



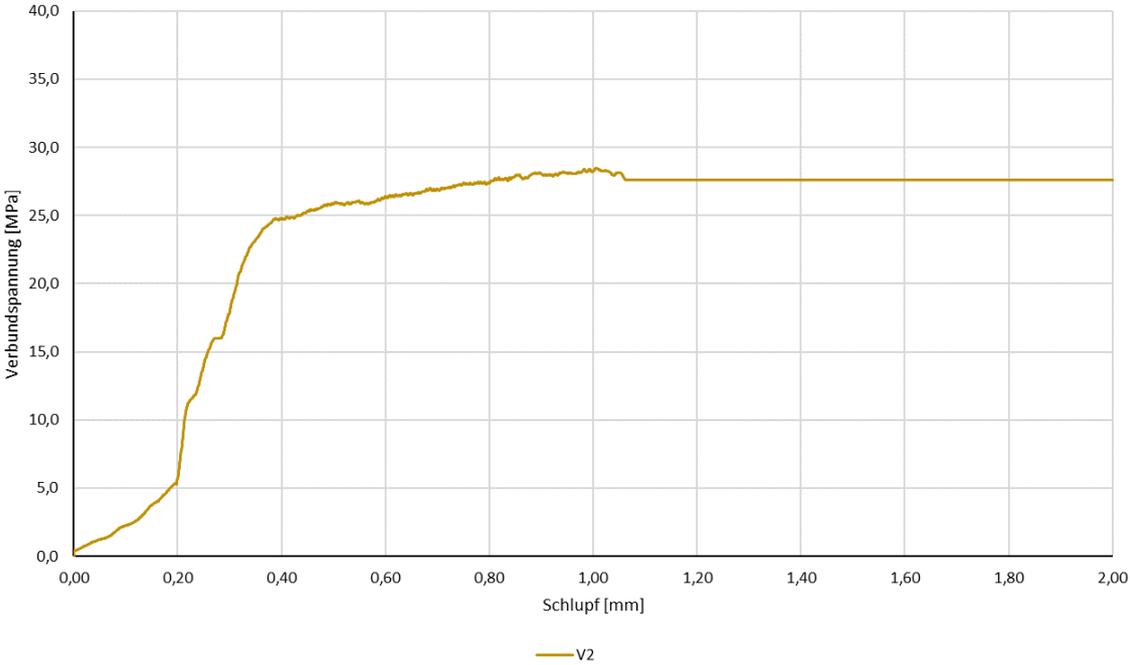
**Plot der minimalen Hauptspannungen bei Erreichen der Maximallast (Verschiebungen überhöht) [MPa]:**



### Anhang C – Versuchsergebnisse der ersten Versuchsreihe einzeln

Prüfkörper-Nummer:		<b>1</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,75 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,60 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>26,51 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,565 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>2</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,93 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,65 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>28,97 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,986 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

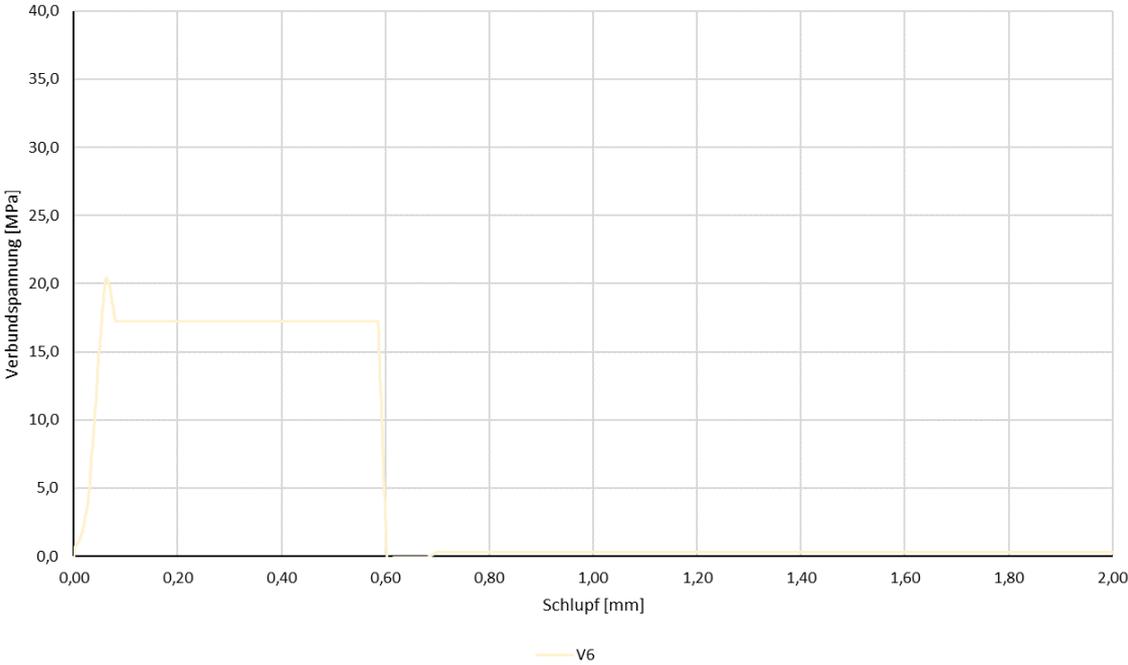
Prüfkörper-Nummer:		<b>3</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,75 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,60 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,32 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,456 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>4</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,93 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,65 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>26,31 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,105 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

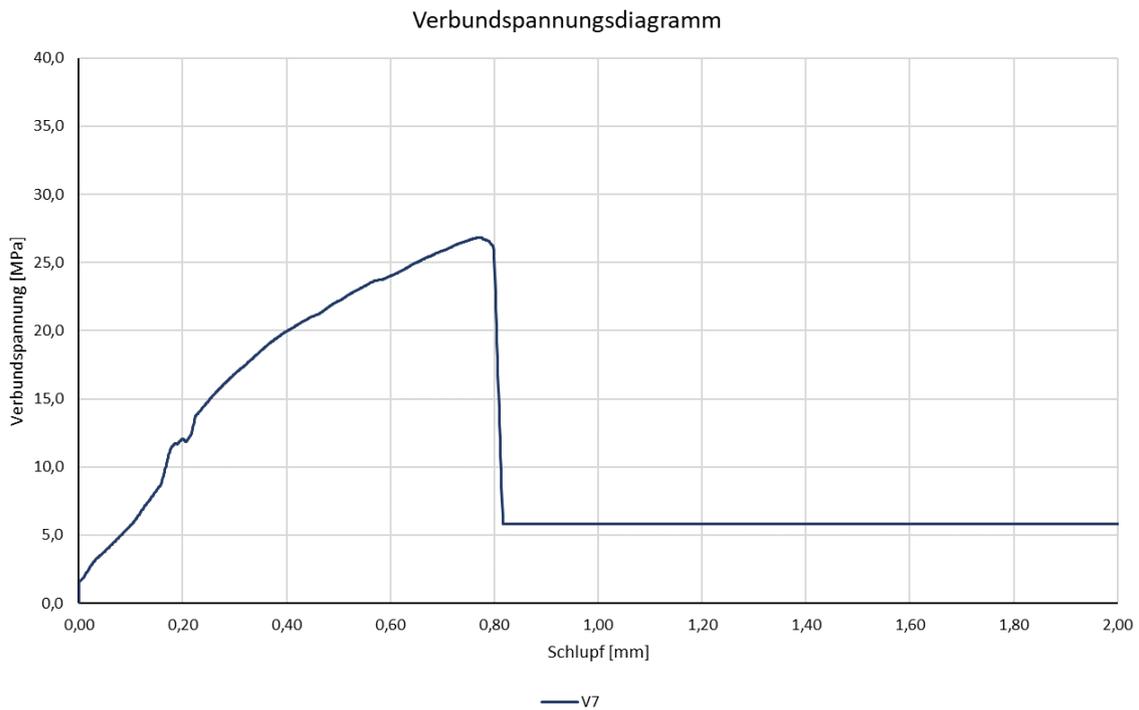
Prüfkörper-Nummer:		<b>5</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,56 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,55 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>24,81 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,175 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> <p>Legend: — v5</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>6</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	4,56 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,55 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>21,44 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,062 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Nein
<b><u>Anmerkungen:</u></b>			
Stabende zwischen Klemmbacken zerdrückt; kein Verbundversagen			

Prüfkörper-Nummer:		<b>7</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,23 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,35 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>27,03 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,775 mm</b>

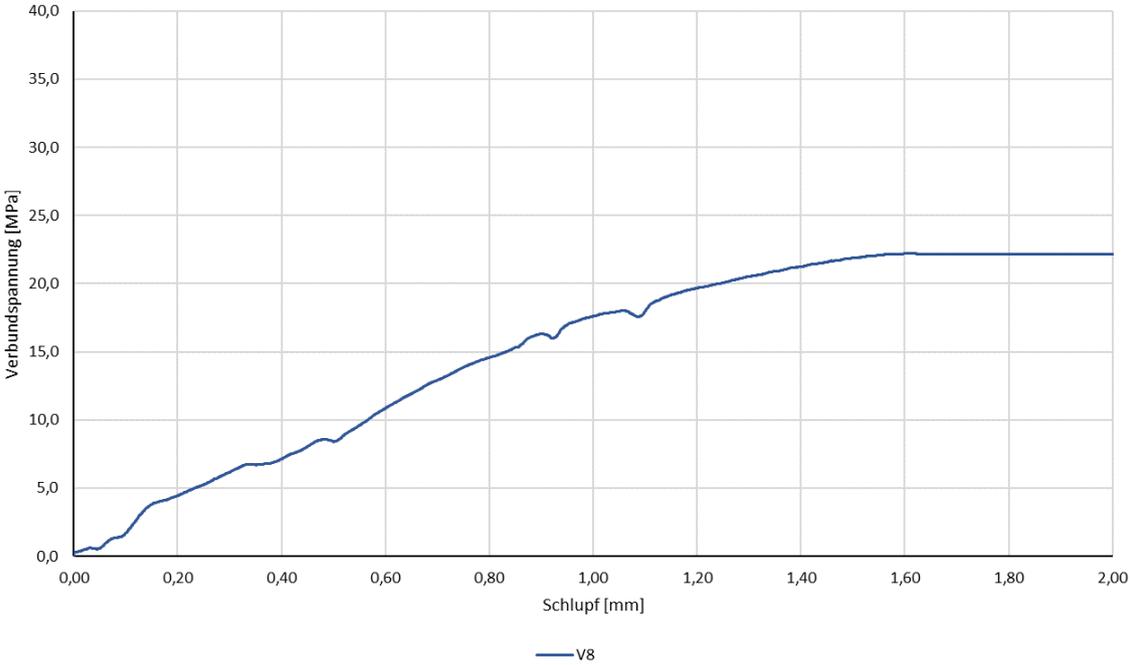
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel leicht beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	--------------------------

**Anmerkungen:**

Carbonstab zwischen Klemmbacken zerdrückt; kein direktes Verbundversagen

Prüfkörper-Nummer:		<b>8</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,23 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,35 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,43 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>1,612 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Prüfkörper-Nummer:		<b>9</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,44 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,40 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>20,95 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,765 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendelrippen abgeschert
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>10</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,99 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,55 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>23,29 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,266 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
Verbundspannungsdiagramm			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendelrippen abgeschert
<u>Anmerkungen:</u>			

Prüfkörper-Nummer:		<b>11</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbbenbreite:	4,16 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbentiefe:	0,60 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>24,82 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,404 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>12</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	20,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,44 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,40 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>29,73 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>1,019 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

