

4 Ergebnisse

4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ermittelten Abscherfestigkeiten für die untersuchten Verbundarten dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang, in den Tabellen 9.1 - 9.24, zusammengestellt. Dargestellt sind die Abscherfestigkeiten im zeitlichen Verlauf nach 24 Stunden Trockenlagerung, nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung sowie nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. Die Werte nach 24 Stunden Trockenlagerung an Luft dienen als Referenzwerte. Sie werden der besseren Übersicht wegen zusammen mit den Verbundwerten nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung graphisch dargestellt.

Eine weitere Unterteilung erfolgt entsprechend der künstlichen Alterung. Die mit den verschiedenen Verbundkombinationen erreichten Abscherfestigkeiten werden miteinander verglichen. Zum Abschluss werden die für die jeweiligen Verbundarten ermittelten Abscherfestigkeiten, ihrer Lagerungsart und -dauer entsprechend, in einer Graphik gegenübergestellt.

4.2 Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen auf die Verbundfestigkeit zweier NEM-Legierungen nach Durchführung verschiedener Oberflächenkonditionierungsverfahren

4.2.1 Verbundfestigkeit nach Konditionierung mit dem Rocatec-Verfahren und Klebung mit Compolute ® nach unterschiedlicher Lagerung

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen vergleichend die Verbundfestigkeitswerte der Proben nach unterschiedlicher Lagerung. Die Oberflächenkonditionierung erfolgte mit dem Rocatec-Verfahren. Der Klebeverbund wurde mit Compolute ®

hergestellt. Die Verbundfestigkeit der Proben wurde nach 24 Stunden Trockenlagerung, 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C sowie nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast ermittelt. Die Einzelmessungen mit den Mittelwerten \bar{x} , den Standardabweichungen s , und den Minima und Maxima sind zusammen im Anhang in den Tabellen (9.1 - 9.6) zu finden.

4.2.1.1 Verbundfestigkeitswerte nach 24 Stunden Trockenlagerung

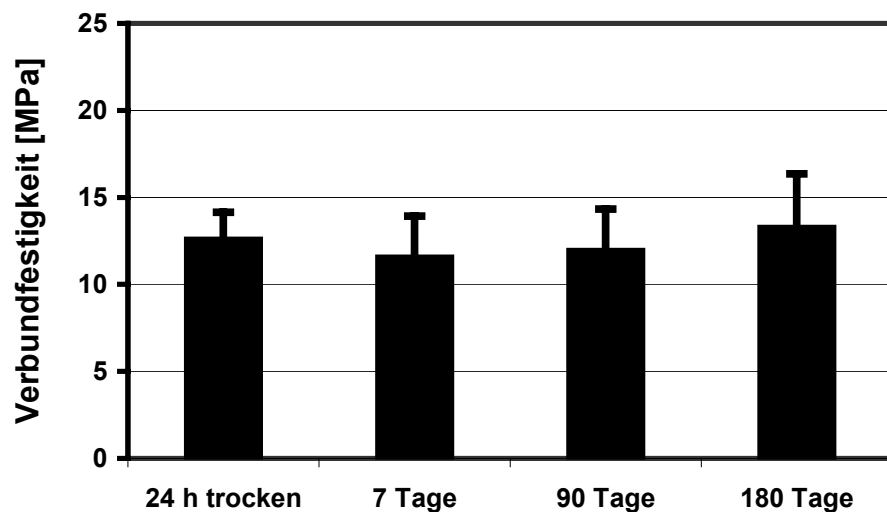


Abbildung 4.1: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach Oberflächenkonditionierung mit dem Rocatec-Verfahren und Verwendung von Compolute ® nach 24 h Trockenlagerung bei 23 °C und vergleichend nach 7, 90 und 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abbildung 4.1 zeigt, dass der Mittelwert der Abscherfestigkeit nach 24 Stunden Trockenlagerung an Luft 12,68 MPa beträgt. Der niedrigste gemessene Wert beträgt 9,20 MPa, der höchste Wert 15,08 MPa. Die

Standardabweichung beträgt 1,47 MPa. Das ist die niedrigste von allen nach 24 Stunden Trockenlagerung ermittelten Verbundwerten.

4.2.1.2 Verbundfestigkeitswerte nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

In der Abbildung 4.1 sind die Verbundfestigkeitswerte des mit dem Rocatec-Verfahren und Compolute ® hergestellten Haftverbundes nach unterschiedlich langer Wasserlagerung bei 35 °C dargestellt. Die Abbildung zeigt vergleichend die mittlere Abscherfestigkeit der Proben nach 7, 90, 180 Tagen. Um den Einfluss der Lagerungsdauer in Wasser auf den Haftverbund zu verdeutlichen, wurde der Verbundfestigkeitsmittelwert nach 24 Stunden Trockenlagerung als Referenz aufgeführt. Die Verbundfestigkeit steigt nach Wasserlagerung beständig von 11,65 MPa über 12,04 MPa auf 13,36 MPa an. Im Vergleich zu dem nach 24 Stunden Trockenlagerung ermittelten Wert ist die Verbundfestigkeit nach 7, und 90 Tagen Wasserlagerung geringer. Nach 180 Tagen ist ein Ansteigen über den nach Trockenlagerung ermittelten Wert zu beobachten. Dieser Verbundfestigkeitswert ist mit 13,36 MPa der höchste für den Haftverbund Rocatec/Compolute ®. Nach unterschiedlich langer Wasserlagerung unterscheiden sich die ermittelten Messwerte nicht signifikant voneinander. Die Verbundfestigkeitswerte nach Trockenlagerung lassen im Vergleich zur Wasserlagerung keine deutlichen Unterschiede erkennen. (siehe Tabelle 4.1).

4.2.1.3 Verbundfestigkeitswerte nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast

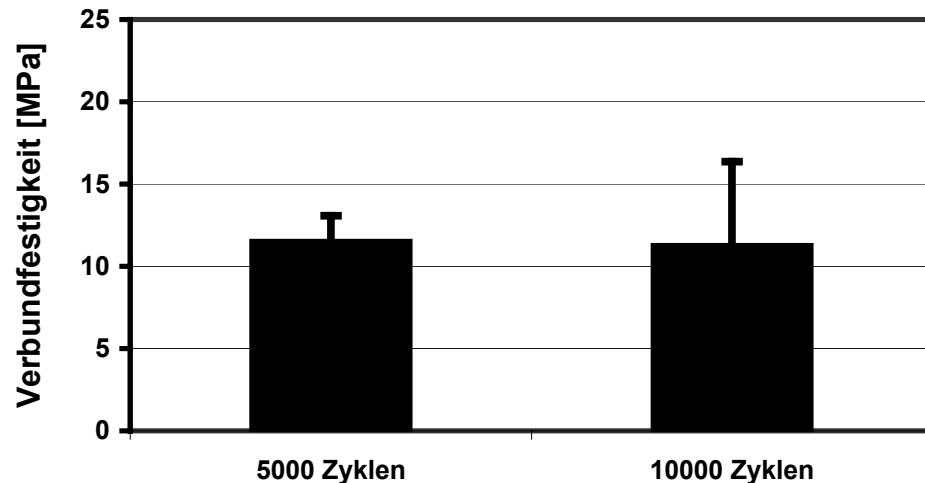


Abbildung 4.2: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach Oberflächenkonditionierung mit dem Rocatec-Verfahren und Verwendung von Compolute[®] nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abbildung 4.1 zeigt die Abscherfestigkeit des mit dem Rocatec-Verfahren und Compolute[®] hergestellten Haftverbundes nach 5000 und 10000 Zyklen im Temperaturwechselbad von 5 °C und 55 °C für je 30 Sekunden. Die Abscherfestigkeit sinkt von 11,60 MPa auf 11,35 MPa. Die gemessenen Verbundfestigkeitswerte nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast zeigen mit 20,66 MPa und 3,38 MPa den größten und niedrigsten ermittelten Wert. Die Standardabweichung ist hier mit 5,01 MPa am höchsten.

