

# **Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Ronald Blochwitz**

aus Stuttgart, Deutschland

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prof. Dipl.-Ing. MSc. Ph.D. Dr.phil. Dr.techn. Konrad Bergmeister

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Januar 2019

Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

2019



## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen, als die ausdrücklich bezeichneten Hilfsmittel und Quellen verwendet zu haben.

Gärtringen, November 2017

(Ronald Blochwitz)



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann für die Betreuung meiner Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen und Herrn Prof. Dipl.-Ing. MSc. Ph.D. Dr.phil. Dr.techn. Konrad Bergmeister danke ich vielmals für ihr Interesse, das sie meiner Arbeit entgegengebracht haben, und die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen gilt mein großer Dank dafür, dieses Forschungsvorhaben ursprünglich ins Leben gerufen zu haben.

Ebenso möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bei all meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die wirklich tolle, kollegiale Zusammenarbeit über all die Jahre hinweg bedanken.

Hierbei gilt mein besonderer Dank der „Besatzung“ des Laborgebäudes, in welchem, etwas entfernt vom Institut selbst, die Versuchstechnik der Abteilung Befestigungstechnik beheimatet ist, und in welchem ich mein gesamtes IWB-Leben verbringen durfte.

Vorne weg danke ich Herrn Dipl.-Ing. Bernd Schlottke, der als damaliger Leiter des IWB-Labors sämtlichen meiner versuchstechnischen Bemühungen stets geduldig und aufgeschlossen begegnete und mit seinem reichen Erfahrungsschatz sehr zum Gelingen beigetragen hat.

Nicht minder dankbar bin ich den Technikern der Abteilung, Herrn Paul Geiger, Herrn Eugen Lindenmeier und Herrn Peter Scherf, für ihre überragende Hilfs- und Einsatzbereitschaft. Ohne deren Wissen und Kompetenz auf ihrem jeweiligen Fachgebiet wäre das Forschungsvorhaben in versuchstechnischer Hinsicht kaum umsetzbar gewesen.

Abschließend möchte ich meiner lieben Frau Simone und meinem lieben Sohn Tom zu tiefst danken für ihre außerordentliche Geduld, die sie während der Fertigstellung der hier vorliegenden Arbeit in den vergangenen Jahren so oft beweisen mussten.

Ronald Blochwitz



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kenntnisstand</b>	<b>5</b>
2.1	Verbunddübelssysteme unter kurzzeitiger Lasteinwirkung	5
2.2	Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung	5
2.3	Beurteilung der Dauerhaftigkeit nach ETAG 001, Teil 5 bzw. AC 308	6
2.3.1	Durchführung von Dauerlastversuche nach ETAG	10
2.3.1.1	Prüftemperatur nach ETAG	10
2.3.1.2	Prüflast nach ETAG	10
2.3.1.3	Versuchssetup nach ETAG	12
2.3.1.4	Versuchsdurchführung nach ETAG	13
2.3.1.5	Auswertung nach ETAG	14
2.4	Unzulänglichkeiten des Verfahrens nach ETAG und AC	15
2.4.1	Methode der Lastabstützung	15
2.4.2	Installation der Messvorrichtung	15
2.4.3	Berücksichtigung von Steifigkeit und Ausrichtung der Gewindestange	19
2.4.4	Versuchsdurchführung	20
2.4.5	Messwertaufbereitung	20
2.4.6	Ansatz des Versagenskriteriums	21
2.5	Zusammenfassung und Konsequenz	22
<b>3</b>	<b>Standzeitversuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen</b>	<b>24</b>
3.1	Grundgedanke der Standzeitkurve	24
3.2	Vorgehensweise	25
3.2.1	Ermittlung vollständiger Verschiebungskurven bis zum Versagen	25
3.2.1.1	Verformungsanteile der gemessenen Verschiebungen	27
3.2.1.2	Messwertqualität der Verschiebungskurven	31
3.2.2	Ermittlung der Standzeitkurve	31
3.2.2.1	Interpretation kurzzeitiger, zentrischer Zugversuche	32
3.3	Eigenschaften des Standzeitverfahrens	32
<b>4</b>	<b>Versuchstechnik</b>	<b>33</b>
4.1	Entwicklung spezieller Versuchstechnik	33
4.2	Versuchstechnik für die Versuchsvorbereitung	33
4.2.1	Vorrichtung zur zentrischen Bohrlocherstellung	33
4.2.2	Dübelzentrierung	34
4.3	Versuchstechnik für die Versuchsdurchführung	36
4.3.1	Versuchsvorrichtungen für Versuche mit zentrischer Zuglasteinwirkung	36
4.3.2	Umhausung	39