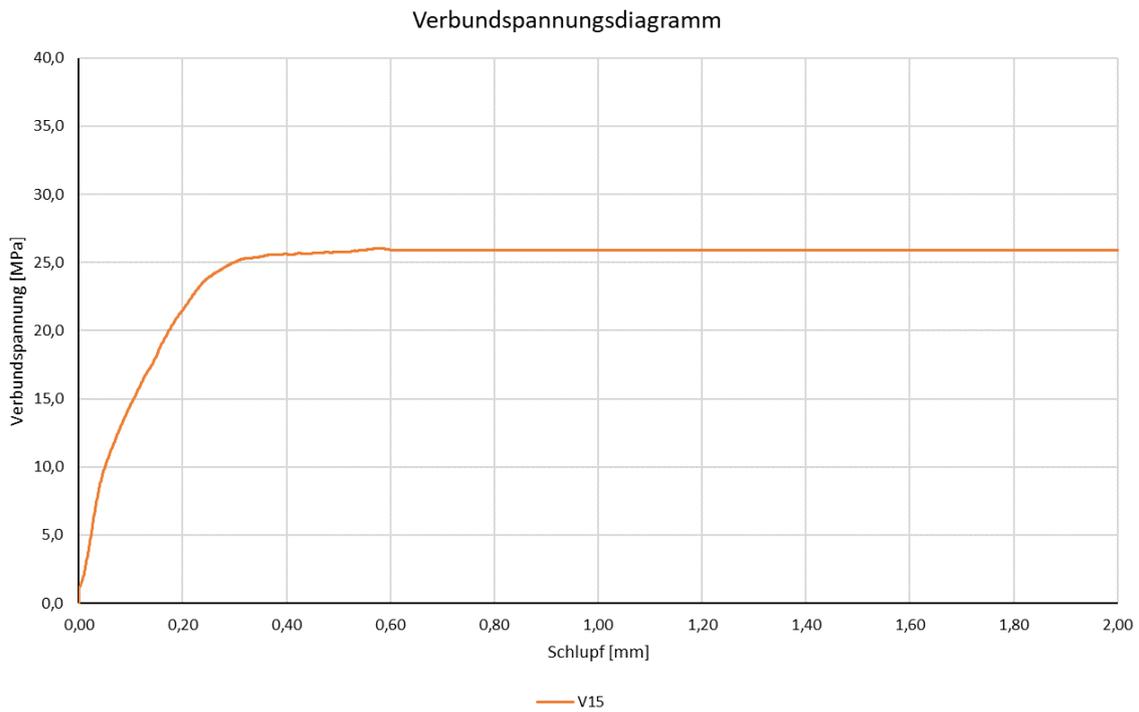
Prüfkörper-Nummer:		<b>13</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,30 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>24,09 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,910 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>14</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,64 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,56 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,404 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
Verbundspannungsdiagramm			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

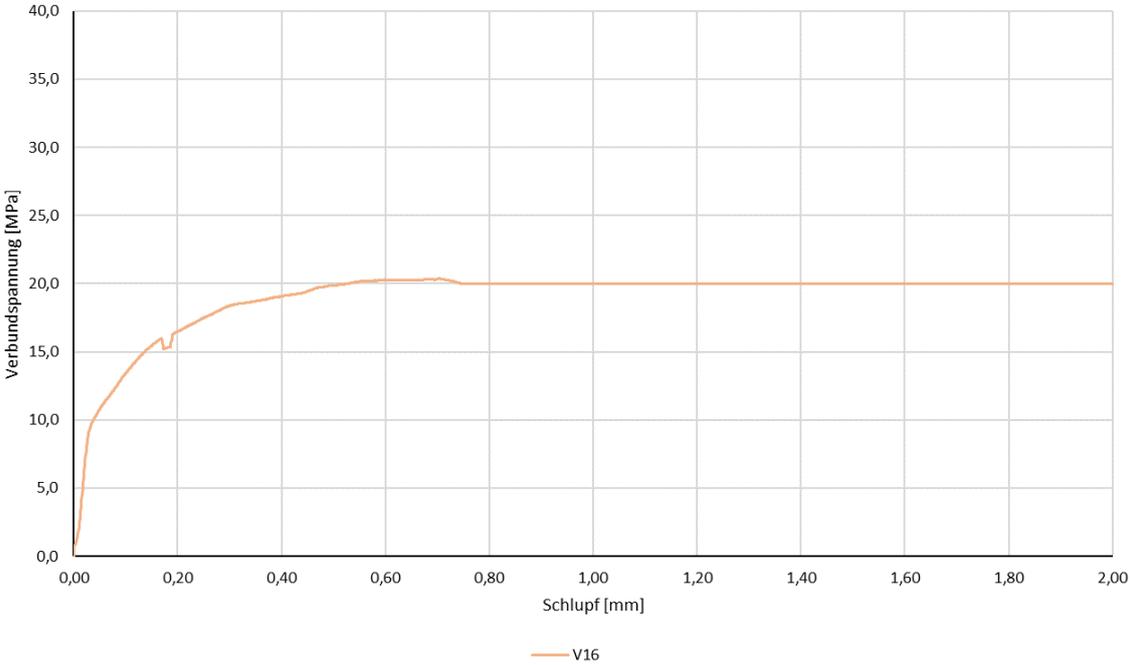
Prüfkörper-Nummer:		<b>15</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,23 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,35 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>26,12 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,570 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



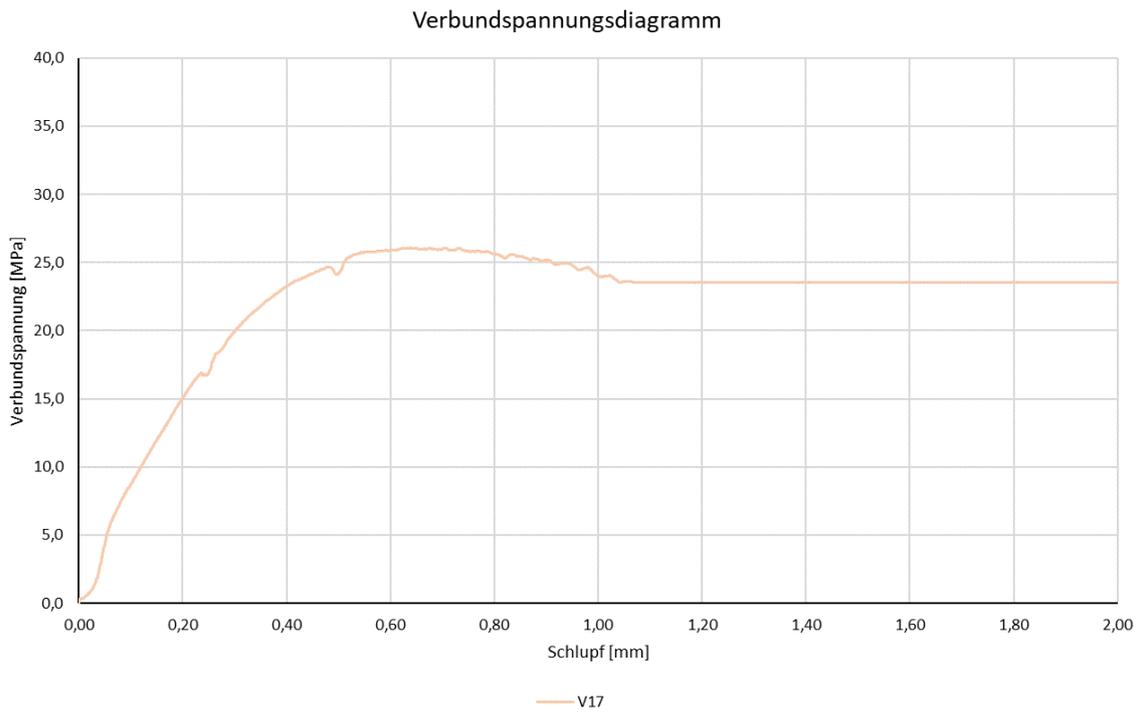
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel nahezu unbeschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	----------------------------

Anmerkungen:

Prüfkörper-Nummer:		<b>16</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,30 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>20,46 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,704 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

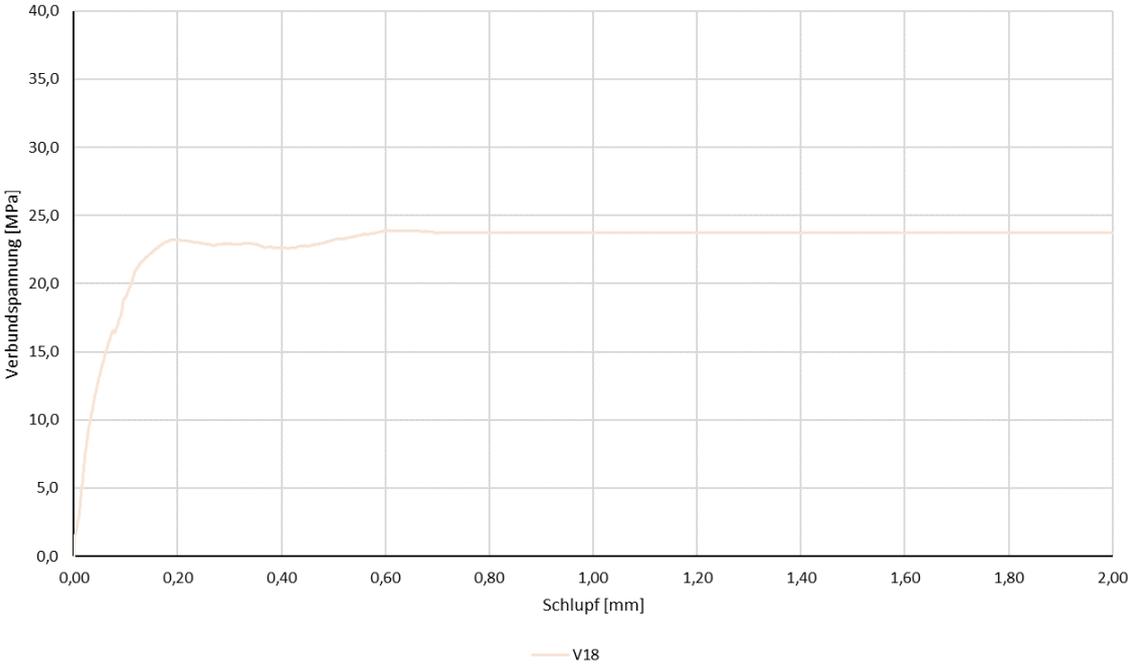
Prüfkörper-Nummer:		<b>17</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbbenbreite:	3,23 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbentiefe:	0,35 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>26,32 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,623 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	-------------------------

Anmerkungen:

Prüfkörper-Nummer:		<b>18</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	15,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,64 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,35 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>24,05 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,608 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
Verbundspannungsdiagramm 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel stark beschädigt
<u>Anmerkungen:</u>			