4.2.1.4 Zusammenfassender Vergleich der Verbundfestigkeitswerte

Rocatec und Compolute ®				
Lagerung	Abscherkraft Mittelwert [MPa]	Abscherkraft Minimalwert [MPa]	Abscherkraft Maximalwert [MPa]	Abscherkraft Standardabweichung [MPa]
24 Stunden Trocken 23 °C	12,68	9,20	15,08	1,47
7 Tage Wasser 35 °C	11,65	8,38	15,35	2,27
90 Tage Wasser 35 °C	12,04	7,23	15,33	2,29
180 Tage Wasser 35 °C	13,36	7,13	18,21	3,00
5000 Zyklen Temperatur- wechsellast	11,60	3,38	20,66	5,01
10000 Zyklen Temperatur- wechsellast	11,35	6,46	15,96	2,21

Tabelle 4.1: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen für den mit dem Rocatec-System und Compolute ® hergestellten Klebeverbund

Die Abscherfestigkeit beträgt nach 24 Stunden Trockenlagerung 12,68 MPa. Nach 7 Tagen Wasserlagerung fällt die Verbundfestigkeit auf 11,65 MPa ab und steigt nach 90 Tagen auf 12,04 MPa sowie nach 180 Tagen auf 13,36 MPa. Nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast beträgt die Verbundfestigkeit 11,60 MPa und fällt nach 10000 Zyklen auf 11,35 MPa. Die Tabelle 4.1 enthält im Überblick die Mittel-, Minimal-, Maximalwerte und die Standardabweichungen der Verbundfestigkeiten entsprechend den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.

4.2.2 Verbundfestigkeit nach flammenpyrolytischer Konditionierung und Klebung mit Compolute® nach unterschiedlicher Lagerung

Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen vergleichend die Verbundfestigkeiten des mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Compolute® hergestellten Klebehaftverbundes. Die Abscherfestigkeitsmessungen erfolgten nach 24 Stunden Trockenlagerung, 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C sowie nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. Dabei wurde der Einfluss der Lagerungsart und -dauer auf den Haftverbund deutlich. Die Daten der Einzelmessungen sind zusammen mit den entsprechenden Mittelwerten \bar{x} , den Standardabweichungen s sowie den Minima und Maxima im Anhang in den Tabellen (9.7 - 9.12) zu finden.

4.2.2.1 Verbundfestigkeitswerte nach 24 Stunden Trockenlagerung

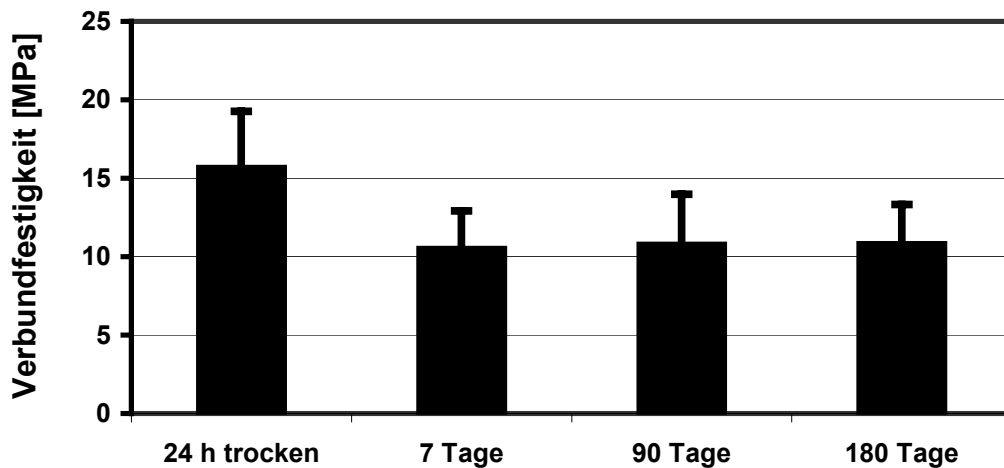


Abbildung 4.3: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit Compolute® nach 24 h Trockenlagerung bei 23 °C und vergleichend nach 7, 90 und 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa)

Aus der Abbildung 4.3 wird die mittlere Verbundfestigkeit der Proben nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit Compolute ® nach 24 Stunden Trockenlagerung ersichtlich. Der Mittelwert ist mit 15,77 MPa der höchste von allen untersuchten Lagerungsbedingungen. Auch die Standardabweichung ist hier mit 3,49 MPa am größten. Der gemessene Maximalwert beträgt 23,43 MPa, der Minimalwert 10,99 MPa (siehe Tabelle 4.2).

4.2.2.2 Verbundfestigkeitswerte nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

Die Abbildung 4.3 zeigt ebenso die Verbundfestigkeit nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C. Um den Einfluss der Wasserlagerung auf den Haftverbund zu verdeutlichen, wurden diese Werte gemeinsam mit den nach Trockenlagerung ermittelten Werten in einem Diagramm dargestellt. Aus der Abbildung ist der Einfluss der Lagerungsdauer auf den Klebeverbund zu erkennen. Die Werte nach unterschiedlich langer Wasserlagerung zeigen mit 10,62 MPa, 10,87 MPa und 10,92 MPa keine deutlichen Abweichungen. Im Vergleich zur Trockenlagerung ist unter Wasserlast generell ein Abfall der Verbundfestigkeit zu beobachten. Dieser fällt mit 10,62 MPa nach 7 Tagen am geringsten aus. Ein leichter Anstieg der Verbundfestigkeit ist nach 90 Tagen auf 10,87 MPa und nach 180 Tagen auf 10,92 zu beobachten.

4.2.2.3 Verbundfestigkeitswerte nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast

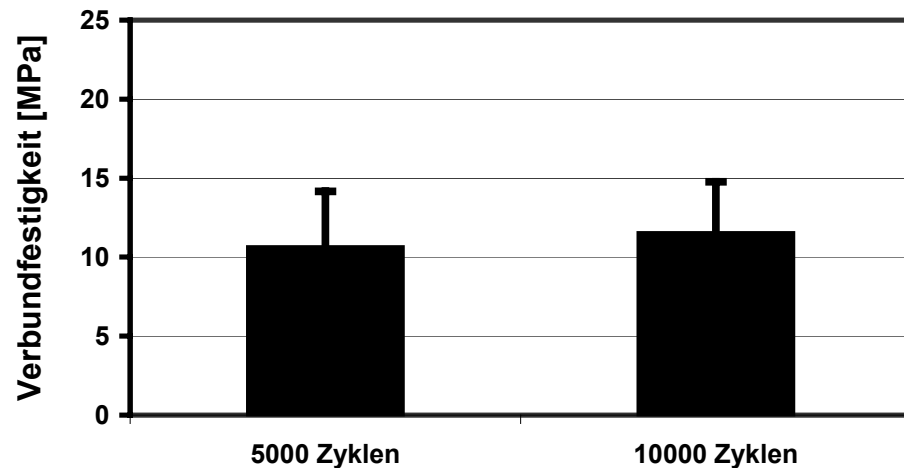


Abbildung 4.4: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Verwendung von Compolute® nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abb. 4.4 zeigt die Verbundfestigkeit des mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Compolute® erzielten Klebeverbundes nach 5000 und 10000 Zyklen im Temperaturwechselbad (je 30 Sekunden bei 5 °C und 55 °C). Der Mittelwert der Verbundfestigkeit nach 5000 und 10000 Zyklen liegt mit 10,67 MPa und 11,56 MPa deutlich unter dem nach Trockenlagerung ermittelten Wert (siehe Tabelle 4.2). Die Verbundfestigkeit nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast entspricht mit 10,67 MPa nahezu dem nach 7 Tagen Lagerung in Wasser festgestellten Wert. Nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast ist ein Anstieg der mittleren Verbundfestigkeit auf 11,56 MPa zu

beobachten. Dieser Wert liegt deutlich unter dem der Trockenlagerung, jedoch ist er größer als nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung.

