

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Cornelia Bieker

**Methodenentwicklung zur Bestimmung des
hygrothermomechanischen Langzeitverhaltens von
strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und
mineralischen Untergründen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2006

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Kasseler Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. E. Fehling

Tag der mündlichen Prüfung: 03.02.2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5433-1

ISBN-13: 978-3-8322-5433-9

ISSN 1613-3498

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Klebverbindungen als strukturelles Fügeverfahren hat sich in vielen Bereichen der Technik etabliert. Insbesondere beim Fügen von metallischen Werkstoffen oder Werkstoffkombinationen kommt diese Verbindungstechnik immer häufiger zur Anwendung. Auch im Bauwesen bietet sich der Einsatz von Klebverbindungen in vielfältiger Weise an, insbesondere bei der nachträglichen Verstärkung. Ein neues Anwendungsgebiet ergibt sich durch die Entwicklung neuer Baustoffe, wie z. B. Ultrahochfester Betone. Optimierte Materialquerschnitte in Verbindung mit dieser neuen Fügechnik ermöglichen innovative Bauweisen. Dennoch stehen fehlende Methoden zur Bestimmung des Langzeitverhaltens einer weiteren Verbreitung der Klebtechnik im Wege. Das Langzeitverhalten einer Klebverbindung ist hauptsächlich durch die Ausbildung der Grenzschicht charakterisiert. Diese zeigt sich besonders abhängig von Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen. Die Beurteilung einer Klebverbindung erfordert nicht nur die Kenntnis über das Verhalten der einzelnen Komponenten, sondern über den Werkstoffverbund. Bisherige Untersuchungen an Klebverbindungen mit metallischen Untergründen bestätigen, dass das Langzeitverhalten einer Klebverbindung nicht aus quasistatischen Kurzzeitversuchen abgeleitet werden kann. Auch eine mechanisch unbeanspruchte Auslagerung von Proben lässt keine verlässlichen Aussagen bezüglich der Beständigkeit unter gleichzeitiger mechanischer Belastung zu. Inwieweit dies auch auf Klebverbindungen mit mineralischen Untergründen zutrifft, wurde bisher nicht untersucht. Vor diesem Hintergrund sollte eine Methode entwickelt werden, mit der das Langzeitverhalten von Klebverbindungen, nicht nur mit metallischen Untergründen, bestimmt werden kann. Dieser Bemessungsmethode liegen Versuche unter gleichzeitiger mechanischer und hygrothermischer Beanspruchung zugrunde, wie sie unter Betriebsbedingungen auftreten. Das Verfahren soll auch auf Klebverbindungen mit anderen Werkstoffen, z. B. mit mineralischen Untergründen, übertragbar sein.

Die Untersuchungen wurden an 3 unterschiedlichen Klebstoff-Fügeteil-Kombinationen durchgeführt. Zum einen wurde ein heißhärtender Einkomponenten-Klebstoff verwendet, der für das Fügen von Metall geeignet ist. Es handelt sich hierbei um das Produkt Terokal-4520-34, das hauptsächlich in der Automobilindustrie angewendet wird. Bei den beiden anderen Klebstoffen handelt es sich um kalthärtende 2-Komponenten-Epoxidharz-Systeme, die als Bauklebstoffe verwendet werden. Der Klebstoff Sikadur 30 eignet sich zum Kleben von Beton und zur nachträglichen Verstärkung in Verbindung mit der Sika CarboDur Lamelle. Für diese Klebstoffe wurden zunächst die reinen Klebstoffeigenschaften unter Normklima und nach einer Auslagerung in der Klimakammer untersucht. Neben der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften an Substanzproben wurde die Wasseraufnahme nach einer Auslagerung bestimmt. Nach einer 8-wöchigen Lagerung unter 85 °C/ 90 % rel. Feuchte konnte einzig bei dem Klebstoff Sikadur 30 keine Gewichtszunahme festgestellt werden. Die anschließende mechanische Prüfung an den ausgelagerten Substanzproben zeigte bei dem Sikadur 330 deutliche Nachhärtungseffekte, für die Klebstoffe Terokal-4520-34 und Sikadur 30 war eine Nachhärtung nicht eindeutig erkennbar.