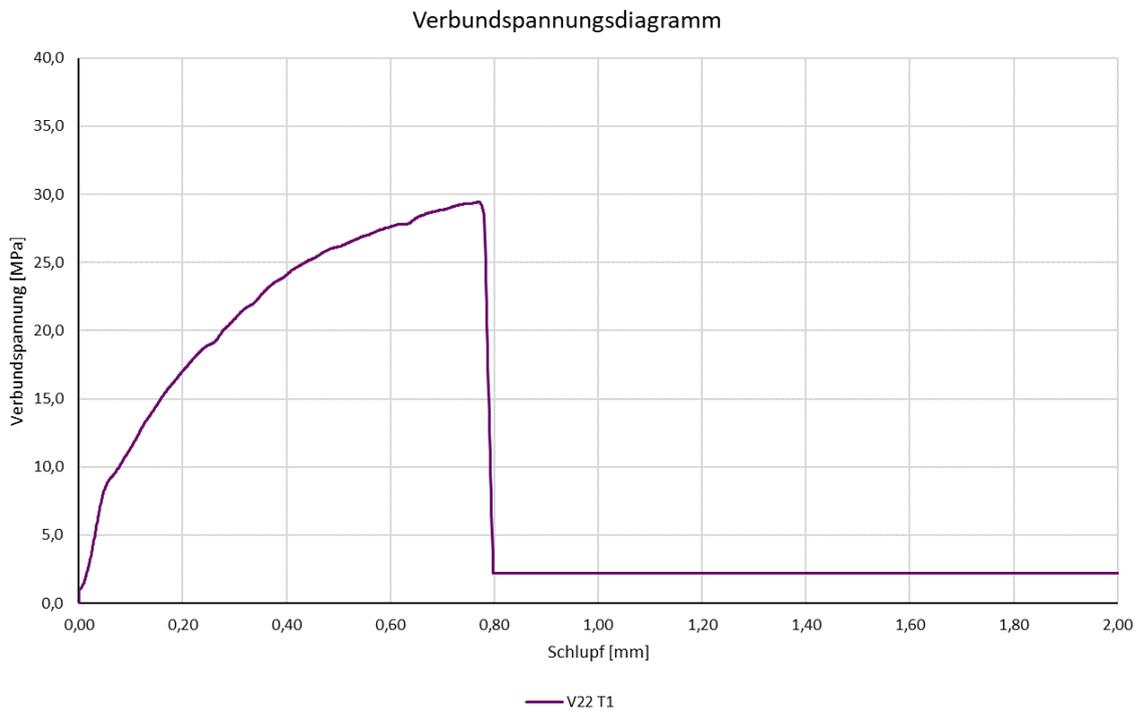
Prüfkörper-Nummer:		<b>20</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	Glatter Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>5,56 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,023 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> <p style="text-align: center;">— V20</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	n. v.
<u>Anmerkungen:</u>			
Auszugsversagen			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>21</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	Glatter Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>4,92 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>10,368 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
Verbundspannungsdiagramm			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	n. v.
<u>Anmerkungen:</u>			
Auszugsversagen			

Prüfkörper-Nummer:		<b>22 – T1</b>	
Stabtyp:	Thyssen C4R	Wendelsteigung:	22,0°
Stabdurchmesser:	10 mm	Ganghöhe:	12,69 mm
Verbundlänge:	50 mm	Kerbbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	100 mm	Kerbentiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>29,52 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,765 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



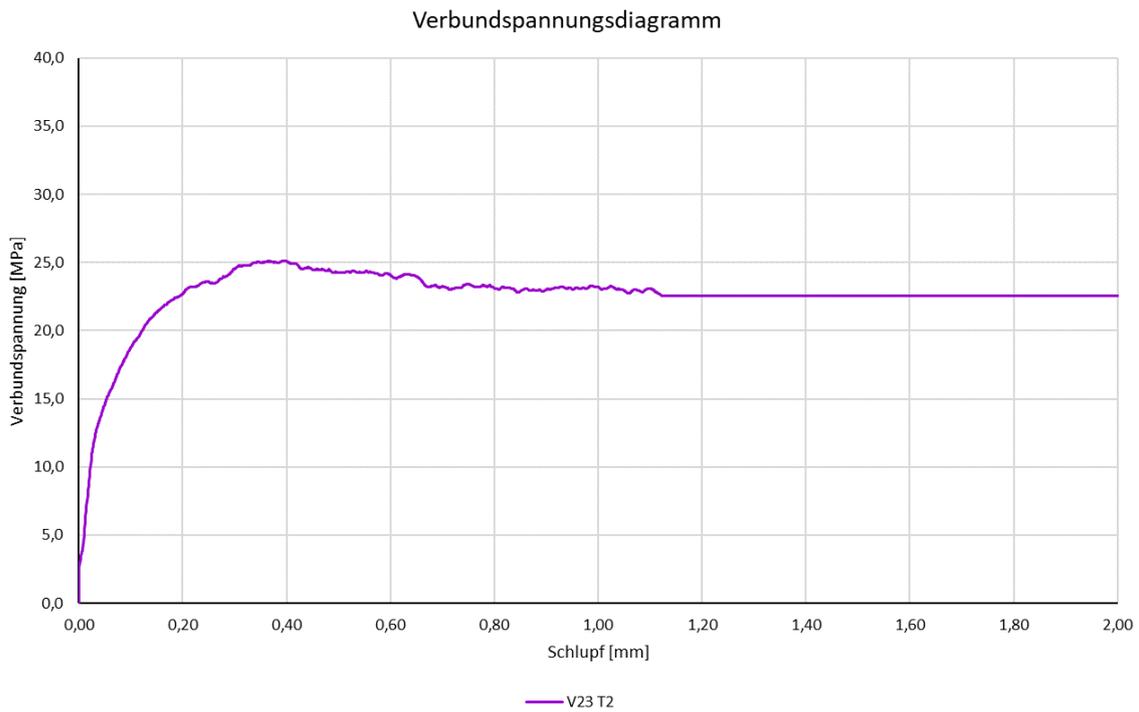
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel nahezu unbeschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	----------------------------

**Anmerkungen:**

Stab zwischen den Klemmbcken beschädigt

Prüfkörper-Nummer:		<b>23 – T2</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	22,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	12,69 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>25,57 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,370 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



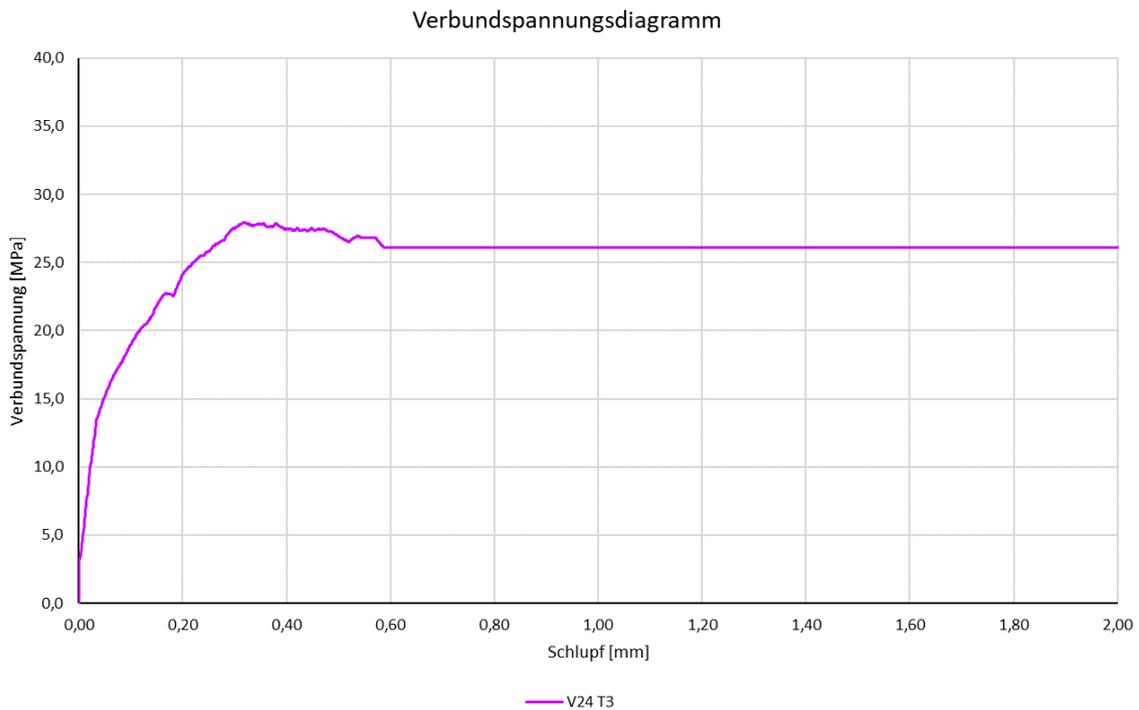
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel nahezu unbeschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	----------------------------

**Anmerkungen:**

Stab zwischen den Klemmbacken beschädigt

Prüfkörper-Nummer:		<b>24 – T3</b>	
Stabtyp:	S&P Clever	Wendelsteigung:	22,0°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	12,69 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	80 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>28,36 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,309 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel leicht beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	--------------------------

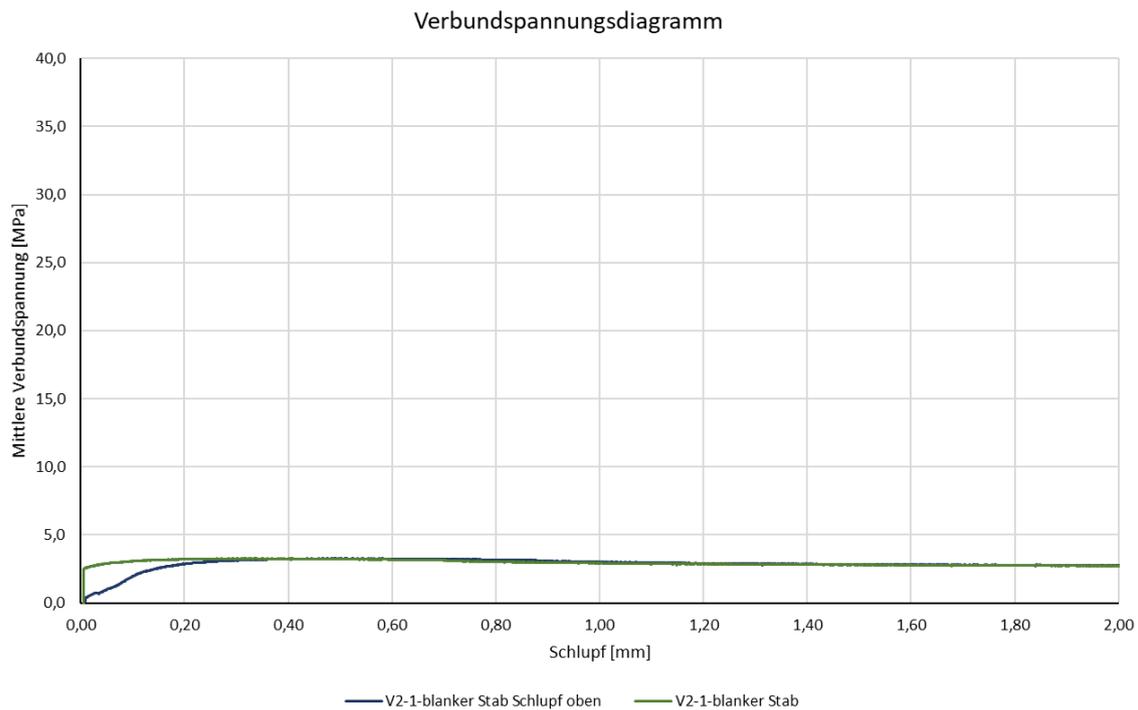
Anmerkungen:  
 Stab zwischen den Klemmbacken beschädigt