4.2.2.4 Zusammenfassender Vergleich der Verbundfestigkeitswerte

Flammenpyrolyse und Compolute ®				
Lagerung	Abscherkraft Mittelwert [MPa]	Abscherkraft Minimalwert [MPa]	Abscherkraft Maximalwert [MPa]	Abscherkraft Standardabweichung [MPa]
24 Stunden Trocken 23 °C	15,77	10,99	23,43	3,49
7 Tage aqua dest. 35 °C	10,62	6,98	14,77	2,30
90 Tage aqua dest. 35 °C	10,87	6,48	16,56	3,10
180 Tage aqua dest. 35 °C	10,92	7,50	15,43	2,41
5000 Zyklen Temperatur- wechsellast	11,60	4,20	16,17	3,21
10000 Zyklen Temperatur- wechsellast	11,35	7,09	16,36	2,67

Tabelle 4.2: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen für den mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Compolute ® hergestellten Klebeverbund

Die Verbundfestigkeit beträgt nach 24 Stunden Trockenlagerung 15,77 MPa. Nach 7 Tagen Lagerung in 35 °C warmem Wasser fällt sie auf 10,62 MPa. Nach 90 Tagen Wasserlagerung steigt die Abscherfestigkeit auf 10,87 MPa, nach 180 Tagen auf 10,92 MPa. Nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast beträgt die Verbundfestigkeit 10,67 MPa und nach 10000 Zyklen 11,56 MPa. Die Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die ermittelten Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen.

4.2.3 Verbundfestigkeit nach Konditionierung mit Alloy Primer und Klebung mit PANA VIA F ® nach unterschiedlicher Lagerung

Aus den Abbildungen 4.5 und 4.6 ist die Festigkeit des Verbundes zwischen zwei NEM-Legierungen nach Konditionierung mit Alloy Primer und Klebung mit PANA VIA F ® zu erkennen. Der Verbund wird nach 24 Stunden Trockenlagerung, 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C sowie nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast auf seine Verbundfestigkeit hin untersucht. Dabei werden der Einfluss der unterschiedlichen Lagerung und der Lagerungsdauer auf die Verbundfestigkeit deutlich. Die Messwerte der Einzelmessungen sind zusammen mit den entsprechenden Mittelwerten \bar{x} , den Standardabweichungen s sowie den Minima und Maxima im Anhang in den Tabellen (9.13 - 9.18) zu finden.

4.2.3.1 Verbundfestigkeitswerte nach 24 Stunden Trockenlagerung

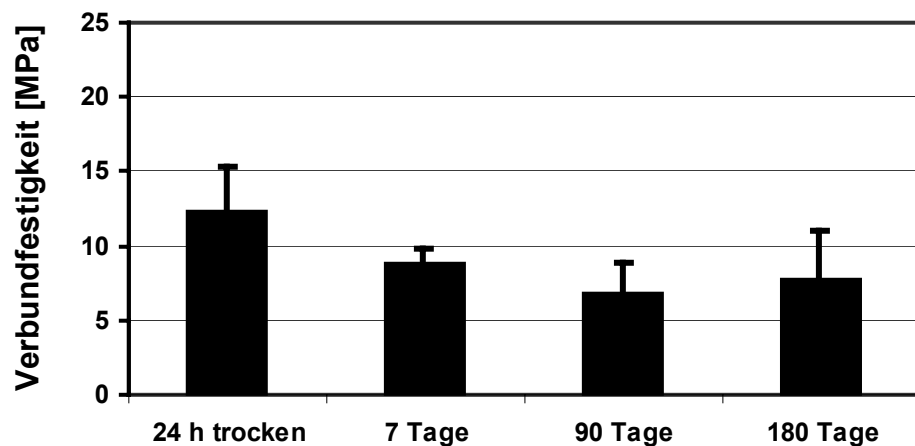


Abbildung 4.5: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach Verwendung von Alloy Primer PANA VIA F ® nach 24 h Trockenlagerung bei 23 °C und vergleichend nach 7, 90 und 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Aus der Abbildung 4.5 ist der Mittelwert der Abscherfestigkeit nach 24 Stunden Trockenlagerung an Luft mit 12,37 MPa zu erkennen. Der niedrigste gemessene Wert beträgt 7,73 MPa, der höchste Wert 18,36 MPa. Die Standardabweichung beträgt 2,95 MPa (siehe Tabelle 4.3).

4.2.3.2 Verbundfestigkeitswerte nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

In der Abbildung 4.5 sind die Abscherfestigkeitswerte des mit Alloy Primer und mit PANA VIA F ® hergestellten Klebehaftverbundes dargestellt. Es sind die Verbundfestigkeitsmittelwerte nach 7, 90, und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C dargestellt. Im Vergleich dazu ist der Mittelwert nach 24 Stunden Trockenlagerung aufgeführt. Dieser Wert dient als Referenzwert, um den Einfluss der Wasserlagerung auf den Haftverbund zu verdeutlichen. Die Verbundfestigkeit fällt unter Wasserlagerung von 8,85 MPa nach 7 Tagen auf 6,90 MPa nach 90 Tagen. Nach 180 Tagen ist ein Anstieg auf 7,85 MPa festzustellen. Im Vergleich zu dem nach Trockenlagerung ermittelten Wert ist die ermittelte Verbundfestigkeit nach Wasserlagerung generell geringer. Die Standardabweichung ist nach einer Woche Lagerung mit 0,96 MPa am geringsten und mit 3,12 MPa nach 180 Tagen am größten (siehe Tabelle 4.3).

4.2.3.3 Verbundfestigkeitswerte nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast

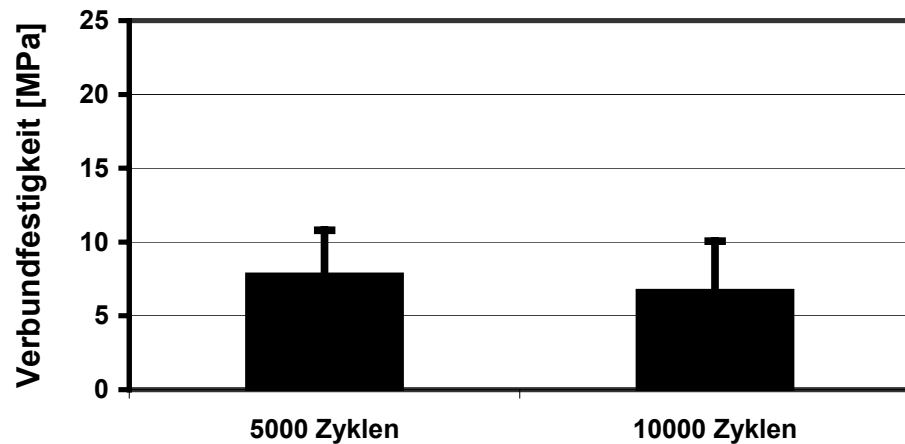


Abbildung 4.6: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach Konditionierung mit Alloy Primer und Klebung mit PANAVIA F[®] nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abbildung 4.6 zeigt die Abscherfestigkeit des mit Alloy Primer und PANAVIA F[®] hergestellten Haftverbundes nach einer Temperaturwechselbelastung von 5000 und 10000 Zyklen (für je 30 Sekunden bei 5 °C und 55 °C). Die Verbundfestigkeit fällt von 7,85 MPa nach 5000 Zyklen auf 6,74 MPa nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. Der größte Wert nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast wurde mit 12,77 MPa gemessen, der niedrigste mit 3,18 MPa. Die Standardabweichung wurde mit 3,33 MPa ermittelt. Nach 10000 Zyklen wurde der höchste Wert mit 12,66 MPa und der niedrigste mit 1,87 MPa gemessen. Die Standardabweichung lag bei 2,92 MPa. Alle Verbundfestigkeitswerte nach Temperaturwechselbelastung liegen unter denen nach 24 Stunden Trockenlagerung.