Für die Untersuchung des Langzeitverhaltens von Klebverbindungen mit Stahl eignet sich die Rohrprobe. Diese Probenform ermöglicht die Ermittlung von einachsigen oder kombinierten Zug-Torsionskennwerten. Die Untersuchung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens unter quasistatischer Kurzzeitbeanspruchung wurde an einer ser-vohydraulischen Axial/Torsional-Prüfmaschine durchgeführt. Für die Untersuchung

des Langzeitverhaltens unter gleichzeitiger mechanischer und hygrothermischer Beanspruchung wurde eine neue Versuchseinrichtung entwickelt und gebaut.

Zur Untersuchung von Klebverbindungen mit mineralischen Untergründen unter einachsiger Zug- und/oder Torsionsbeanspruchung wurde zunächst ein Probekörper entwickelt, der den Anforderungen des Bauwesens entspricht. Da die Festigkeit einer Klebverbindung im Allgemeinen maßgeblich vom Untergrund abhängt, musste der neue Probekörper für die Prüfung von Klebverbindungen an neuen Baumaterialien und auch an bereits vorhandenen Bauteilen geeignet sein. Dies erfordert eine zerstörende Probenentnahme aus der bestehenden Struktur. Der neue Probekörper setzt sich aus zwei Bohrkernen zusammen, deren Prüfflächen stumpf aufeinander geklebt werden. Für die Durchführung von Torsionsversuchen wurde eine ringförmige Klebschicht aufgetragen. Somit kann bei relativ dünnen Klebschichtflächen eine nahezu homogene Schubspannungsverteilung in der Klebschicht erreicht werden. Die Fertigung der Probekörper wurde auf zwei Arten ausgeführt. Die Herstellungsschritte beider Ausführungsvarianten wurden mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt.

Die experimentellen Untersuchungen an den Rohrproben bestanden aus:

- quasistatischen einachsigen Zug- und Torsionsversuchen
(Kurzzeitversuchen) und
- Zeitstandversuchen unter Zug- und Torsionsbeanspruchung
(Langzeitversuchen).

Die Kurzzeitversuche wurden unter Normklima und unter verschiedenen Temperaturbedingungen durchgeführt. Eine höhere Temperatur führte zu geringeren Festigkeiten und Steifigkeiten. Weitere Versuche wurden nach einer Auslagerungszeit von einem Jahr unter Normklima bzw. 72 Stunden unter einer Umgebungsbedingung von 80 °C/ 50 % rel. Feuchte durchgeführt. Die unter Normklima und unter 80 °C/ 50 % rel. Feuchte ausgelagerten Proben erreichten die gleichen Steifigkeiten wie die ungealterten Proben unter Normklima, bei etwas geringeren Festigkeiten. Während die Bruchbilder nach den Zugversuchen ein kohäsives Versagen zeigten, waren nach den Torsionsversuchen große adhäsive Versagensbereiche zu erkennen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, die Versuche unter gleichzeitiger mechanischer und hygrothermischer Beanspruchung durchzuführen.

Die im Kurzzeitversuch ermittelten Bruchspannungen dienten neben der Charakterisierung der Klebschicht hauptsächlich der Festlegung des Belastungshorizontes für die Langzeitversuche. Diese wurden bei unterschiedlichen Temperaturen und Umgebungsfeuchten durchgeführt. Mit zunehmender Temperatur und Feuchtigkeit nahmen die Zeitstandwerte deutlich ab. Auch die Auswertung der Bruchbilder zeigte signifikante Unterschiede. Bei höheren Feuchtigkeiten nahmen die adhäsiven Versagensbereiche in der Grenzschicht deutlich zu. Insgesamt streuten die Versuche unter Langzeitbeanspruchung mehr als unter Kurzzeitbeanspruchung. Die Streuungen nahmen mit geringerer Beanspruchung, also bei längeren Versuchszeiten, zu.

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Klebverbindungen mit Steinen und UHPC wurden ebenfalls quasistatische Kurzzeitversuche unter Normklima und nach einer Auslagerung unter 85 °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 90 % durchgeführt. Alle Versuche zeigten große Streuungen. Das Versagen trat immer im Stein bzw. im UHPC auf. Bei Versuchen an Mauerziegeln wurden unter Normklima unterschiedli-

che Festigkeiten erreicht, die eine Abhängigkeit von der Entnahmestelle der Bohrkern aus dem Stein zeigten. Dies konnte bei Versuchen an Kalksandsteinen nicht eindeutig belegt werden. Die Auslagerung der Probekörper bewirkte sowohl bei den Klebverbindungen mit Mauerziegeln als auch bei denen mit Kalksandsteinen eine deutliche Verringerung der Festigkeiten. Alle Probekörper versagten kohäsiv im Grenzbereich des Steins.