## Anhang D – Versuchsergebnisse der zweiten Versuchsreihe einzeln

Prüfkörper-Nummer:		1	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	Glatter Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>3,07 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,352 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p style="text-align: center;">Verbundspannungsdiagramm</p> <p style="text-align: center;">Mittlere Verbundspannung [MPa]</p> <p style="text-align: center;">Schlupf [mm]</p> <p style="text-align: center;">— V1-1-blanker Stab Schlupf oben    — V1-1-blanker Stab</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	n. v.
<b><u>Anmerkungen:</u></b>			
Auszugsversagen			

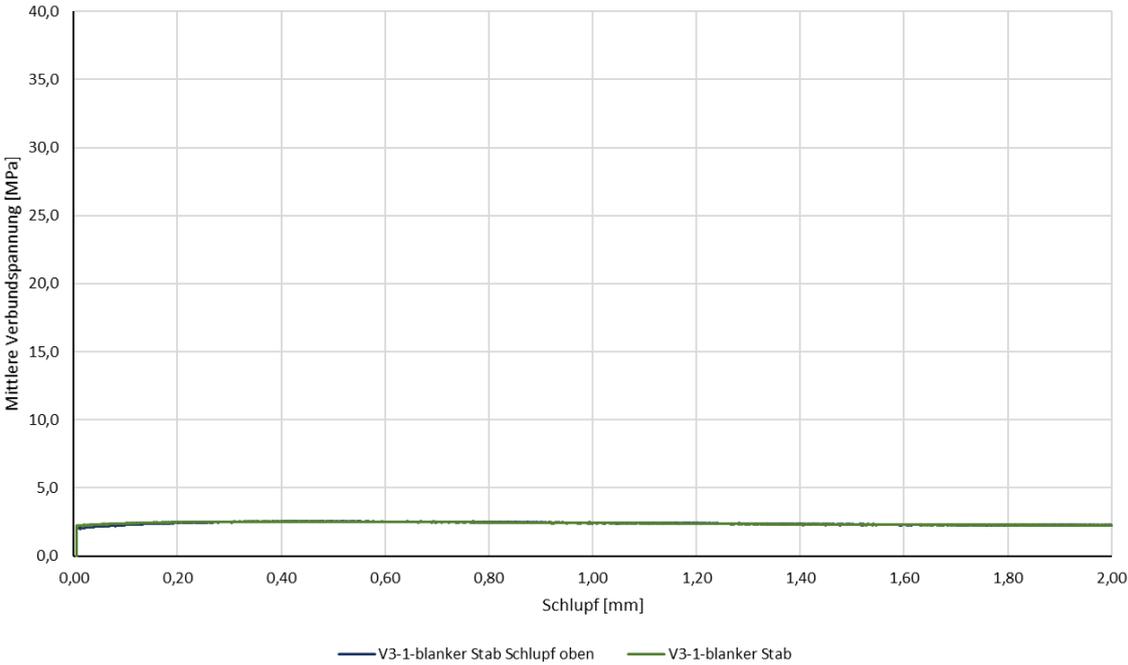
Prüfkörper-Nummer:		<b>2</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	Glatter Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>3,28 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,407 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



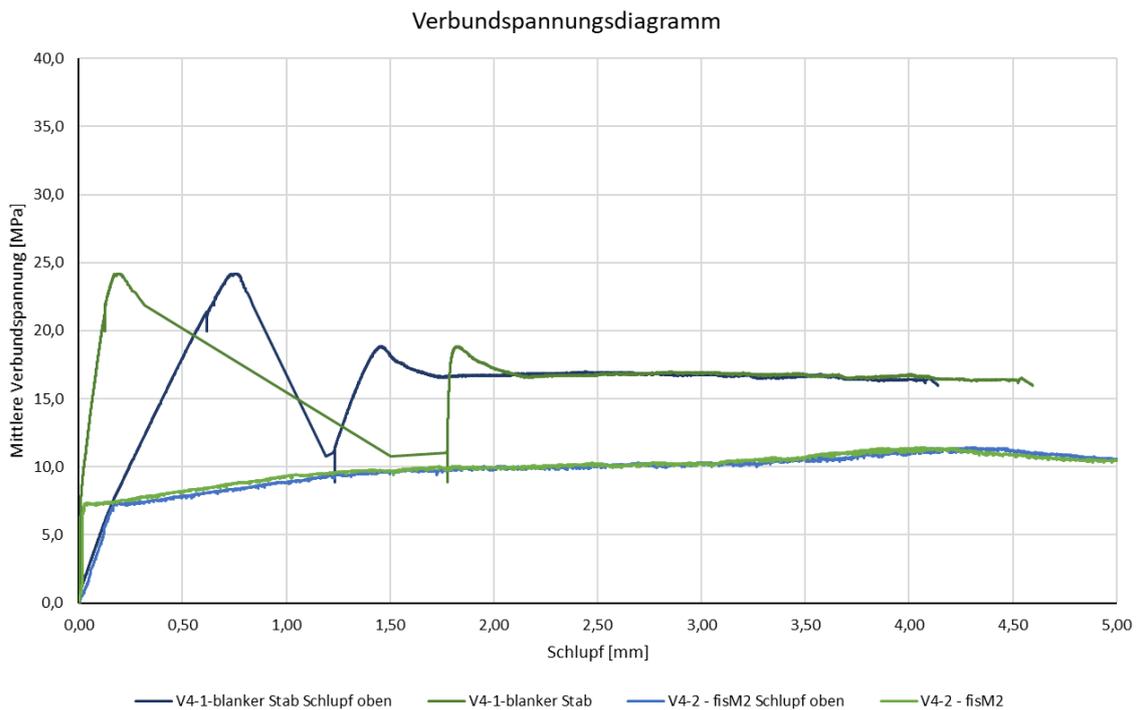
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	n. v.
----------------------------------	------	----------------------------------	-------

Anmerkungen:  
 Auszugsversagen

Prüfkörper-Nummer:		<b>3</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	Glatter Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>2,57 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,465 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V3-1-blanker Stab Schlupf oben    — V3-1-blanker Stab</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	n. v.
<u>Anmerkungen:</u>			
Auszugsversagen			

Prüfkörper-Nummer:	4		
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	Glatte Stab
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	0,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	0,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,00 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:	24,2 MPa		
bei einem Schlupf von:	0,193 mm		

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



Spaltrisse im Prüfkörper:

Ja

Abscheren der Stabwendel:

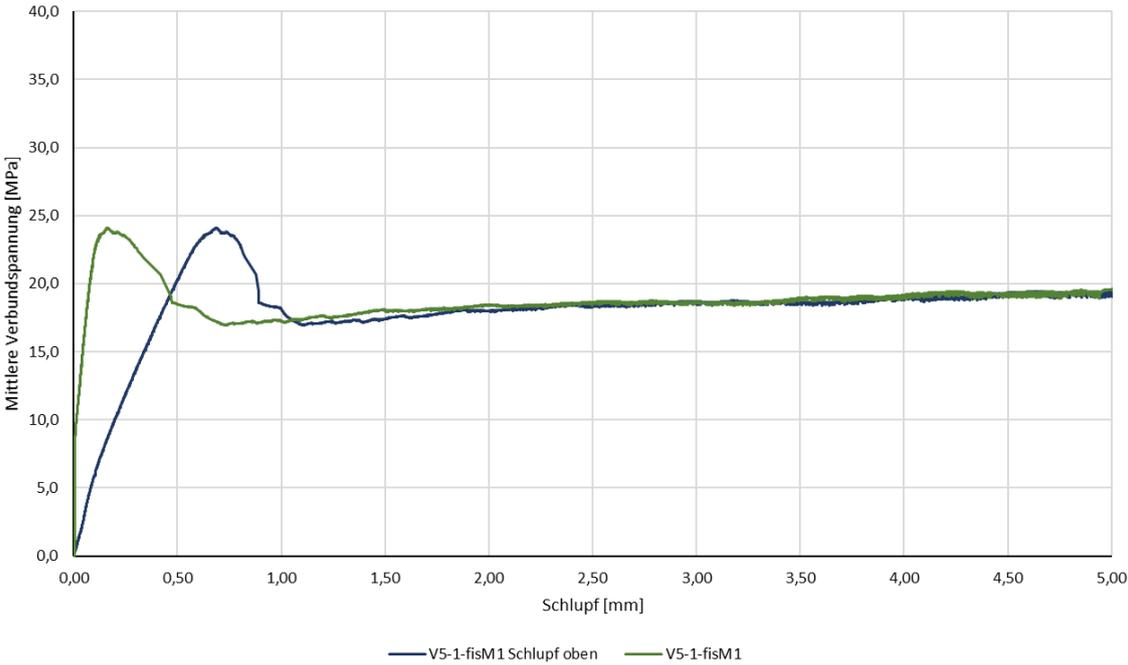
Ja

Anmerkungen:

Ohne zusätzliche Schraubzwingen getestet

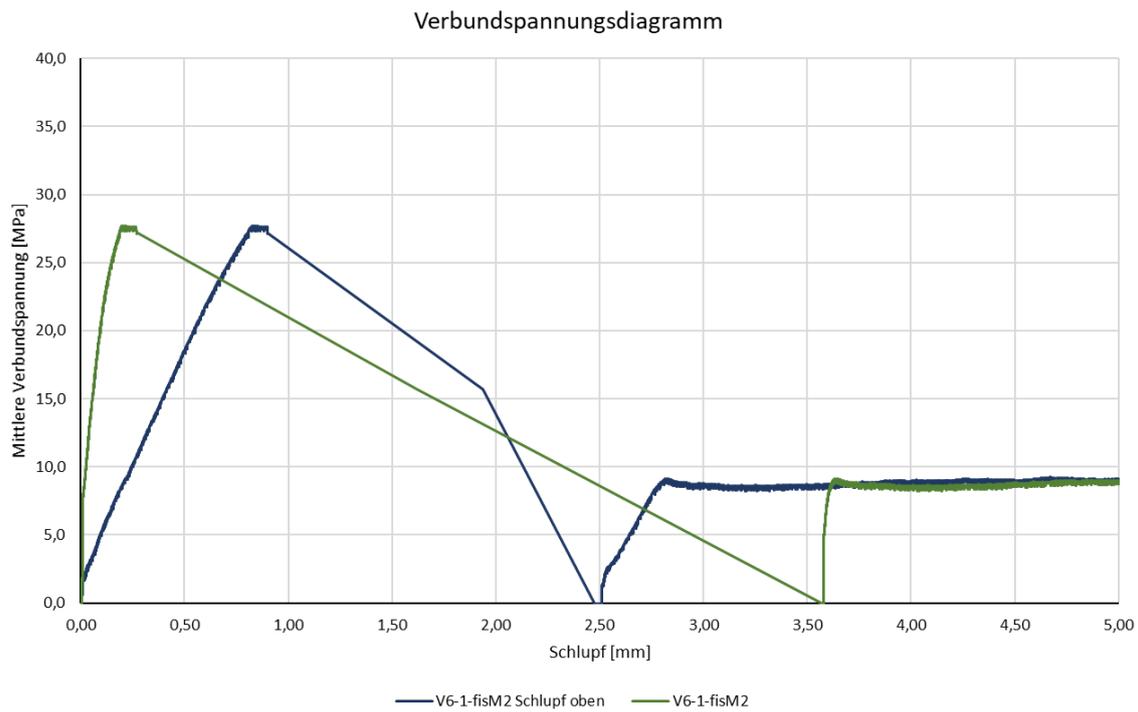
Stabende bei erster Prüfung zwischen Klemmbacken zerdrückt, Spaltriss im Prüfkörper

Prüfkörper ein zweites Mal mit Muffe auf Stabende geprüft

Prüfkörper-Nummer:		5	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	20°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>24,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,161 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
Verbundspannungsdiagramm 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			