4.2.3.4 Zusammenfassender Vergleich der Verbundfestigkeitswerte

Alloy Primer und PANA VIA F ®				
Lagerung	Abscherkraft Mittelwert [MPa]	Abscherkraft Minimalwert [MPa]	Abscherkraft Maximalwert [MPa]	Abscherkraft Standardabweichung [MPa]
24 Stunden Trocken 23 °C	12,37	7,73	18,36	2,95
7 Tage Wasser 35 °C	8,85	7,41	10,69	0,96
90 Tage Wasser 35 °C	6,90	3,98	11,58	1,19
180 Tage Wasser 35 °C	7,85	4,57	14,63	3,12
5000 Zyklen Temperatur- wechsellast	7,85	3,18	12,77	3,33
10000 Zyklen Temperatur- wechsellast	6,47	1,87	12,66	2,92

Tabelle 4.3: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen für den mit Alloy Primer und PANA VIA F ® hergestellten Klebeverbund

Die Verbundfestigkeit beträgt nach 24 Stunden Trockenlagerung 12,37 MPa. Nach 7 Tagen Lagerung in 35 °C warmem Wasser fällt sie auf 8,85 MPa. Nach 90 Tagen Wasserlagerung fällt sie auf 6,90 MPa. Nach 180 Tagen ist ein Anstieg auf 7,85 MPa zu beobachten. Nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast beträgt die Verbundfestigkeit ebenfalls 7,85 MPa und nach 10000 Zyklen fällt sie auf 6,74 MPa. Die Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die ermittelten Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen.

4.2.4 Verbundfestigkeit nach flammenpyrolytischer Konditionierung und Klebung mit PANA VIA F ® nach unterschiedlicher Lagerung

In den Abbildungen 4.7 und 4.8 sind vergleichend die Verbundfestigkeitswerte dargestellt, die nach flammenpyrolytischer Konditionierung und Klebung mit PANA VIA F ® erzielt worden sind. Die Prüfkörper wurden 24 Stunden trocken, 7, 90 und 180 Tage in Wasser bei 35 °C gelagert sowie 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast ausgesetzt. Dabei wurde der Einfluss der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen auf die Verbundfestigkeit deutlich. Die Messergebnisse der Einzelmessungen sind im Anhang in den Tabellen (9.19 - 9.24) zusammen mit den entsprechenden Mittelwerten \bar{x} , den Standardabweichungen s sowie den Minima und Maxima zu finden.

4.2.4.1 Verbundfestigkeitswerte nach 24 Stunden Trockenlagerung

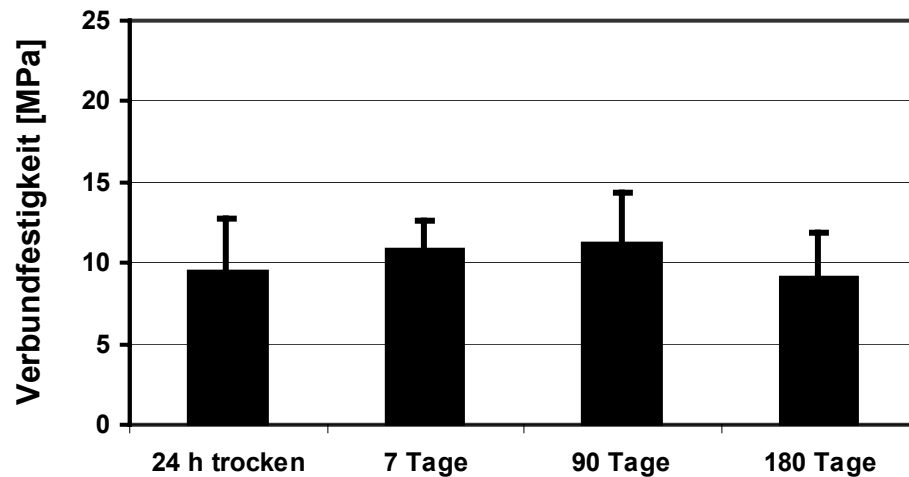


Abbildung 4.7: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Verwendung von PANAVIA F[®] nach 24 h Trockenlagerung bei 23 °C und vergleichend nach 7, 90 und 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abbildung 4.7 zeigt die Verbundfestigkeit zweier NEM-Legierungen nach Konditionierung der Oberflächen mittels Flammenpyrolyse und Klebung mit PANAVIA F[®]. Der Mittelwert nach 24 Stunden Trockenlagerung beträgt 9,54 MPa. Die ermittelte Standardabweichung nach Trockenlagerung ist mit 3,24 MPa am größten. Der gemessene Maximalwert beträgt 18,29 MPa, der Minimalwert 7,04 MPa (siehe Tab. 4.4).

4.2.4.2 Verbundfestigkeitswerte nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

Die Abbildung 4.7 zeigt im Vergleich die Verbundfestigkeitswerte nach 7, 90 und 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C. Aus der Abbildung wird der Einfluss der unterschiedlich langen Wasserlagerung auf den Klebehaftverbund deutlich. Die Mittelwerte nach unterschiedlich langer Wasserlagerung unterscheiden sich mit 10,90 MPa, 11,31 MPa und 9,19 MPa nur unwesentlich voneinander. Bei der Verbundfestigkeit ist mit 10,90 MPa nach 7 und 11,31 MPa nach 90 Tagen eine leichter Anstieg zu erkennen. Nach 180 Tagen Wasserlagerung beträgt die Verbundfestigkeit 9,19 MPa und liegt damit unter dem nach Trockenlagerung ermittelten Wert (siehe Tabelle 4.4).

4.2.4.3 Verbundfestigkeitswerte nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast

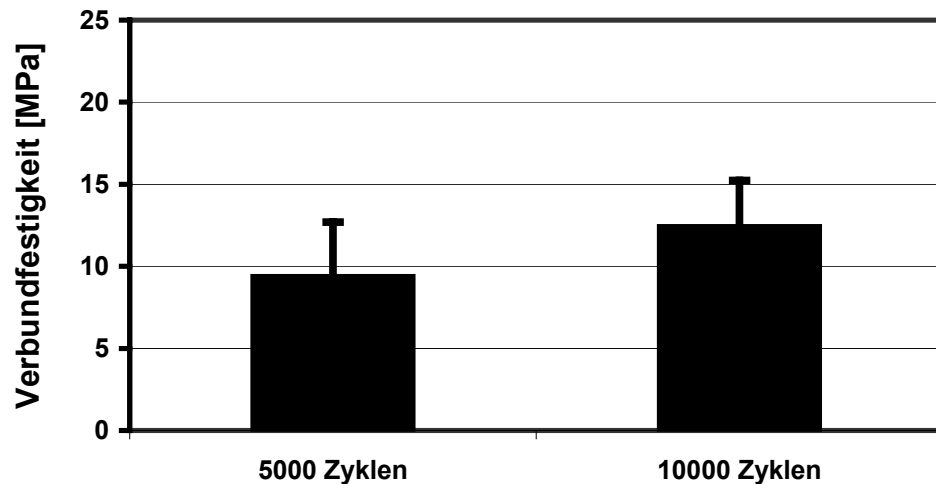


Abbildung 4.8: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Verwendung von PANAVIA F[®] nach 5000 und 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abb. 4.8 zeigt die Verbundfestigkeit des nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit PANAVIA F[®] hergestellten Haftverbundes nach 5000 und 10000 Zyklen im Temperaturwechselbad (jeweils 30 Sekunden bei 5 °C und 55 °C). Der Mittelwert der Verbundfestigkeit nach 5000 Zyklen beträgt 9,46 MPa. Er ist geringer als der nach Trockenlagerung ermittelte Wert. Nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast ist ein Anstieg des Mittelwertes auf 12,51 MPa zu beobachten. Dieser Wert ist größer als die nach Trockenlagerung ermittelte Verbundfestigkeit. Er ist der höchste innerhalb dieser Messreihe und weist gleichzeitig die geringste Standardabweichung mit 1,69 MPa auf (siehe Tabelle 4.4).