Am Beispiel der Klebverbindungen mit Ultrahochfestem Beton konnte gezeigt werden, dass Kurzzeitversuche alleine keine Aussage über die Dauerhaftigkeit einer Klebverbindung ermöglichen. Die Auslagerung der geklebten UHPC-Proben bewirkte eine Nachvernetzung des Klebstoffs, was zu höheren Steifigkeiten und Festigkeiten führte. Hier trat das Versagen in der Grenzfläche des UHPC ein. An denselben Probekörpern wurden zusätzlich Kriechversuche unter verschiedenen Temperaturen und Umgebungsfeuchtigkeiten durchgeführt. Im Gegensatz zu den ausgelagerten Versuchen stellte sich hier bereits nach kurzen Versuchszeiten ein überwiegend adhäsives Versagen ein.

Für die Herstellung der Probekörper wurden verschiedene Varianten vorgestellt, die auf der Entnahme von Bohrkernen beruhen. Bei den hier vorgestellten Ergebnissen konnte kein Einfluss der Herstellungsvariante auf die Versuchsergebnisse festgestellt werden. Ungeklärt bleibt, inwiefern die Bohrkernentnahme die Festigkeit der Bohrkern beeinflusst. Auch die Untersuchung eines Maßstabeffektes konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Es wurden nur exemplarische Torsionsversuche vorgestellt. Der Probekörper wurde außerdem für die Durchführung von Zugversuchen und kombinierten Versuchen konzipiert. Er ist weiterhin übertragbar auf andere Materialkombinationen, wie z. B. Verbindungen von Beton mit Stahl oder Glas.

Versuchsergebnisse aus Langzeituntersuchungen von Klebverbindungen mit metallischen Werkstoffen werden üblicherweise im doppellogarithmischen Maßstab aufgetragen. Dadurch sollen die Ergebnisse in erster Linie an eine Gerade angepasst werden, die eine einfachere Handhabung für die Formulierung des Zeitstandverhaltens ermöglicht, z. B. durch die Einführung eines „Shiftfaktors“. Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigen aber, dass dieser Ansatz nicht geeignet ist. Eine bessere Annäherung an die Versuchsergebnisse konnte mit einer Exponentialfunktion erreicht werden. Auch die Extrapolation der Ergebnisse mit dieser Exponentialfunktion liefert eine realistischere Einschätzung des Materialverhaltens in der Zukunft. Davon ausgehend wurde eine Zeitstandgleichung hergeleitet, die die Darstellung der Versuchsergebnisse als Gerade ermöglicht. Dennoch konnte durch Shift-Faktoren keine Abhängigkeit zwischen den Versuchsergebnissen hergestellt werden. Grund dafür sind die Auswirkungen von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Klebverbindung, die sich gegenseitig beeinflussen, d. h. mit der Umgebungstemperatur ändert sich der Feuchteinfluss.

Zur Beschreibung des Langzeitverhaltens wurden deshalb zwei weitere Methoden vorgestellt, die auf der Auswertung der Parameter der Zeitstandgleichung basieren. Bei der ersten Methode wurde eine hygrothermische Zustandsgleichung aufgestellt. Grundlage dieser Methode ist die Beschreibung der Parameter der Zeitstandgleichung durch eine Gerade, die durch eine lineare Regression der Parameter erreicht wird und entsprechende Kennwerte der hygrothermischen Zustandsgleichung liefert. Da mit dieser Methode nicht in allen Fällen die gewünschte Genauigkeit erzielt werden kann, wurde eine weitere Methode vorgestellt, die mit der gleichen Anzahl von Versuchswerten eine exakte Übereinstimmung mit der vorhandenen Datenbasis liefert. Dabei wurden die Parameter in Abhängigkeit aller Versuchswerte durch eine Po-