Prüfkörper-Nummer:		6	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	20°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>27,72 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,197 mm</b>

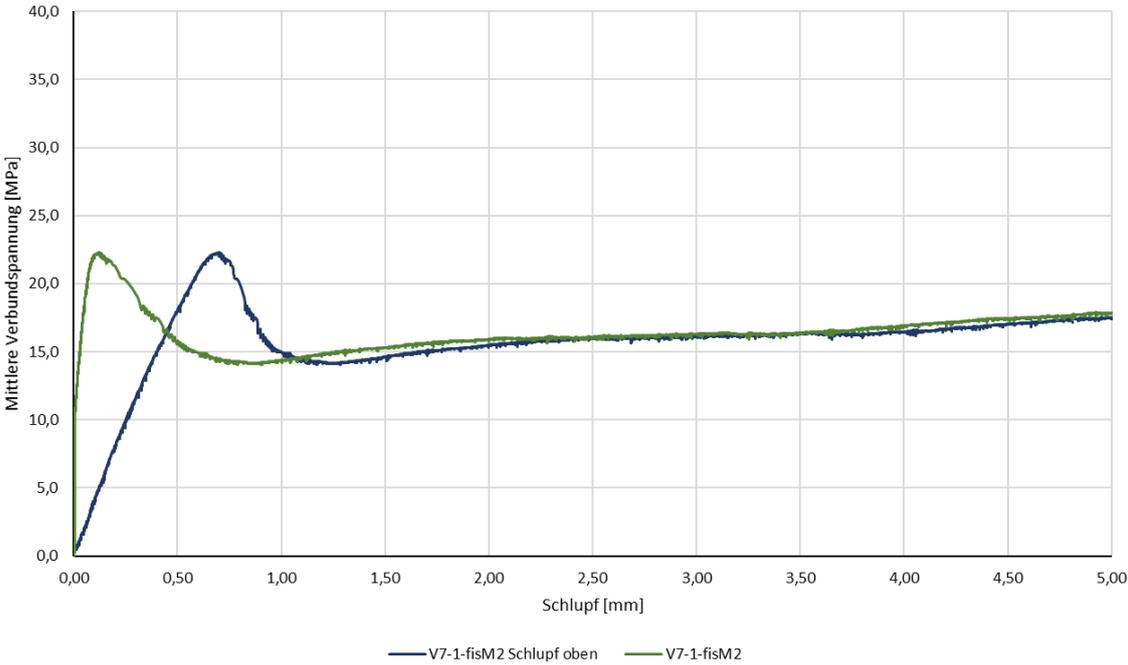
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

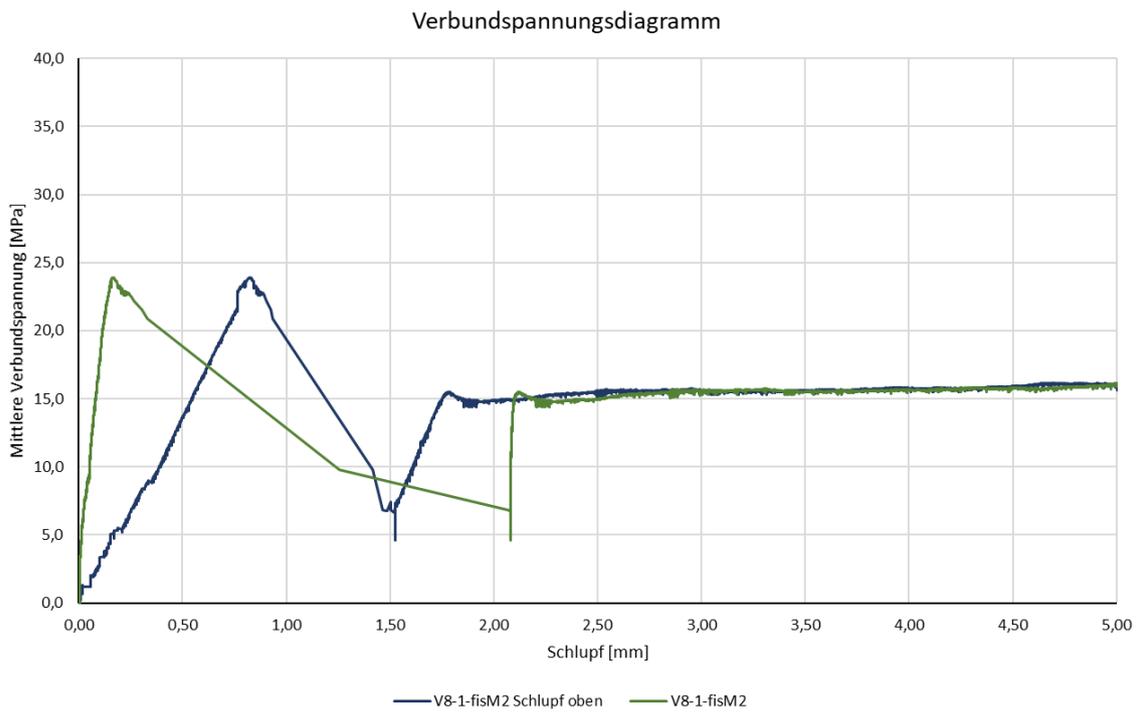
Anmerkungen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>7</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	20°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,80 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>14,876 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V7-1-fisM2 Schlupf oben    — V7-1-fisM2</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			
Auszugsversagen			

Prüfkörper-Nummer:		<b>8</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	20°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	9,15 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>23,88 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,161 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



Spaltrisse im Prüfkörper:

Ja

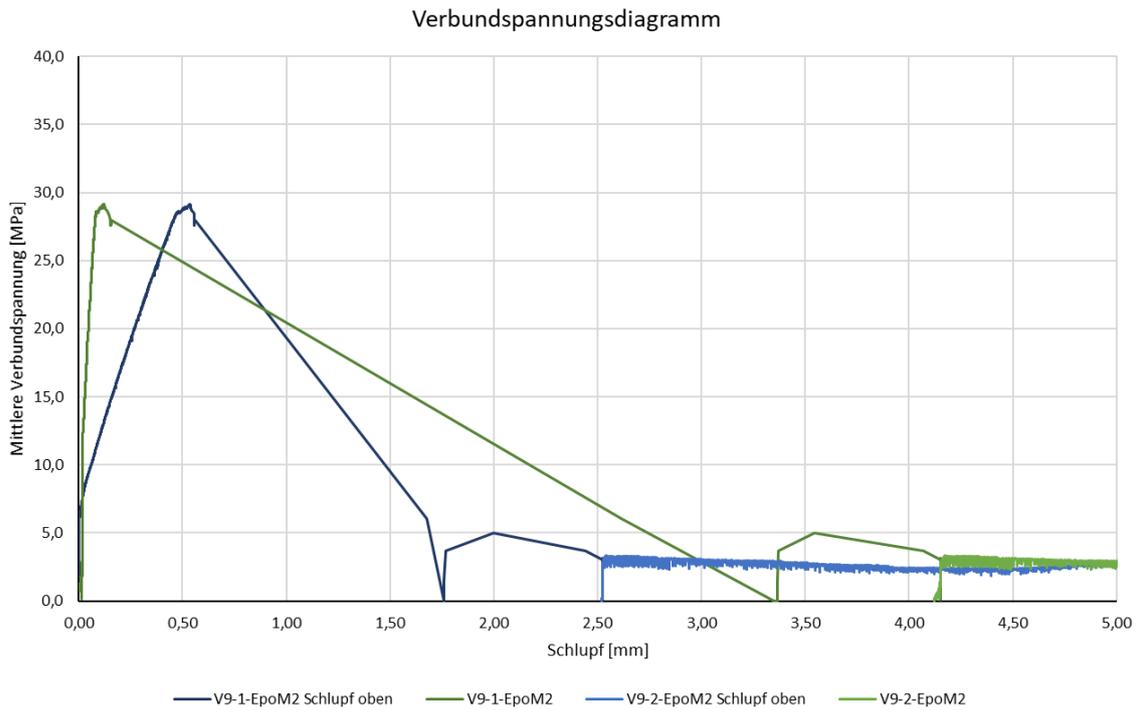
Abscheren der Stabwendel:

Ja

Anmerkungen:

Prüfkörper-Nummer:		9	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>29,16 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,119 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



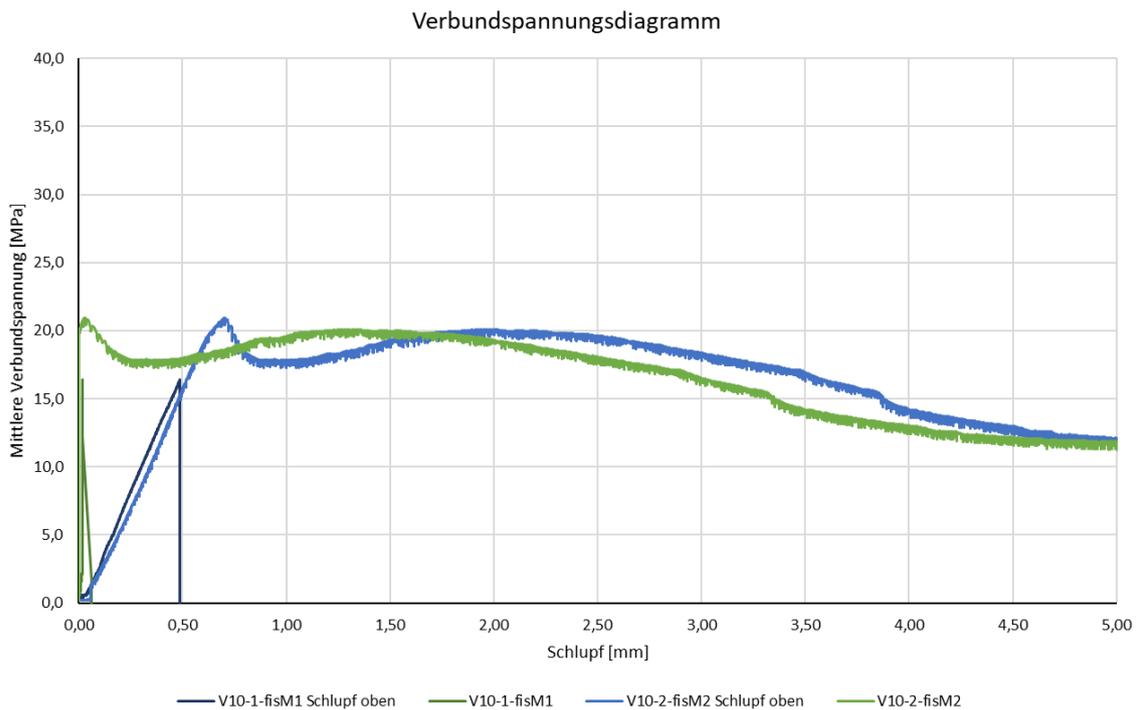
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

**Anmerkungen:**

Ohne zusätzliche Schraubzwingen getestet  
Nur einmal getestet, Versuch wurde nach Spalten neu gestartet