4.2.4.4 Zusammenfassender Vergleich der Verbundfestigkeitswerte

Flammenpyrolyse und PANA VIA F ®				
Lagerung	Abscherkraft Mittelwert [MPa]	Abscherkraft Minimalwert [MPa]	Abscherkraft Maximalwert [MPa]	Abscherkraft Standardabweichung [MPa]
24 Stunden Trocken 23 °C	9,54	7,04	18,29	3,24
7 Tage Wasser 35 °C	10,90	6,55	12,87	1,72
90 Tage Wasser 35 °C	11,31	6,58	16,42	3,09
180 Tage Wasser 35 °C	9,19	3,59	13,37	2,66
5000 Zyklen Temperatur- wechsellast	9,46	6,09	13,83	2,73
10000 Zyklen Temperatur- wechsellast	12,51	9,67	16,08	1,69

Tabelle 4.4: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen für den mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und PANA VIA F ® hergestellten Klebeverbund

Die Verbundfestigkeit beträgt nach 24 Stunden Trockenlagerung 9,54 MPa. Nach 7 Tagen Lagerung in 35 °C warmem Wasser steigt sie auf 10,90 MPa. Nach 90 Tagen Wasserlagerung steigt die Abscherfestigkeit auf 11,31 MPa. Nach 180 Tagen ist ein Abfall auf 9,19 MPa festzustellen. Nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast beträgt die Verbundfestigkeit 9,46 MPa und nach 10000 Zyklen 12,51 MPa. Aus der Tabelle 4.4 werden die ermittelten Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen deutlich.

4.3 Vergleich der Verbundfestigkeitswerte verschiedener Oberflächenkonditionierungsverfahren unter Berücksichtigung der Lagerungsart

4.3.1 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 24 Stunden Trockenlagerung

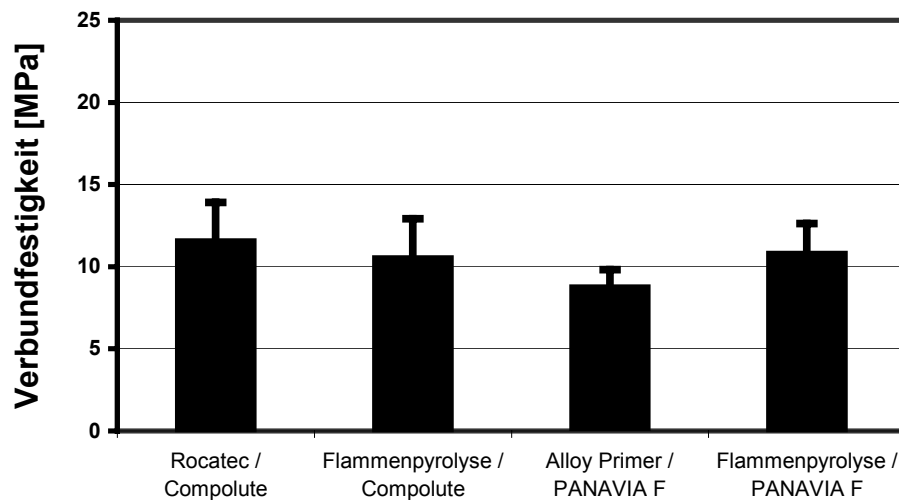


Abbildung 4.9: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 24 h Trockenlagerung an Luft bei 23 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

Die Abbildung 4.9 zeigt die Verbundfestigkeitswerte der untersuchten Haftverbundsysteme nach 24 Stunden Trockenlagerung im Vergleich. Die Tabelle 4.5 zeigt im Vergleich die Mittelwerte, die gemessenen Minimal- und Maximalwerte sowie die Standardabweichung der verschiedenen Verbundsysteme. Die Einzelmessungen sind gesondert zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen, sowie den Minima und Maxima im

Tabellenanhang zu finden (siehe Kapitel 9). Die größte Verbundfestigkeit wurde mit 15,77 MPa für das System der flammenpyrolytischen Konditionierung und Compolute ® ermittelt. Die Standardabweichung stellt mit 3,49 MPa ebenfalls den höchsten Wert dar. Die Verbundfestigkeit für die Kombination Rocatec/Compolute ® ergab mit 12,68 MPa den zweitgrößten Wert. Die hier ermittelte Standardabweichung stellt mit 1,47 MPa den niedrigsten Wert dar. Der Verbundfestigkeitsmittelwert für den mit Alloy Primer und PANA VIA F ® hergestellten Klebehaftverbund liegt mit 12,37 MPa an dritter Stelle. Dieser unterscheidet sich nicht wesentlich von der Verbundkombination Rocatec/Compolute ®. Dagegen ist der Wert der Standardabweichung nach Verwendung von Alloy Primer und PANA VIA F ® mit 2,95 MPa wesentlich größer. Die Verbundfestigkeit nach flammenpyrolytischer Konditionierung und Klebung mit PANA VIA F ® ergab den niedrigsten Mittelwert mit 9,54 MPa. Die berechnete Standardabweichung ergab für dieses Verbundsystem den zweitgrößten Wert mit 3,24 MPa.

24 Stunden Trockenlagerung an Luft bei 23 °C				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute ®	12,68	9,20	15,08	1,47
Flammenpyrolyse/ Compolute ®	15,77	10,99	23,43	3,49
Alloy Primer/ PANA VIA F ®	12,37	7,73	18,36	2,95
Flammenpyrolyse/ PANA VIA F®	9,54	7,04	18,29	3,24

Tabelle 4.5: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 24 Stunden Trockenlagerung an Luft bei 23 °C

4.3.2 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 7 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

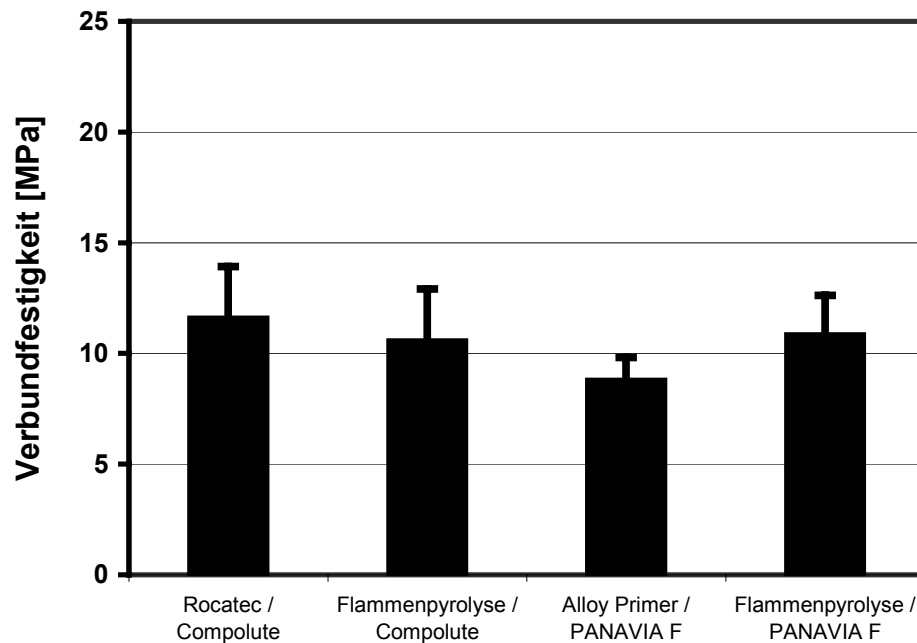


Abbildung 4.10: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 7 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