---

4.3.3	Heiztechnik .....	41
4.3.4	Messtechnik.....	41
4.3.4.1	Wegaufnehmer.....	41
4.3.4.2	Datenerfassung .....	42
4.3.5	Auswertung.....	42
4.3.5.1	Normierung auf eine Standardversorgungsspannung .....	42
4.3.5.2	Justierung der Messwerte .....	42
4.3.5.3	Kompensation der Stahldehnung des Dübelüberstandes .....	42
4.3.5.4	Datenreduktion .....	43
4.3.5.5	Ermittlung der Anfangsverschiebungen im Dauerlastversuch .....	43
4.3.5.6	Standzeitermittlung aus Kurzzeitversuchen .....	44
<b>5</b>	<b>Standards der Versuchsdurchführung .....</b>	<b>45</b>
5.1	Komponenten- und Verfahrensstandards .....	45
5.1.1	Mörtelsysteme .....	45
5.1.2	Anker (Gewindestangen).....	45
5.1.3	Bohrer.....	45
5.1.4	Bürsten .....	45
5.1.5	Versuchskörper.....	46
5.2	Bohrlochreinigung.....	47
5.3	Setzen des Dübels.....	47
5.4	Abstützung .....	47
5.4.1	Enge Abstützung .....	47
5.4.2	Semi-weite Abstützung .....	49
5.5	Aufheizen .....	49
5.6	Belastung.....	50
5.6.1	Belastung der Kurzzeitversuche .....	50
5.6.2	Belastung der Langzeitversuche.....	50
5.7	Datenaufbereitung .....	50
<b>6</b>	<b>Standzeitversuche an Verbunddübelssystemen.....</b>	<b>51</b>
6.1	Allgemeines .....	51
6.2	Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2 .....	52
6.2.1	Zielsetzung .....	52
6.2.2	Ansatz.....	52
6.2.3	Versuchsparameter .....	52
6.2.4	Programm.....	53
6.2.4.1	Kurzzeitversuche .....	53
6.2.4.2	Langzeitversuche (Standzeitversuche) .....	53

---

6.2.5	Ergebnisse.....	54
6.2.5.1	Analyse Kurzzeitversuche .....	54
6.2.5.2	Analyse Langzeitversuche.....	56
6.2.5.2.1	Anfangsverschiebungen.....	56
6.2.5.2.2	Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten .....	58
6.2.5.3	Standzeitkurven.....	62
6.2.5.4	Zusammenfassung .....	68
6.3	Abstützungsversuche mit Epoxy 1 .....	69
6.3.1	Zielsetzung .....	69
6.3.2	Ansatz.....	69
6.3.3	Versuchsparameter .....	69
6.3.4	Programm .....	70
6.3.4.1	Kurzzeitversuche.....	70
6.3.4.2	Langzeitversuche (Standzeitversuche) .....	70
6.3.5	Ergebnisse.....	71
6.3.5.1	Analyse Kurzzeitversuche .....	71
6.3.5.2	Analyse Langzeitversuche.....	73
6.3.5.2.1	Anfangsverschiebungen.....	73
6.3.5.2.2	Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten .....	75
6.3.5.3	Standzeitkurven.....	80
6.3.5.4	Zusammenfassung der Abstützungsversuche mit Epoxy 1 .....	84
6.4	Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2 .....	85
6.4.1	Zielsetzung .....	85
6.4.2	Ansatz.....	85
6.4.3	Versuchsparameter .....	85
6.4.4	Programm .....	86
6.4.4.1	Kurzzeitversuche.....	86
6.4.4.2	Langzeitversuche (Standzeitversuche) .....	86
6.4.5	Ergebnisse.....	87
6.4.5.1	Analyse Kurzzeitversuche .....	87
6.4.5.2	Analyse Langzeitversuche.....	89
6.4.5.2.1	Anfangsverschiebungen.....	89
6.4.5.2.2	Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten .....	90
6.4.5.3	Standzeitkurve.....	94
6.4.5.4	Zusammenfassung der Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2 .....	98
6.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Standzeitverhalten .....	99
6.6	Ausblick.....	103