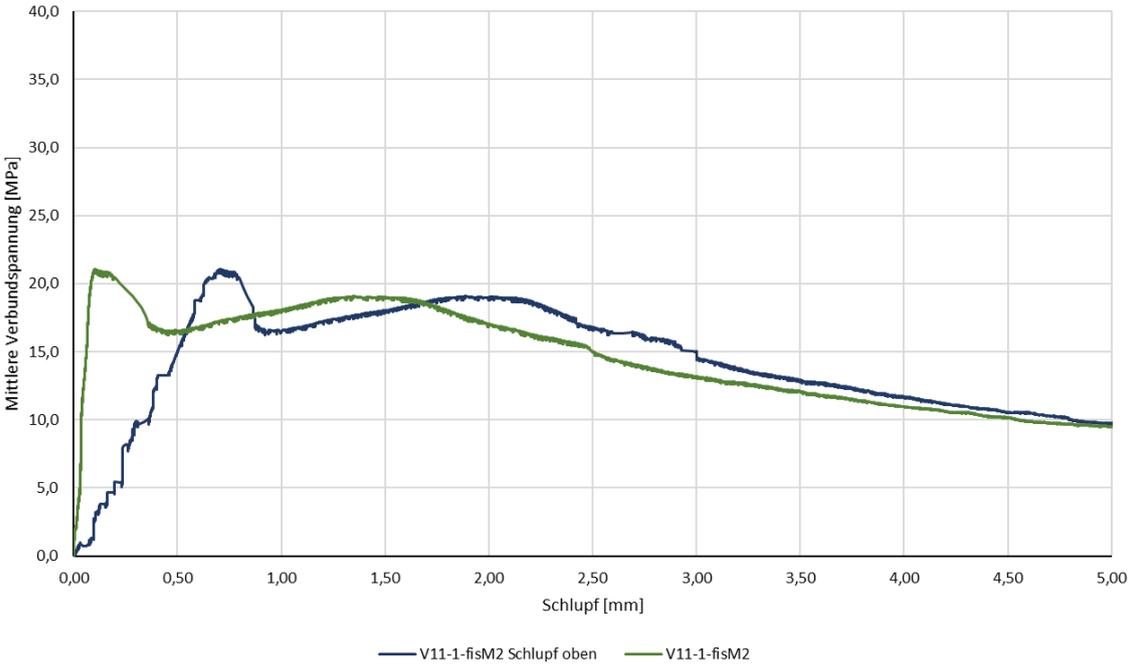
Prüfkörper-Nummer:	<b>10</b>		
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>20,94 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,020 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



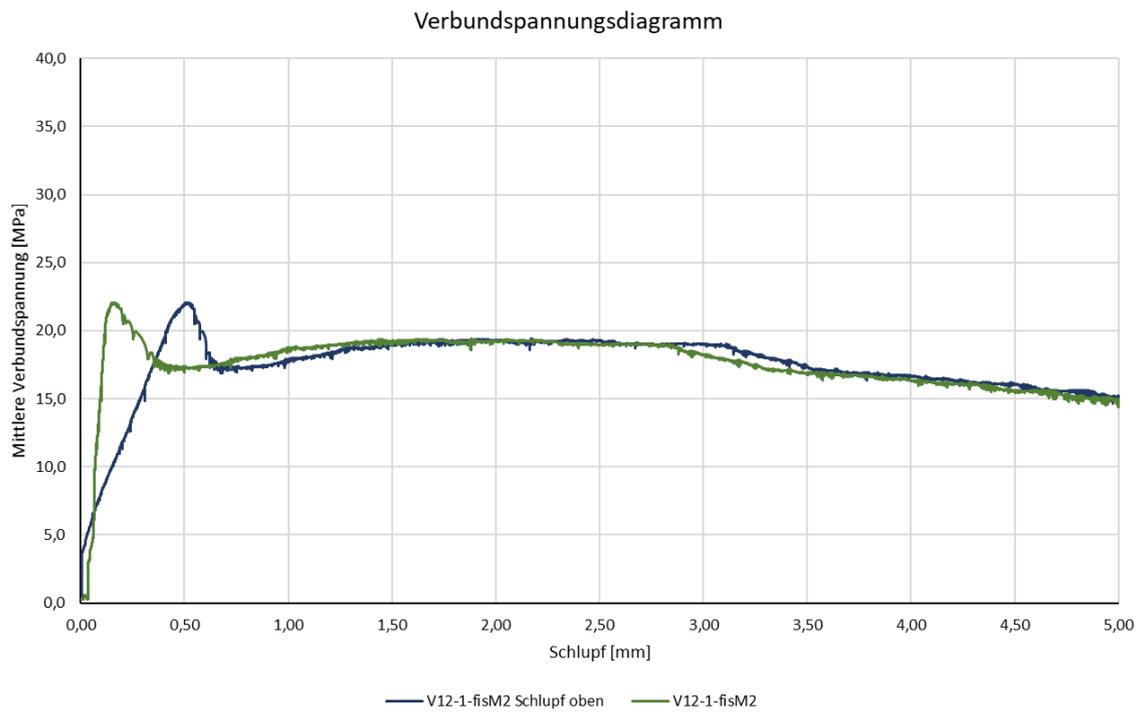
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Feine Spaltrisse	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	------------------	----------------------------------	----

Anmerkungen:  
 Prüfkörper zwei Mal getestet, da Muffe versagt hat  
 Prüfkörper nicht komplett gespalten

Prüfkörper-Nummer:		<b>11</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>21,10 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,106 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V11-1-fisM2 Schlupf oben    — V11-1-fisM2</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			

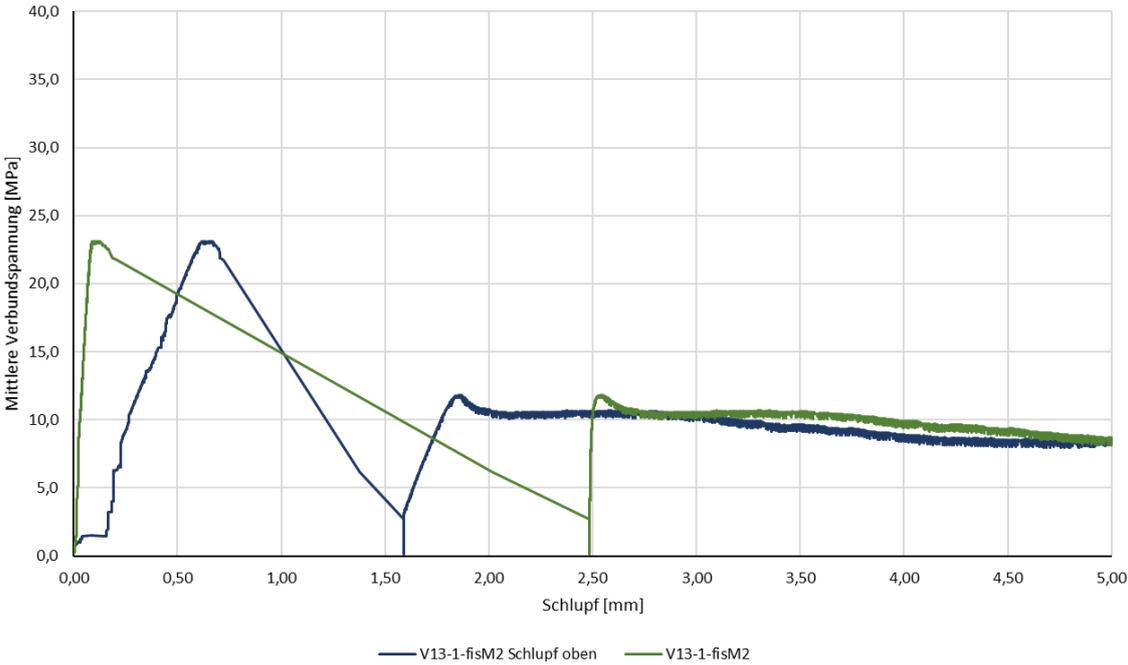
Prüfkörper-Nummer:		<b>12</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,16 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,45 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,08 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,154 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

Anmerkungen:

Prüfkörper-Nummer:		<b>13</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	3,32 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,50 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>23,13 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,120 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V13-1-fisM2 Schlupf oben    — V13-1-fisM2</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Feine Spaltrisse	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			
Prüfkörper nicht komplett gespalten			

Prüfkörper-Nummer:	<b>14</b>		
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,27 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:	<b>22,63 MPa</b>		
bei einem Schlupf von:	<b>0,098 mm</b>		

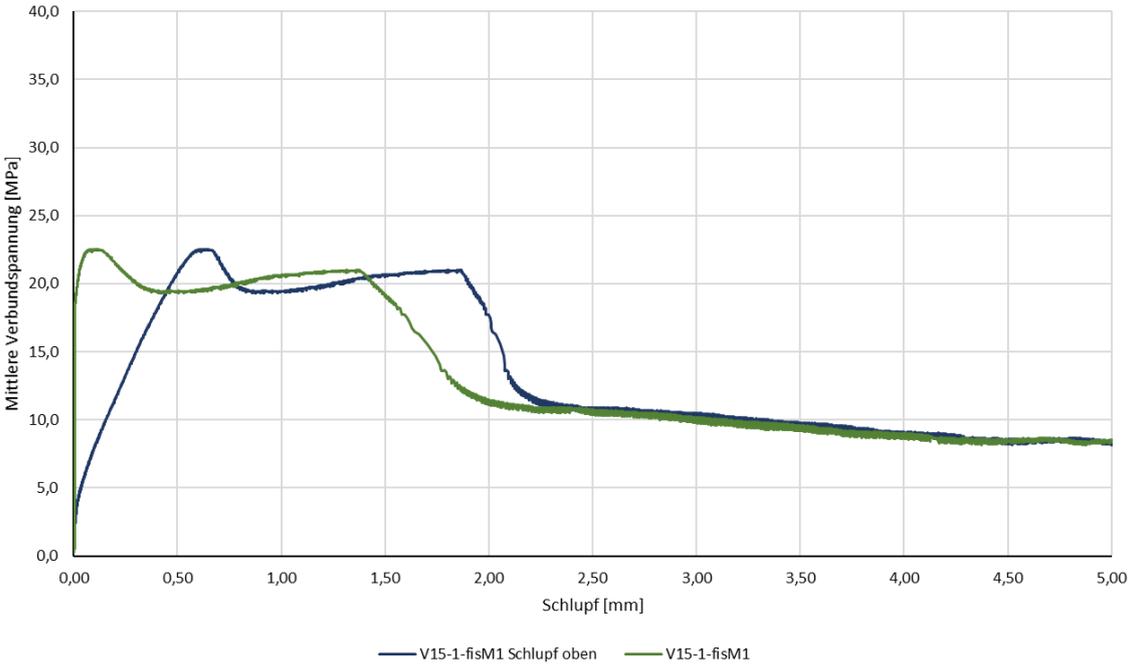
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