In der Abbildung 4.10 sind vergleichend die verschiedenen Verbundfestigkeitswerte und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach einer Lagerungsdauer von 7 Tagen in Wasser bei 35 °C dargestellt. Die Tabelle 4.6 enthält zusätzlich die gemessenen Maximal- und Minimalwerte. Die Einzelmessungen sind gesondert zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen, sowie den Minima und Maxima im Tabellenanhang zu finden (siehe Kapitel 9). Der höchste Verbundfestigkeitsmittelwert mit 11,65 MPa wurde für die Verbundkombination Rocatec und Compolute® ermittelt. Die gemessene Verbundfestigkeit und Standardabweichung stellt mit 15,35 MPa und 2,27 MPa den höchsten Wert dieser Messreihe dar. Nach

flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit PANAVIA F ® konnte eine Verbundfestigkeit von 10,90 MPa erreicht werden. Die niedrigste Abscherfestigkeit entfällt mit 6,55 MPa auf diesen Haftverbund. Die Standardabweichung bei dieser Verbundkombination beträgt 1,72 MPa. Durch die flammenpyrolytische Konditionierung der Metalloberfläche mit dem modifizierten Gasbrenner und Klebung mit Compolute ® konnte eine Verbundfestigkeit von 10,62 MPa erreicht werden. Der Messwert der Verbundfestigkeit für den mit Alloy Primer und PANAVIA F ® hergestellten Klebehaftverbund beträgt 8,85 MPa. Für diese Verbundkombination wurde der niedrigste Maximalwert mit 10,69 MPa und die geringste Standardabweichung mit 0,96 MPa ermittelt.

7 Tage Wasserlagerung bei 35 °C				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute ®	11,65	8,38	15,35	2,27
Flammenpyrolyse/ Compolute ®	10,62	6,98	14,77	2,30
Alloy Primer/ PANAVIA F ®	8,85	7,41	10,69	0,96
Flammenpyrolyse/ PANAVIA F ®	10,90	6,55	12,87	1,72

Tabelle 4.6: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 7 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C

4.3.3 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 90 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

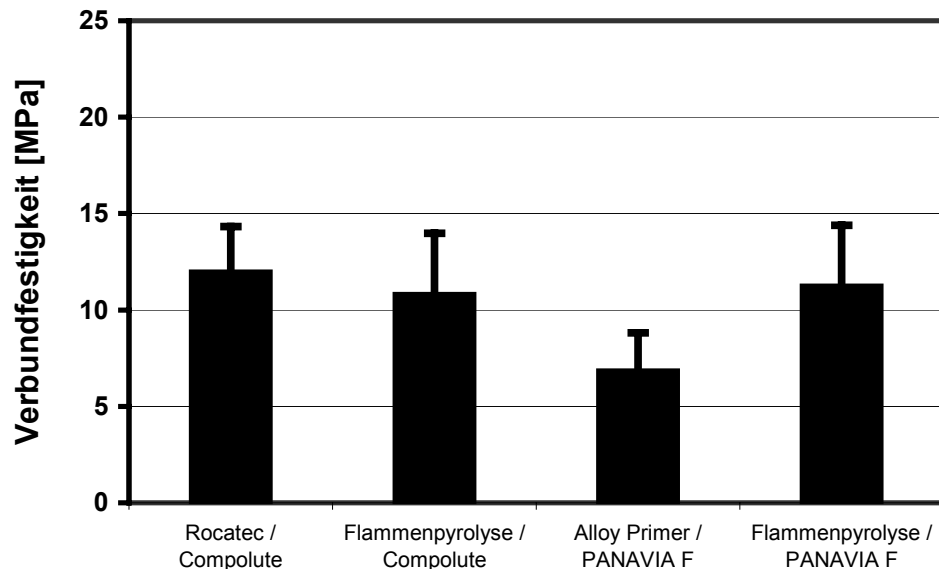


Abbildung 4.11: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 90 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die gestrichelte Linie zeigt die minimale Verbundfestigkeit von 5 MPa nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477.)

Aus der Abbildung 4.11 werden die Verbundfestigkeitswerte mit den jeweiligen Standardabweichungen der untersuchten Haftverbundsysteme nach 90 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C deutlich. Die Tabelle 4.7 enthält zusätzlich vergleichend die gemessenen Minimal- und Maximalwerte. Die Einzelmessungen sind zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen sowie den Minima und Maxima im Tabellenanhang zu finden (siehe Kapitel 9). Die höchste Verbundfestigkeit mit 12,04 MPa konnte nach Oberflächenkonditionierung mit dem Rocatec-Verfahren und Klebung mit Compolute® erreicht werden. Der kleinste gemessene Verbundwert beträgt 7,23 MPa und entfällt auf diese Verbundkombination. Nach flammenpyrolytischer

Oberflächenkonditionierung und Klebung mit PANA VIA F ® konnte eine Verbundfestigkeit von 11,31 MPa erzielt werden. Der Klebeverbund nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Verwendung von Compolute ® erreichte einen Verbundfestigkeitsmittelwert von 10,87 MPa. Der höchste gemessene Maximalwert mit 16,56 MPa sowie die größte Standardabweichung mit 3,10 MPa entfallen auf diese Verbundkombination. Der mit Alloy Primer und PANA VIA F ® hergestellte Klebeverbund erzielte den niedrigsten Verbundfestigkeitswert mit 6,90 MPa. Auch der niedrigste gemessene minimale und maximale Verbundfestigkeitswert entfällt mit 3,98 MPa und 11,58 MPa auf dieses Verbundsystem. Die Standardabweichung entspricht mit 1,91 MPa dem niedrigsten Wert innerhalb dieser Messreihe.

90 Tage Wasserlagerung bei 35 °C				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute ®	12,04	7,23	15,33	2,29
Flammenpyrolyse/ Compolute ®	10,87	6,40	16,56	3,10
Alloy Primer/ PANA VIA F ®	6,90	3,98	11,58	1,91
Flammenpyrolyse/ PANA VIA F ®	11,31	6,58	16,42	3,09

Tabelle 4.7: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 90 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C

4.3.4 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C

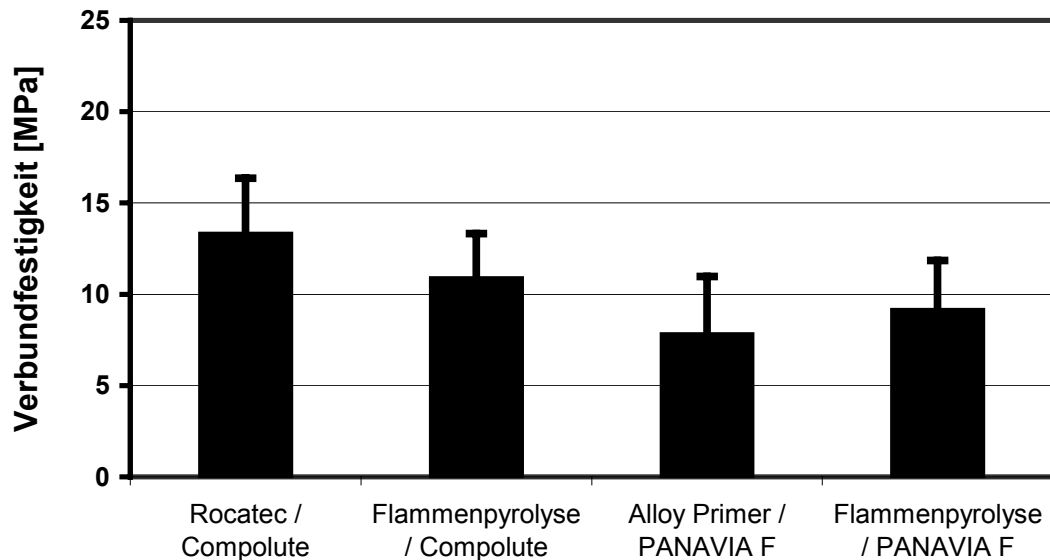


Abbildung 4.12: Verbundfestigkeit (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