lynomfunktion mit quadratischem Ansatz erfasst und in der Zeitstandgleichung berücksichtigt. Jede weitere Temperatur-Feuchtigkeitskombination kann durch Interpolation berechnet werden. Auf dieser Grundlage wurden Zeitstanddiagramme aufgestellt, aus denen Versagenszeiten direkt abgelesen werden können. Für Temperaturbeanspruchungen, die über die ausgewerteten Versuche hinausgehen, wurden Parameter-Diagramme vorgestellt, die eine einfache Bestimmung der Versagenszeiten ermöglichen. Es bleibt festzustellen, dass weitere Versuche zur Absicherung der Methode notwendig sind.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Auswertung der Zeitstandgleichung die Erstellung von Diagrammen ermöglicht, die einfach in der Anwendung sind und jedem Datenblatt beigelegt werden können. Diese Zeitstanddiagramme sind weiterhin zur Erfassung in einer Datenbank geeignet und können einen großen Anwenderkreis erreichen. Sie können beliebig ergänzt werden und tragen somit zur Dokumentation des Langzeitverhaltens bei. Damit wurde eine Methode entwickelt, die für das Vorhersagen der Haltbarkeit und Langzeitbeständigkeit von Klebverbindungen sehr Erfolg versprechend sein kann. Diese Methode eignet sich für die Untersuchung von Klebverbindungen mit unterschiedlichsten Materialien und unterschiedlichen klebtechnischen Oberflächenvorbehandlungen.

1 Summary and prospects

The use of adhesive joints as a structural bonding method has become established in many areas of technology. In particular, it is used increasingly in the bonding of metal materials or material combinations. In building industry, too, the use of adhesively bonded joints offers a variety of possibilities, especially in post strengthening. A new field of application has been generated by the development of new construction materials, such as ultra-high performance concretes. Optimized materials sections in combination with these new bonding techniques enables innovative construction techniques. Nevertheless, further diffusion of adhesive technology is hampered by lack of methods to determine long-term behaviour. The long-term behaviour of an adhesive joint is characterized principally by the formation of a boundary layer, which can be seen to be particularly dependent on temperature and humidity factors. The assessment of an adhesive technique requires knowledge of not only the behaviour of the individual components, but also the compound of the materials. Analyses of adhesive joints with metallic subsurface confirm that the long-term behaviour of an adhesive compound cannot be derived from quasi-static short-term tests. Even a mechanically untested external storage of samples does not permit statements with regard to durability. To what extent this applies to adhesive joints with mineral subsurfaces has so far not been examined. Against this background a method should be developed that enables us to determine the long-term behaviour of adhesive compounds, not only those with metal subsurfaces. This assessment method is based on tests under simultaneous mechanical and hydrothermal load, as they occur under operating conditions. The method is supposed to be transferable to adhesive joints with other materials, e.g. with mineral subsurfaces.

The analyses were carried out on 3 different adhesive-assembly components. In one case, a thermosetting one component adhesive was used, which is suitable for the bonding of metals: Terokal-4520-34, employed principally in the automotive industry. The other adhesives are cold-setting 2 component epoxy resin systems, used as construction adhesives. The adhesive Sikadur 30 is suitable for bonding concrete in combination with Sika CarboDur lamella. For these adhesives pure adhesive properties were analysed under normal climatic conditions and after storage in the climate chamber. After ascertaining the mechanical properties by means of bulk specimens water-take-up was determined after external storage. After an eight week storage under 85 °C/ 90 % rel. humidity only Sikadur 30 gave no evidence of an increase in weight. The follow-up mechanical test on the externally stored specimens revealed clear post-curing effects in Sikadur 330, but for the adhesives Terokal-4520-34 and Sikadur 30 no post-curing was clearly detectable.

Analysis of long-term behaviour of adhesively bonded joints with steel can be done by means of the butt bonded tubular specimen. This form of sample makes it possible to investigate uniaxial or combined tension-torsion parameters. Analysis of the stress-strain behaviour under quasi-static short-term load was carried out on a servo-hydraulic axial/torsion testing machine. To analyse long-term behaviour under simultaneous mechanical and hydrothermal load a new testing facility was developed and built.

To analyse adhesive joints with mineral subsurfaces under uniaxial and/or torsion load an specimen was first developed that corresponded to the constructional requirements. Since the strength of an adhesive compound in general depends largely on the subsurface, the new sample for testing adhesive joints had to be adjusted to new building materials and already existing building parts. This requires non-destructive sample taking from the existing structure. The new specimen is made up of two cores, whose testing areas are bonded together obtusely. To carry out torsion tests a ring-shaped adhesive layer was applied. Thus, with relatively thin adhesive layers, an almost homogeneous shear stress distribution in the adhesive layer can be

achieved. The production of the specimen was executed in two ways. The production steps of both execution variants were presented with their advantages and disadvantages.