---

<b>7 Dauerlastversuche mit Epoxy 1 zur Bestimmung des Versagensverhaltens unter zentrischer Zuglasteinwirkung .....</b>	<b>105</b>
7.1 Allgemeine Zielsetzung .....	105
7.2 Ausgangssituation nach Standzeitversuchen mit Epoxy 1 und 2 .....	105
7.3 Allgemeiner Ansatz .....	105
7.4 V1 - Ringspaltversuche mit Epoxy 1 .....	107
7.4.1 Zielsetzung .....	107
7.4.2 Ansatz.....	107
7.4.3 Versuchsparameter .....	107
7.4.4 Programm.....	107
7.4.4.1 Vorversuche .....	107
7.4.4.2 Hauptversuche .....	108
7.4.5 Ergebnisse.....	108
7.4.5.1 Analyse Anfangsverschiebungen .....	108
7.4.5.2 Analyse Kurvenverläufe .....	111
7.4.6 Zusammenfassung .....	121
7.4.7 Ausblick .....	122
7.5 V2 – Querdehnungsversuche .....	123
7.5.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung.....	123
7.5.2 Ansatz.....	123
7.5.3 Versuchsparameter .....	124
7.5.4 Ergebnisse.....	124
7.5.4.1 Analyse Anfangsverschiebungen .....	124
7.5.4.2 Analyse der Kurvenverläufe .....	126
7.5.5 Zusammenfassung .....	128
7.5.6 Ausblick .....	128
7.6 V3 – SiS-Versuche (Stahl-in-Stahl).....	129
7.6.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung.....	129
7.6.2 Ansatz.....	129
7.6.3 Versuchsparameter .....	129
7.6.4 Programm.....	129
7.6.4.1 Kurzzeitversuche.....	129
7.6.4.2 Langzeitversuche .....	130
7.6.5 Ergebnisse.....	131
7.6.5.1 Analyse Kurzzeitversuche .....	131
7.6.5.2 Analyse Langzeitversuche .....	133
7.6.5.2.1 Anfangsverschiebungen .....	133
7.6.5.2.2 Kurvenverläufe.....	135

---

7.6.6 Zusammenfassung .....	140
7.6.7 Ausblick .....	140
<b>7.7 V4 – Feuchteversuche mit Epoxy 1 .....</b>	<b>141</b>
7.7.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung .....	141
7.7.2 Ansatz.....	141
7.7.3 Versuchsparameter .....	141
7.7.4 Programm .....	142
7.7.4.1 Teilprogramm – Tastversuche mit zyklischer Belastung .....	142
7.7.4.2 Teilprogramm – Versuche mit zyklischer Belastung.....	143
7.7.4.3 Teilprogramm – Kurzzeitversuche .....	143
7.7.4.4 Teilprogramm – Langzeitversuche .....	145
7.7.5 Teilergebnisse der Tastversuche .....	146
7.7.6 Teilergebnisse der Versuche mit zyklischer Belastung .....	147
7.7.7 Teilergebnisse der Kurzzeitversuche .....	152
7.7.8 Teilergebnisse der Dauerlastversuche .....	155
7.7.8.1 Anfangsverschiebungen .....	155
7.7.8.2 Verschiebungscharakteristik.....	156
7.7.9 Zusammenfassung der Feuchteversuche mit Epoxy 1 .....	158
7.7.10 Konsequenzen aus den Feuchteversuchen mit Epoxy 1 .....	159
7.7.11 Ausblick .....	162
<b>8 Zusammenfassung.....</b>	<b>164</b>
<b>9 Ausblick .....</b>	<b>167</b>
<b>10 Englische Zusammenfassung / Summary .....</b>	<b>168</b>
<b>11 Literaturübersicht .....</b>	<b>170</b>
<b>Anhang / Parametertabellen.....</b>	<b>173</b>



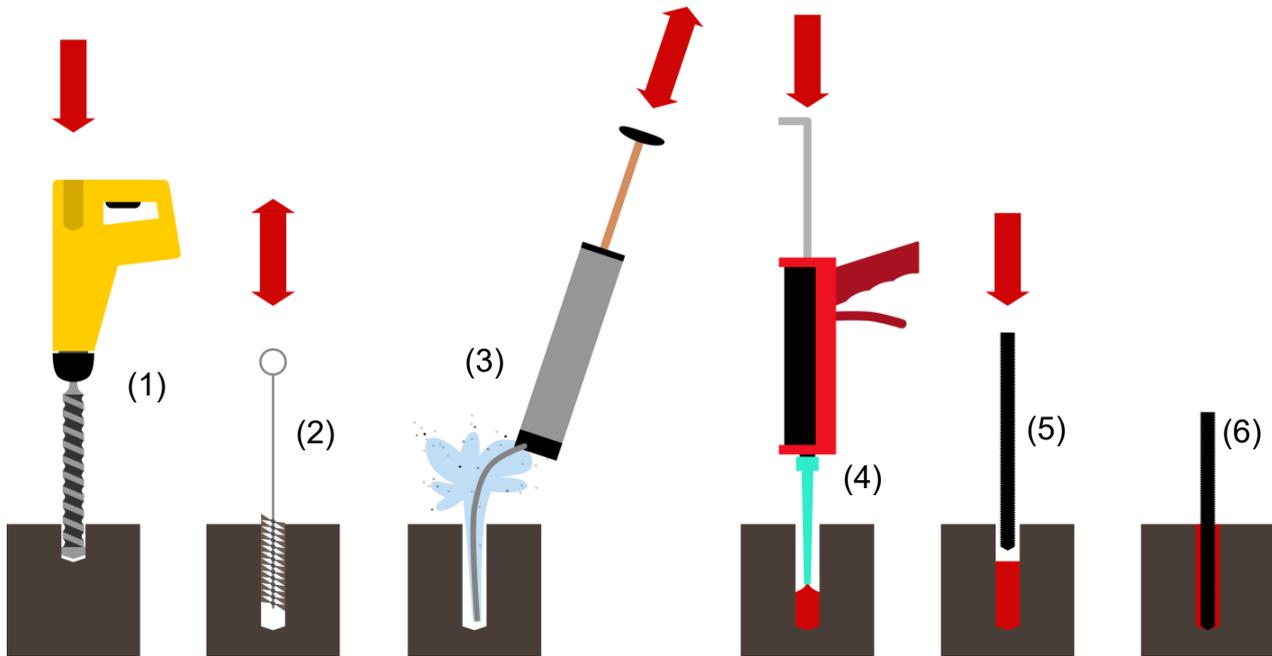
## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