In der Abbildung 4.12 sind vergleichend die verschiedenen Verbundfestigkeitswerte und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 180 Tagen Wasserlagerung bei 35 °C dargestellt. Die Tabelle 4.8 enthält die gemessenen Maximal- und Minimalwerte. Die Einzelmessungen sind zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen sowie den Minima und Maxima im Tabellenanhang aufgeführt (siehe Kapitel 9). Für das Verbundsystem Rocatec und Compolute® wurde der höchste Verbundfestigkeitsmittelwert nach 180 Tagen Wasserlagerung mit 13,36 MPa ermittelt. Die Standardabweichung beträgt 3,00 MPa. Nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit Compolute® beträgt der Verbundfestigkeitsmittelwert 10,92 MPa. Die für diese Verbundkombination

ermittelte Standardabweichung ist mit 2,41 MPa die kleinste innerhalb dieser Messserie. Für den mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und PANA VIA F ® hergestellten Klebehaftverbund wurde eine mittlere Verbundfestigkeit von 9,19 MPa ermittelt. Die Standardabweichung beträgt 2,66 MPa. Die Verbundfestigkeit des mit Alloy Primer und PANA VIA F ® hergestellten Haftverbundes konnte nach 180 Tagen Wasserlagerung mit 7,85 MPa bestimmt werden. Dieser Wert ist der niedrigste innerhalb dieser Messserie. Die Standardabweichung beträgt 3,12 MPa.

180 Tage Wasserlagerung bei 35 °C				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute ®	13,36	7,13	18,21	3,00
Flammenpyrolyse/ Compolute ®	10,92	7,50	15,43	2,41
Alloy Primer/ PANA VIA F ®	7,85	4,57	14,63	3,12
Flammenpyrolyse/ PANA VIA F ®	9,19	3,59	13,37	2,66

Tabelle 4.8: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 180 Tagen Lagerung in aqua dest. bei 35 °C

4.3.5 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast

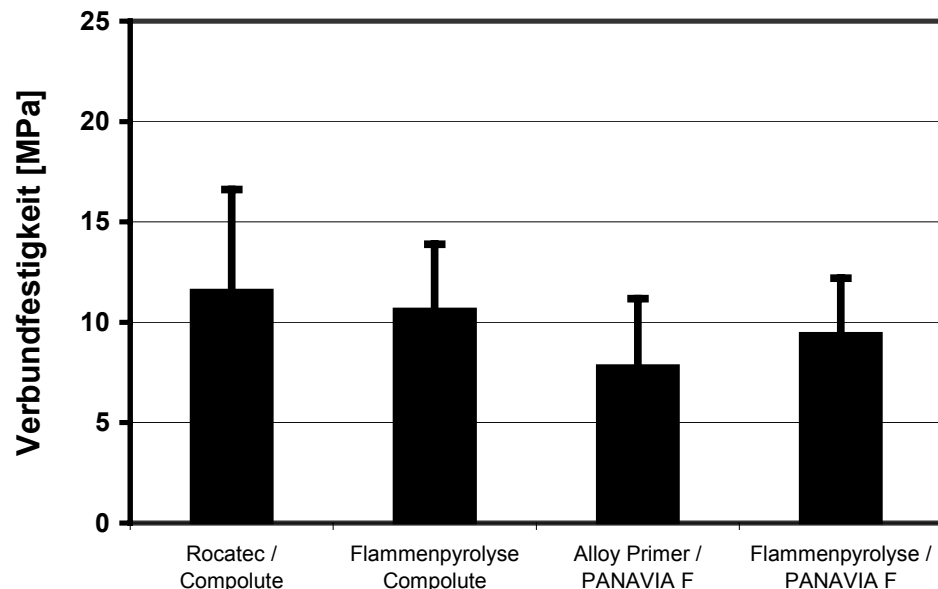


Abbildung 4.13 Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

In der Abbildung 4.13 sind vergleichend die verschiedenen Verbundfestigkeitswerte und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 5000 Zyklen Belastung im Temperaturwechselbad dargestellt. Die Tabelle 4.9 enthält zusätzlich die gemessenen Maximal- und Minimalwerte. Die Einzelmessungen sind gesondert zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen sowie den Minima und Maxima im Tabellenanhang zu finden (siehe Kapitel 9). Die größte Verbundfestigkeit wurde für den mit dem Rocatec-Verfahren und Compolute® hergestellten Klebeverbund festgestellt. Der Mittelwert der Verbundfestigkeit ist mit 11,60 MPa der höchste, der nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast ermittelt wurde. Die Standardabweichung

ist hier mit 5,01 MPa ebenfalls am größten. Der Mittelwert, der nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit Compolute® erreicht wurde, beträgt 10,67 MPa. Dieser Verbundfestigkeitswert ist der zweithöchste, der nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast ermittelt wurde. Die Standardabweichung beträgt 3,21 MPa. Der Verbund nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit PANA VIA F® ergab einen geringfügig geringeren Verbundfestigkeitsmittelwert von 9,46 MPa. Die Standardabweichung ist mit 2,73 MPa ebenfalls niedriger. Der mit Alloy Primer und PANA VIA F® hergestellte Klebehaftverbund ergab mit einem Mittelwert von 7,85 MPa die geringste Verbundfestigkeit. Die hier ermittelte Standardabweichung besaß mit 3,33 MPa den zweithöchsten Wert.

5000 Zyklen Temperaturwechsellast				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute®	11,60	3,38	20,66	5,01
Flammenpyrolyse/ Compolute®	10,67	4,20	16,17	3,21
Alloy Primer/ PANA VIA F®	7,85	3,18	12,77	3,33
Flammenpyrolyse/ PANA VIA F®	9,46	6,09	13,83	2,73

Tabelle 4.9: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 5000 Zyklen Temperaturwechsellast.

4.3.6 Vergleich der Verbundfestigkeit nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast

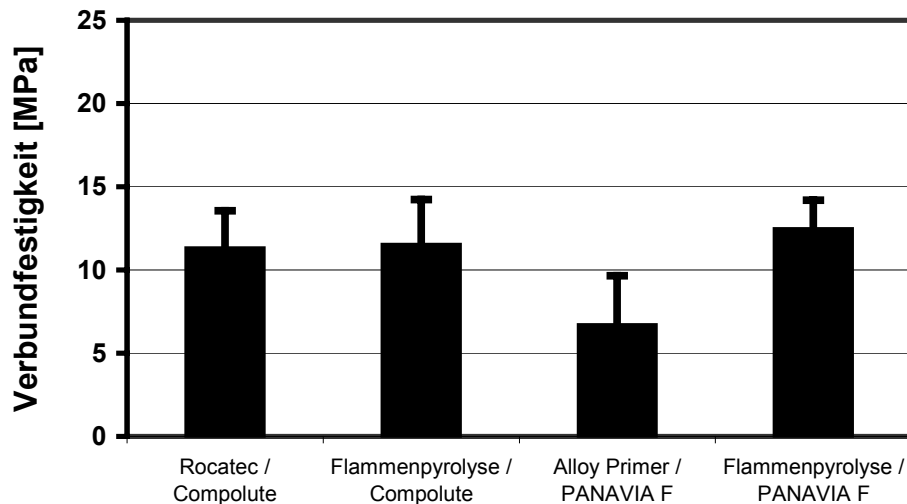


Abbildung 4.14: Verbundfestigkeiten (Mittelwerte) und Standardabweichungen des Klebeverbundes für die untersuchten Verbundsysteme nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast. (Die minimale Verbundfestigkeit nach dem Ergänzungsentwurf zur ISO 10477 beträgt 5 MPa.)