The experimental analyses on the tube samples consisted of:

- quasi-static uniaxial tension and torsion tests
(short-term tests) and
- rupture behaviour tests under tension and torsion load
(long-term tests).

The short-term tests were carried out under standard climatic conditions and various temperature conditions. A higher temperature led to lower strength and stiffness. Additional tests were carried out after external storage of one year under standard climatic conditions and/or 72 hours under an ambient temperature of 80 °C/ 50 % rel. humidity. The samples externally stored under standard climatic conditions and 80 °C/ 50 % rel. humidity achieved the same stiffness as those not aged under standard climatic conditions, with slightly less stability. While the break images showed cohesion failure after tension tests, large adhesion failure areas were recognizable after the torsion tests. These results confirm the need to carry out the tests under simultaneous mechanical and hydrothermal load.

The ultimate strength investigated in the short-term trial served, in addition to characterizing the adhesive layer, principally to establish the load limit for long-term tests. These were carried out at different temperatures and ambient humidity. The time-to-rupture behaviour values diminished significantly with increasing temperature and humidity. Also the evaluation of the break images revealed major differences. With increased humidity the adhesive failure areas in the boundary layer increased significantly. Altogether, the tests under long-term load dispersed more than under short-term load. The dispersals increased with lower load that is in longer test times.

To determine the properties of adhesive joints with stone and UHPC quasi-static short-term tests under standard climatic conditions and after external storage under 85 °C and relative humidity of 90 % were also carried out. All tests showed large dispersals. Failure always occurred in the stone and/or UHPC. With tests on bricks varying stability was reached under standard climatic conditions, which revealed a dependency on the place of extraction of the core from the brick. This could not be proved decisively with tests on lime sand brick. The external storage of the specimens in both adhesive joints with bricks and those with lime sand bricks a substantial reduction of strength. All specimens failed cohesively in the boundary area of the stone.

The example of adhesive joints with ultra high performance concrete was able to show that short-term tests alone do not enable one to make statements about the durability of an adhesive compound. The external storage of the bonded UHPC samples effected a post-curing of the adhesive, which led to increased rigidity and stability. Here the failure occurred in the boundary layer of the UHPC. In addition, rupture tests were carried out on the same specimens at different temperatures and humidities. Unlike the externally stored tests an overwhelmingly adhesive failure set in here after brief test periods.

Several variants were presented to produce the specimens based on the extraction of cores. With the results presented here no influence of production variants on test results could be determined. It remains unclear to what extent the core extraction influences the strength and, in some cases, the compound. The investigation of a measuring unit effect could not be considered within the framework of this work. Only examples of torsion tests are presented. The specimen was, moreover, conceived for carrying out tension tests and combined tests. It is also transferable to other material combinations, such as joints of concrete with steel or glass.

Test results from long-term analyses on adhesive joints with metals are usually plotted in double-logarithmic scale. The results should first of all be adjusted to a straight line, which makes it simpler to formulate the time-to-rupture behaviour, for example by introducing a "shift factor". But the test results achieved show that this approach is not suitable. It was possible to achieve a better approximation to the test results with an exponential function. Extrapolation of the results with this exponential function will also deliver a more realistic assessment of the material behaviour in future. From this a time-to-rupture behaviour equation was derived that makes the representation of the test results as a straight line possible. Nevertheless, no dependency between the test results could be established by means of the shift factors. The reason was the effects of temperature and humidity on the adhesive joint which reciprocally affect each other, that is, the humidity influence changes with the ambient temperature.

To describe the long-term behaviour, therefore, two further methods were presented, based on the evaluation of the parameters of the time-to-rupture behaviour. In the first method a hydrothermal constitutive equation was drawn up. The basis of this method is to describe the parameters of the time-to-rupture behaviour by a straight line, which is achieved by a linear regression of the parameters and delivers corresponding parameters of the hydrothermal constitutive equations. Since the desired precision cannot be achieved in all cases with this method, a further method was presented that delivers, with the same number of test values, an exact correspondence with the existing database. The parameters were recorded, in accordance with all test values, via a polynomial function with quadratic factor and taken into consideration in the time-to-rupture behaviour. Each further temperature-humidity combination can be calculated by interpolation. On this basis time-to-rupture diagrams were made, from which failure times can be read directly. For temperature loads, which would exceed the values determined, parameter-diagrams were presented, which make possible a simple determination of the failure times. It remains to be determined whether further tests are necessary to prove the reliability of the method.