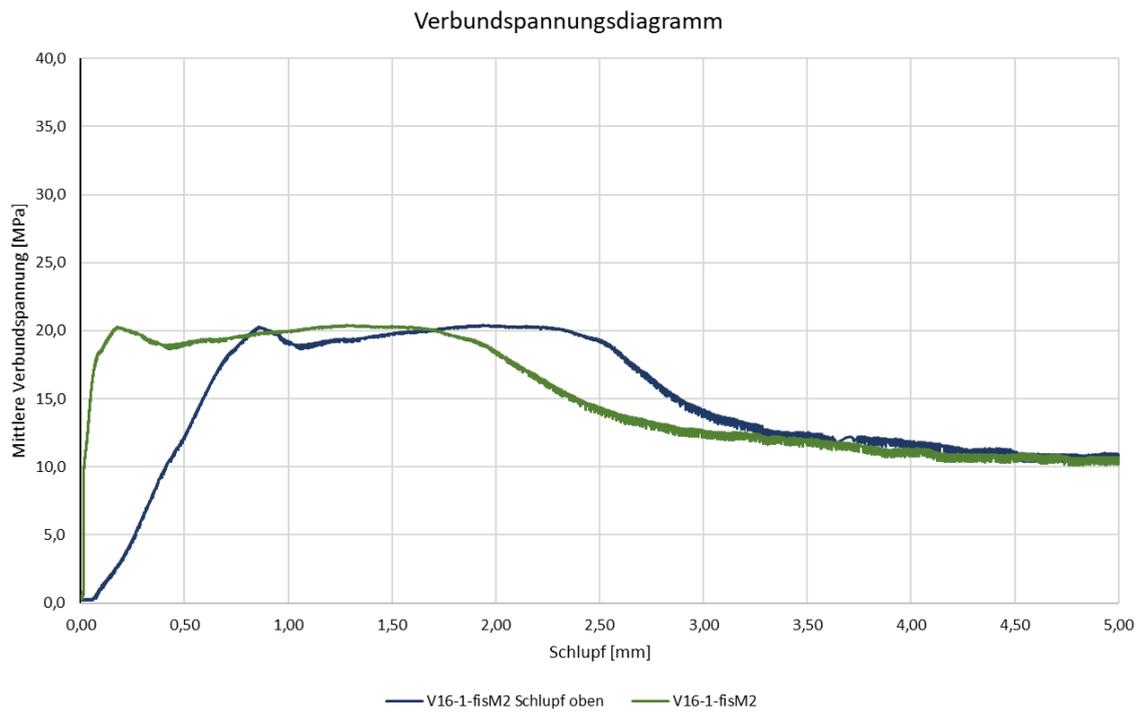
Anmerkungen:  
 Ohne zusätzliche Schraubzwingen getestet  
 Prüfkörper zwei Mal getestet, da Muffe versagt hat

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>15</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,27 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,53 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,089 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V15-1-fisM1 Schlupf oben    — V15-1-fisM1</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			

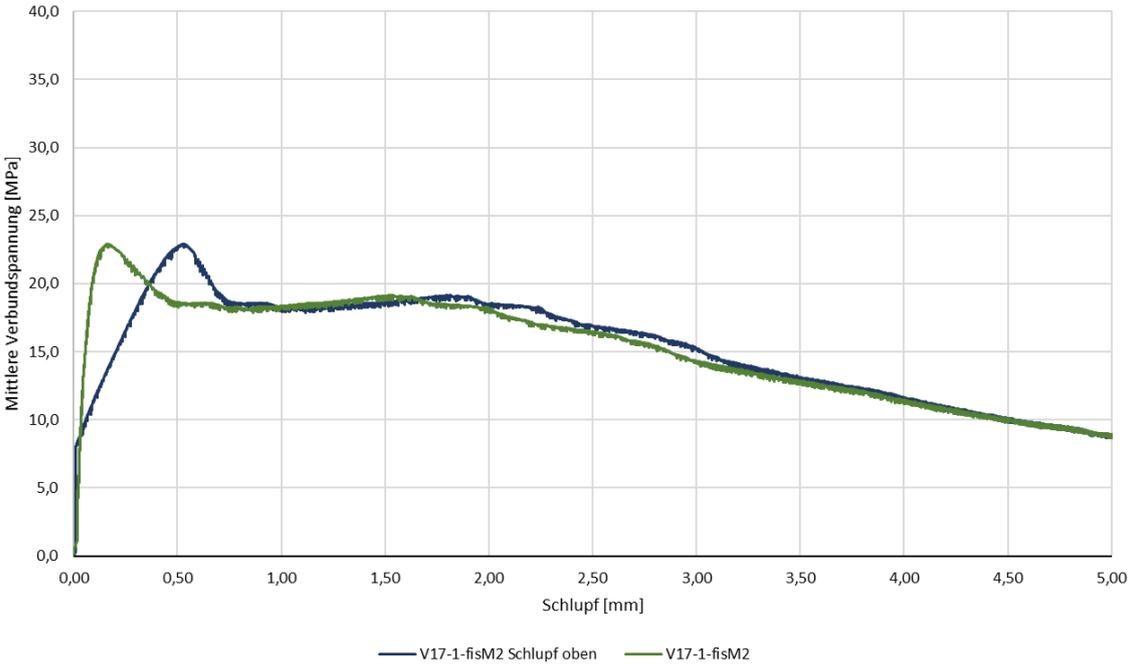
Prüfkörper-Nummer:		<b>16</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,27 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>20,40 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>1,288 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

Anmerkungen:

Prüfkörper-Nummer:		<b>17</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,27 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,93 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,167 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;"> <span style="color: blue;">—</span> V17-1-fisM2 Schlupf oben    <span style="color: green;">—</span> V17-1-fisM2         </p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			

Prüfkörper-Nummer:		<b>18</b>	
Stabtyp:	DPP 8 mm	Wendelsteigung:	15°
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	6,73 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,27 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>22,60 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,096 mm</b>

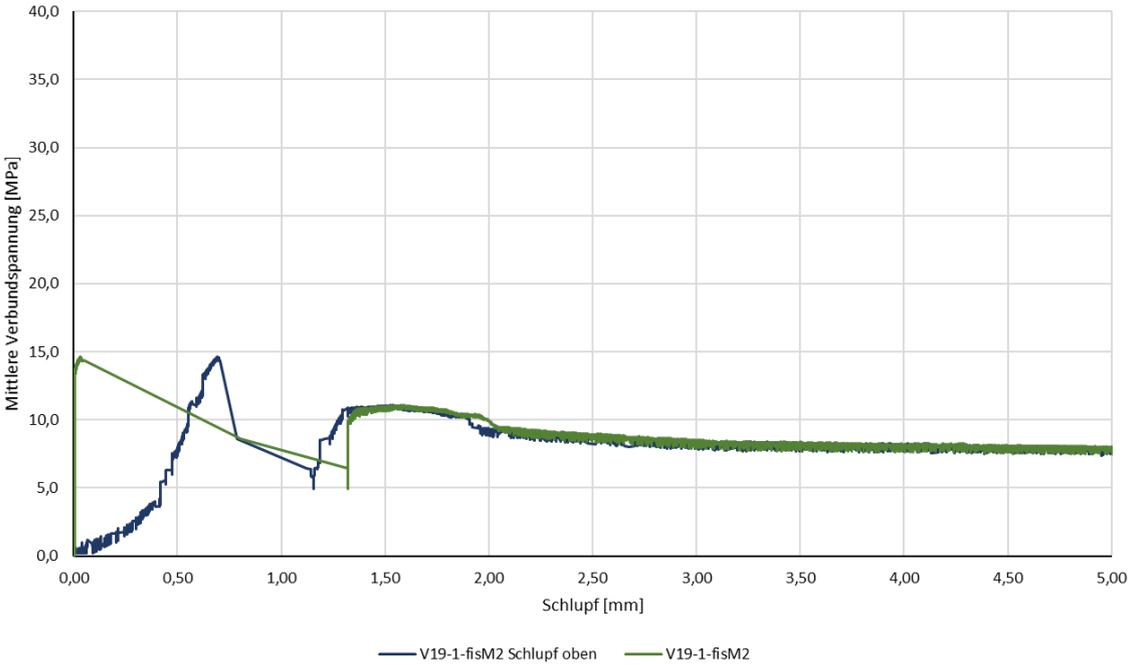
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	----	----------------------------------	----

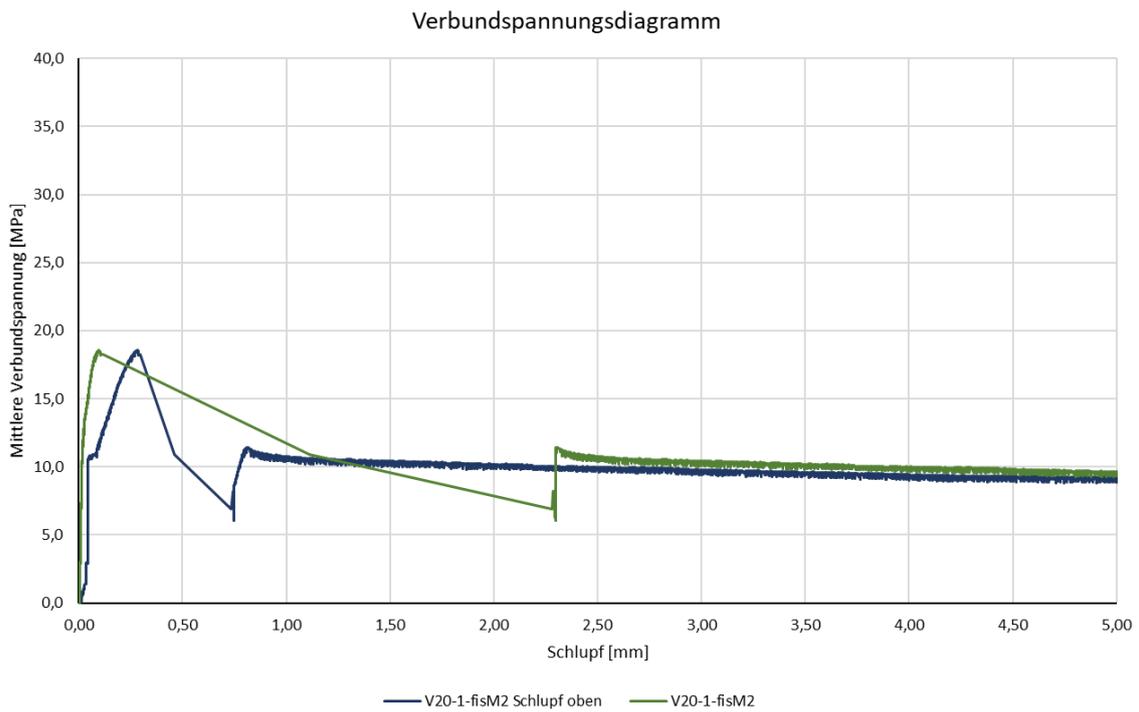
Anmerkungen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper-Nummer:		<b>19</b>	
Stabtyp:	S&P XYZ	Wendelsteigung:	25,5° - Beklebt
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	12,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,50 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,70 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>14,62 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,031 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p> 			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<b><u>Anmerkungen:</u></b>			
Prüfkörper vor Versuch versehentlich mit Prüfmaschine druckbelastet, möglicherweise beschädigt Auszugsversagen			

Prüfkörper-Nummer:		<b>20</b>	
Stabtyp:	S&P XYZ	Wendelsteigung:	25,5° - Beklebt
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	12,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,50 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,70 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>18,57 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,097 mm</b>