In der Abbildung 4.14 sind vergleichend die verschiedenen Verbundfestigkeitswerte und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach Durchlaufen der Proben von 10000 Zyklen im Temperaturwechselbad dargestellt. Die Tabelle 4.10 enthält zusätzlich die gemessenen Maximal- und Minimalwerte. Die Einzelmessungen sind gesondert zusammen mit den Mittelwerten, den Standardabweichungen sowie den Minima und Maxima im Tabellenanhang zu finden (siehe Kapitel 9). Die Verbundfestigkeitswerte nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast sind mit 12,51 MPa für das nach flammenpyrolytischer Konditionierung und mit PANA VIA F[®] hergestellte Verbundsystem am höchsten. Die Standardabweichung stellt mit 1,69 MPa die geringste innerhalb dieser Messreihe dar. Der mit flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Compolute[®] hergestellte Verbund ergab einen

Mittelwert von 11,56 MPa. Die Standardabweichung wurde mit 2,67 MPa bestimmt. Der mittels Rocatec-Verfahren und Compolute[®] hergestellte Metall-Kunststoff-Verbund ergab einen Verbundfestigkeitsmittelwert von 11,35 MPa. Dieser ist nur unwesentlich kleiner als der mittels Flammenpyrolyse und Compolute[®] erzielte Verbund. Die Standardabweichung beträgt hier 2,21 MPa. Die gemessene mittlere Verbundfestigkeit nach Verwendung von Alloy Primer und PANAVIA F[®] ergab den geringsten Wert mit 6,74 MPa innerhalb dieser Messreihe. Auch die berechnete Standardabweichung stellt mit 1,67 MPa den geringsten Wert dar.

10000 Zyklen Temperaturwechsellast				
Verbundsystem	Mittelwert [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Standardabweichung [MPa]
Rocatec/ Compolute [®]	11,35	6,46	15,96	2,21
Flammenpyrolyse/ Compolute [®]	11,56	7,09	16,36	2,67
Alloy Primer/ PANAVIA F [®]	6,74	1,87	12,66	2,92
Flammenpyrolyse/ PANAVIA F [®]	12,51	9,69	16,08	1,69

Tabelle 4.10: Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen der untersuchten Verbundsysteme nach 10000 Zyklen Temperaturwechsellast.

4.4 Zusammenfassender Vergleich der Abscherfestigkeiten der untersuchten Verbundsysteme

Die Abbildung 4.15 gibt zusammenfassend einen Überblick über die ermittelten Verbundfestigkeitswerte. Sie zeigt vergleichend den Einfluss der verschiedenen Lagerungsbedingungen auf die Verbundfestigkeit der untersuchten Verbundsysteme.

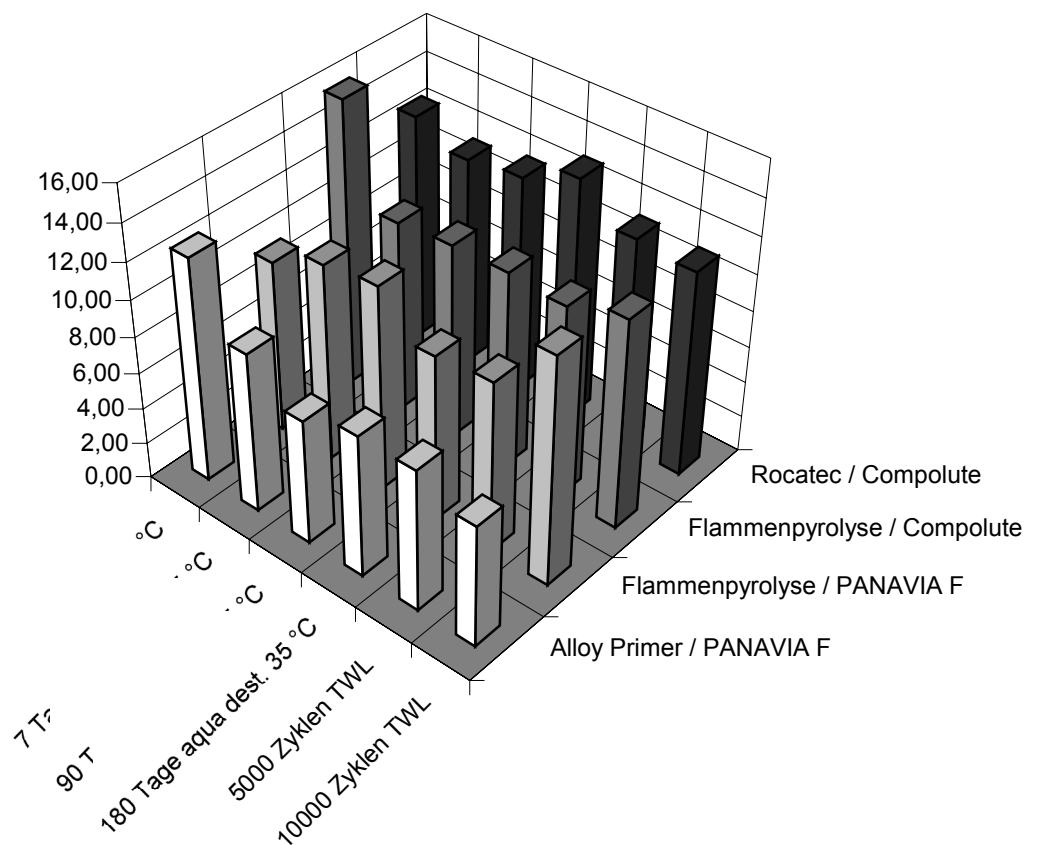


Abbildung 4.15: Verbundfestigkeitswerte (Mittelwerte) der untersuchten Verbundsysteme entsprechend der durchgeführten Lagerungsart und -dauer

Die Verbundfestigkeitswerte, die für den Haftverbund Rocatec und Compolute® ermittelt wurden, liegen alle zwischen 11,35 MPa und 13,36 MPa. Sie zeigen damit die geringsten Schwankungen der Haftfestigkeitswerte innerhalb eines Verbundsystems nach unterschiedlich langer künstlicher Alterung. Die höchste Anfangsverbundfestigkeit nach Trockenlagerung konnte mit 15,77 MPa nach flammenpyrolytischer Oberflächenkonditionierung und Klebung mit Compolute® ermittelt werden. Nachdem die Proben einer unterschiedlich langen künstlichen Alterung ausgesetzt waren, wurde ein Abfallen der Verbundfestigkeitswerte beobachtet. Die ermittelten Werte zeigen geringe Abweichungen untereinander und liegen sämtlich zwischen 10,62 MPa und 11,56 MPa. Die niedrigste Verbundfestigkeit nach 24 Stunden Trockenlagerung wurde für den mit flammenpyrolytischer Konditionierung und PANA VIA F® hergestellten Haftverbund ermittelt. Die Festigkeitswerte dieser Verbundkombination weisen, in Abhängigkeit zur jeweiligen Lagerung, starke Schwankungen auf. Der mit Alloy Primer und PANA VIA F® hergestellte Verbund zeigte nach Trockenlagerung mit 12,37 MPa eine hohe Anfangsverbundfestigkeit. Die Werte, die nach unterschiedlich langer künstlicher Alterung ermittelt wurden, liegen deutlich unter dem ermittelten Ausgangswert. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Verbundsystemen zeigte der mit Alloy Primer und PANA VIA F® hergestellte Klebeverbund die geringste Verbundfestigkeit.

Die genauen Werte der deskriptiven Statistik, Mittelwerte, Minimum, Maximum, Standardabweichung sind den jeweiligen Tabellen (siehe Kapitel 4) und dem Tabellenanhang zu entnehmen (siehe Kapitel 9).