Altogether it can be maintained that the evaluation of the time-to-rupture behaviour equation makes it possible to produce diagrams that are simply in the application and can be added to any data sheet. These time-to-rupture behaviour diagrams are also suitable for inclusion in a database and can reach a large user circle. They can be supplemented at any time and thus contribute to documentation of long-term behaviour. In this way, a method has been developed that is promising for predicting durability and long-term stability. This method is suitable for analysing adhesive joints with the most diverse materials.

Summary and prospects

The use of adhesive joints as a structural bonding method has become established in many areas of technology. In particular, it is used increasingly in the bonding of metal materials or material combinations. In building industry, too, the use of adhesively bonded joints offers a variety of possibilities, especially in post strengthening. A new field of application has been generated by the development of new construction materials, such as ultra-high performance concretes. Optimized materials sections in combination with these new bonding techniques enables innovative construction techniques. Nevertheless, further diffusion of adhesive technology is hampered by lack of methods to determine long-term behaviour. The long-term behaviour of an adhesive joint is characterized principally by the formation of a boundary layer, which can be seen to be particularly dependent on temperature and humidity factors. The assessment of an adhesive technique requires knowledge of not only the behaviour of the individual components, but also the compound of the materials. Analyses of adhesive joints with metallic subsurface confirm that the long-term behaviour of an adhesive compound cannot be derived from quasi-static short-term tests. Even a mechanically untested external storage of samples does not permit statements with regard to durability. To what extent this applies to adhesive joints with mineral subsurfaces has so far not been examined. Against this background a method should be developed that enables us to determine the long-term behaviour of adhesive compounds, not only those with metal subsurfaces. This assessment method is based on tests under simultaneous mechanical and hydrothermal load, as they occur under operating conditions. The method is supposed to be transferable to adhesive joints with other materials, e.g. with mineral subsurfaces.

The analyses were carried out on 3 different adhesive-assembly components. In one case, a thermosetting one component adhesive was used, which is suitable for the bonding of metals: Terokal-4520-34, employed principally in the automotive industry. The other adhesives are cold-setting 2 component epoxy resin systems, used as construction adhesives. The adhesive Sikadur 30 is suitable for bonding concrete in combination with Sika CarboDur lamella. For these adhesives pure adhesive properties were analysed under normal climatic conditions and after storage in the climate chamber. After ascertaining the mechanical properties by means of bulk specimens water-take-up was determined after external storage. After an eight week storage under 85 °C/ 90 % rel. humidity only Sikadur 30 gave no evidence of an increase in weight. The follow-up mechanical test on the externally stored specimens revealed clear post-curing effects in Sikadur 330, but for the adhesives Terokal-4520-34 and Sikadur 30 no post-curing was clearly detectable.

Analysis of long-term behaviour of adhesively bonded joints with steel can be done by means of the butt bonded tubular specimen. This form of sample makes it possible to investigate uniaxial or combined tension-torsion parameters. Analysis of the stress-strain behaviour under quasi-static short-term load was carried out on a servo-hydraulic axial/torsion testing machine. To analyse long-term behaviour under simultaneous mechanical and hydrothermal load a new testing facility was developed and built.

To analyse adhesive joints with mineral subsurfaces under uniaxial and/or torsion load an specimen was first developed that corresponded to the constructional requirements. Since the strength of an adhesive compound in general depends largely on the subsurface, the new sample for testing adhesive joints had to be adjusted to

new building materials and already existing building parts. This requires non-destructive sample taking from the existing structure. The new specimen is made up of two cores, whose testing areas are bonded together obtusely. To carry out torsion tests a ring-shaped adhesive layer was applied. Thus, with relatively thin adhesive layers, an almost homogeneous shear stress distribution in the adhesive layer can be achieved. The production of the specimen was executed in two ways. The production steps of both execution variants were presented with their advantages and disadvantages.

The experimental analyses on the tube samples consisted of:

- quasi-static uniaxial tension and torsion tests
(short-term tests) and
- rupture behaviour tests under tension and torsion load
(long-term tests).

The short-term tests were carried out under standard climatic conditions and various temperature conditions. A higher temperature led to lower strength and stiffness. Additional tests were carried out after external storage of one year under standard climatic conditions and/or 72 hours under an ambient temperature of 80 °C/ 50 % rel. humidity. The samples externally stored under standard climatic conditions and 80 °C/ 50 % rel. humidity achieved the same stiffness as those not aged under standard climatic conditions, with slightly less stability. While the break images showed cohesion failure after tension tests, large adhesion failure areas were recognizable after the torsion tests. These results confirm the need to carry out the tests under simultaneous mechanical and hydrothermal load.