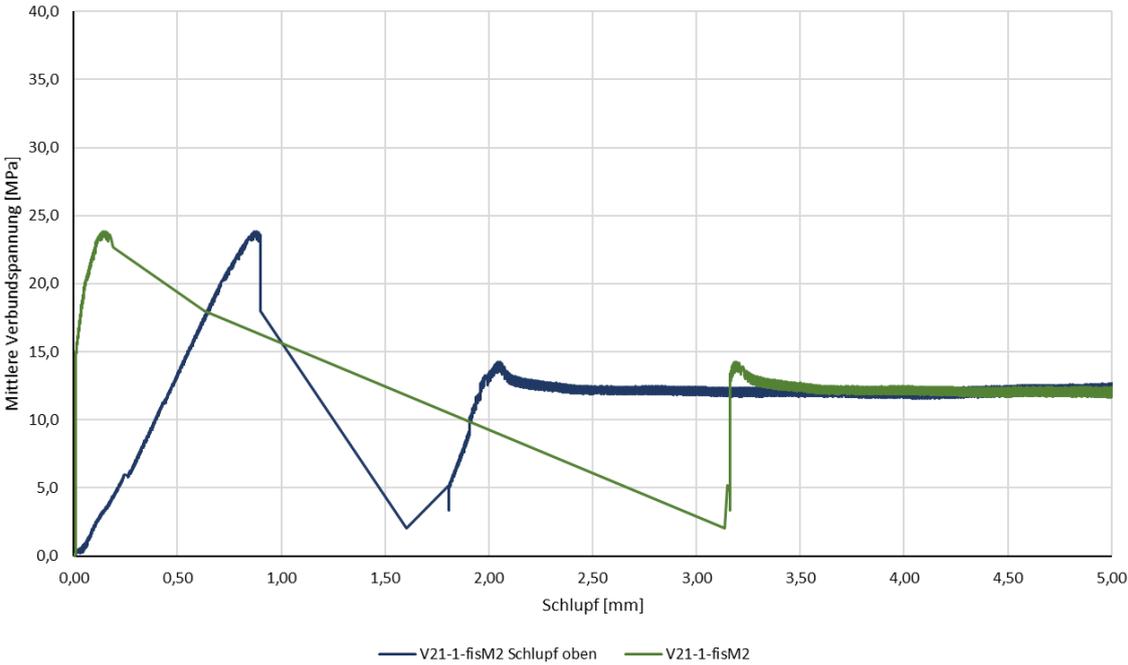
**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
----------------------------------	------	----------------------------------	----

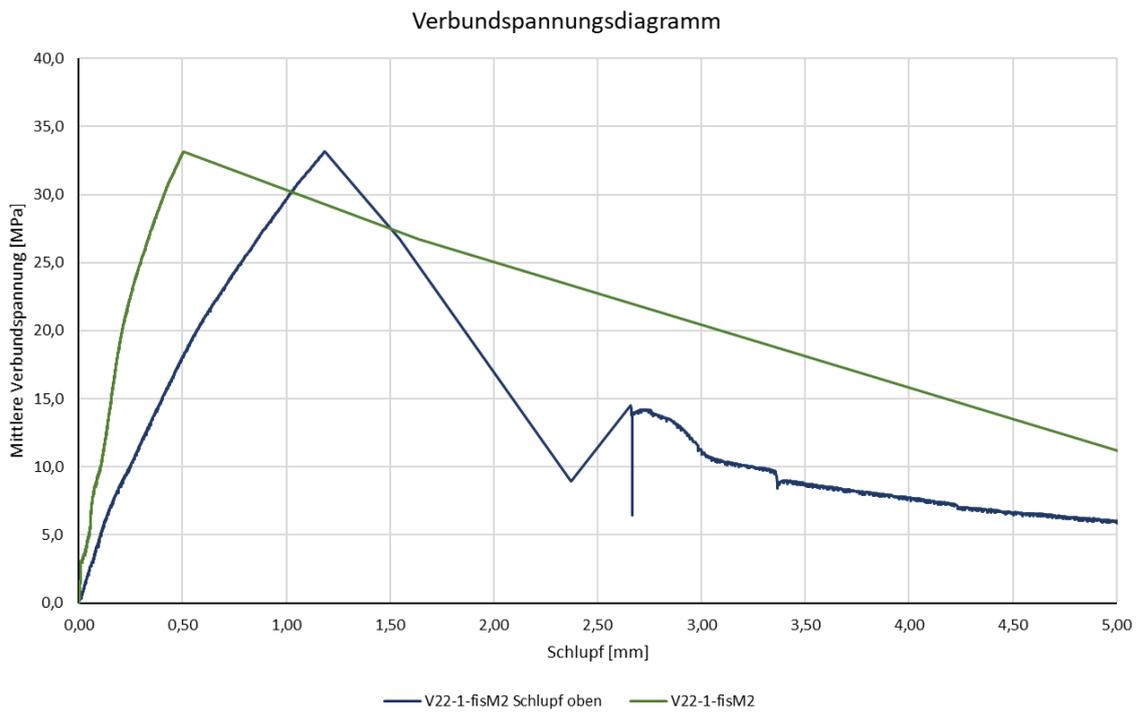
Anmerkungen:

Auszugsversagen

Prüfkörper-Nummer:		<b>21</b>	
Stabtyp:	S&P XYZ	Wendelsteigung:	25,5° - Beklebt
Stabdurchmesser:	8 mm	Ganghöhe:	12,00 mm
Verbundlänge:	40 mm	Kerbenbreite:	5,50 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>23,87 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,145 mm</b>
<b><u>Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:</u></b>			
<p>Verbundspannungsdiagramm</p>  <p style="text-align: center;">— V21-1-fisM2 Schlupf oben    — V21-1-fisM2</p>			
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Nein	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Ja
<u>Anmerkungen:</u>			
Auszugsversagen			

Prüfkörper-Nummer:		<b>22</b>	
Stabtyp:	Thyssen C4R	Wendelsteigung:	22°
Stabdurchmesser:	10 mm	Ganghöhe:	12,70 mm
Verbundlänge:	50 mm	Kerbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>33,17 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,506 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**

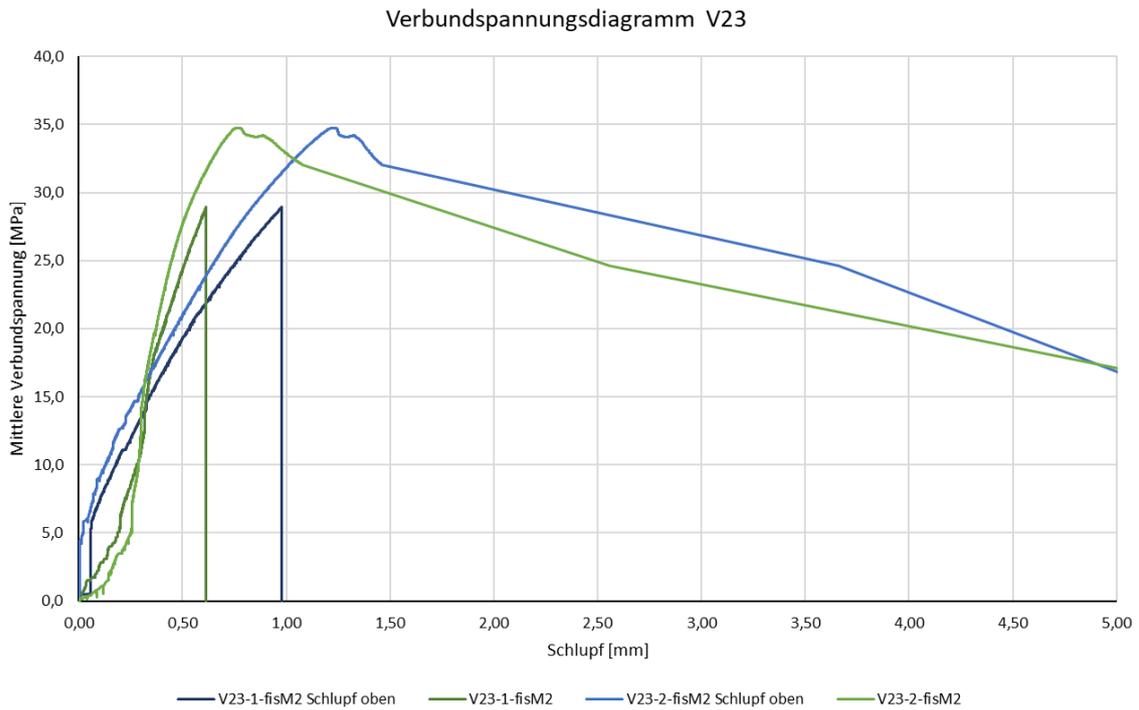


<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel leicht beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	--------------------------

Anmerkungen:  
Spaltversagen

Prüfkörper-Nummer:		<b>23</b>	
Stabtyp:	Thyssen C4R	Wendelsteigung:	22°
Stabdurchmesser:	10 mm	Ganghöhe:	12,70 mm
Verbundlänge:	50 mm	Kerbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>34,76 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,774 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



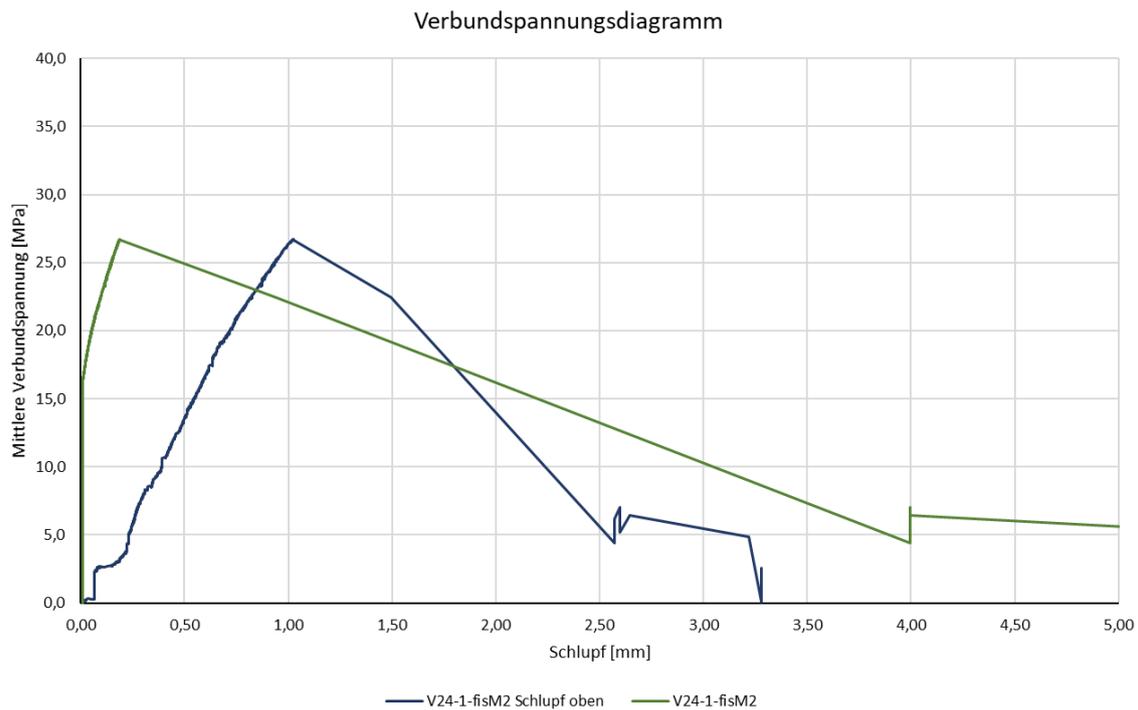
<u>Spaltrisse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Eine Rippe abgesichert, Wendel beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	---

**Anmerkungen:**

Prüfkörper zwei Mal getestet, da Muffe versagt hat

Prüfkörper-Nummer:		<b>24</b>	
Stabtyp:	Thyssen C4R	Wendelsteigung:	22°
Stabdurchmesser:	10 mm	Ganghöhe:	12,70 mm
Verbundlänge:	50 mm	Kerbenbreite:	5,00 mm
Kantenlänge PK:	150 mm	Kerbtiefe:	0,75 mm
Maximale mittlere Verbundspannung:			<b>26,75 MPa</b>
bei einem Schlupf von:			<b>0,189 mm</b>

**Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm:**



<u>Spaltresse im Prüfkörper:</u>	Ja	<u>Abscheren der Stabwendel:</u>	Wendel leicht beschädigt
----------------------------------	----	----------------------------------	--------------------------

Anmerkungen:

Spaltversagen