The ultimate strength investigated in the short-term trial served, in addition to characterizing the adhesive layer, principally to establish the load limit for long-term tests. These were carried out at different temperatures and ambient humidity. The time-to-rupture behaviour values diminished significantly with increasing temperature and humidity. Also the evaluation of the break images revealed major differences. With increased humidity the adhesive failure areas in the boundary layer increased significantly. Altogether, the tests under long-term load dispersed more than under short-term load. The dispersals increased with lower load that is in longer test times.

To determine the properties of adhesive joints with stone and UHPC quasi-static short-term tests under standard climatic conditions and after external storage under 85 °C and relative humidity of 90 % were also carried out. All tests showed large dispersals. Failure always occurred in the stone and/or UHPC. With tests on bricks varying stability was reached under standard climatic conditions, which revealed a dependency on the place of extraction of the core from the brick. This could not be proved decisively with tests on lime sand brick. The external storage of the specimens in both adhesive joints with bricks and those with lime sand bricks a substantial reduction of strength. All specimens failed cohesively in the boundary area of the stone.

The example of adhesive joints with ultra high performance concrete was able to show that short-term tests alone do not enable one to make statements about the durability of an adhesive compound. The external storage of the bonded UHPC samples effected a post-curing of the adhesive, which led to increased rigidity and stability. Here the failure occurred in the boundary layer of the UHPC. In addition, rupture tests were carried out on the same specimens at different temperatures and hu-

midities. Unlike the externally stored tests an overwhelmingly adhesive failure set in here after brief test periods.

Several variants were presented to produce the specimens based on the extraction of cores. With the results presented here no influence of production variants on test results could be determined. It remains unclear to what extent the core extraction influences the strength and, in some cases, the compound. The investigation of a measuring unit effect could not be considered within the framework of this work. Only examples of torsion tests are presented. The specimen was, moreover, conceived for carrying out tension tests and combined tests. It is also transferable to other material combinations, such as joints of concrete with steel or glass.

Test results from long-term analyses on adhesive joints with metals are usually plotted in double-logarithmic scale. The results should first of all be adjusted to a straight line, which makes it simpler to formulate the time-to-rupture behaviour, for example by introducing a "shift factor". But the test results achieved show that this approach is not suitable. It was possible to achieve a better approximation to the test results with an exponential function. Extrapolation of the results with this exponential function will also deliver a more realistic assessment of the material behaviour in future. From this a time-to-rupture behaviour equation was derived that makes the representation of the test results as a straight line possible. Nevertheless, no dependency between the test results could be established by means of the shift factors. The reason was the effects of temperature and humidity on the adhesive joint which reciprocally affect each other, that is, the humidity influence changes with the ambient temperature.

To describe the long-term behaviour, therefore, two further methods were presented, based on the evaluation of the parameters of the time-to-rupture behaviour. In the first method a hydrothermal constitutive equation was drawn up. The basis of this method is to describe the parameters of the time-to-rupture behaviour by a straight line, which is achieved by a linear regression of the parameters and delivers corresponding parameters of the hydrothermal constitutive equations. Since the desired precision cannot be achieved in all cases with this method, a further method was presented that delivers, with the same number of test values, an exact correspondence with the existing database. The parameters were recorded, in accordance with all test values, via a polynomial function with quadratic factor and taken into consideration in the time-to-rupture behaviour. Each further temperature-humidity combination can be calculated by interpolation. On this basis time-to-rupture diagrams were made, from which failure times can be read directly. For temperature loads, which would exceed the values determined, parameter-diagrams were presented, which make possible a simple determination of the failure times. It remains to be determined whether further tests are necessary to prove the reliability of the method.

Altogether it can be maintained that the evaluation of the time-to-rupture behaviour equation makes it possible to produce diagrams that are simply in the application and can be added to any data sheet. These time-to-rupture behaviour diagrams are also suitable for inclusion in a database and can reach a large user circle. They can be supplemented at any time and thus contribute to documentation of long-term behaviour. In this way, a method has been developed that is promising for predicting durability and long-term stability. This method is suitable for analysing adhesive joints with the most diverse materials.