In der Befestigungstechnik sind Verbunddübelssysteme seit Langem verfügbare und vielfach angewendete Befestigungsmittel [1]. Die Zuverlässigkeit handelsüblicher Systeme steht bei kurzzeitiger Lasteinwirkung heute außer Frage, sofern diese Systeme über bauaufsichtliche Zulassungen verfügen, die den jeweiligen Anwendungszweck abdecken. Zur Erlangung dieser Zulassungen müssen die Produkte ihre Eignung in einer Vielzahl genormter Prüfungen erfolgreich unter Beweis stellen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Ermittlung von Tragwiderständen unter kurzzeitiger Lasteinwirkung. Tragwiderstände unter dauerhafter Lasteinwirkung, wie sie beispielsweise bei abgehängten Decken auftreten, werden bislang nicht explizit ermittelt. Stattdessen findet eine vereinfachte Prüfung auf Basis zeitabhängiger Dübelverschiebungen statt, wie sie unter Dauerbelastungen auftreten. Diese erfolgt, indem auf das System die Prüfdauerlast aufgebracht und innerhalb eines definierten Prüfzeitraums die resultierende Verschiebung gemessen wird. Anschließend wird diese über die angenommene Lebensdauer des Dübelsystems hinweg extrapoliert. Die Prüfung ist bestanden, wenn die extrapolierte Dübelverschiebung hierbei eine systemspezifische Grenzverschiebung nicht überschreitet (Details, siehe Kapitel 2).



**Abbildung 1.1:** Dübelverschiebungen unter Dauerlast im Ted-Williams-Tunnel / Interstate 90 Connector Tunnel (Foto entnommen aus dem Unfallreport NTSB/HAR-07/02 des National Transportation Safety Board, 2007)

Ein Vorfall aus dem Jahr 2006 gibt Anlass zu der Vermutung, dass auf Basis dieses Vorgehens nicht in jedem Fall eine ausreichende Systemzuverlässigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung sichergestellt ist. Am 10. Juli 2006 ereignete sich im Bostoner Ted-Williams-Tunnel ein Dübelversagen im Bereich der abgehängten Tunneldecke. Eine Inspektion der Verankerungen in dem Tunnel, der bereits 1995 fertiggestellt, aber erst 2003 für den allgemeinen Verkehr freigegeben wurde, führte zu der Erkenntnis, dass sich nahezu sämtliche zur Befestigung der Deckenelemente eingesetzten Verbunddübel, allein infolge der dauerhaften Belastung durch ihr Eigengewicht, in erheblichem Maße verschoben haben (siehe Abbildung 1.1).



(1) Bohren, (2) Bürsten, (3) Ausblasen, (4) Injizieren, (5) Setzen, (6) Aushärten

**Abbildung 1.2:** üblicher Installationsvorgang von Verbunddübelssystemen

Bei derartigen Systemen werden handelsübliche Gewindestangen mittels eines Kunstharzmörtels in ein zuvor gebohrtes und gereinigtes Bohrloch in den Ankergrund (Beton, Mauerwerk) eingeklebt. Abbildung 1.2 illustriert diesen Vorgang. Der Setzvorgang eines Verbunddübel erfolgt der Reihe nach durch (1) Bohren, (2) Bürsten, (3) Ausblasen, (4) Injizieren, (5) Setzen und (6) Aushärten. Die Vorgänge Bürsten und Ausblasen erfolgen in der Regel mehrfach im Wechsel. Nach dem Aushärten des Klebstoffs können die anzubringenden Bauteile kraftschlüssig am Ankergrund befestigt werden.

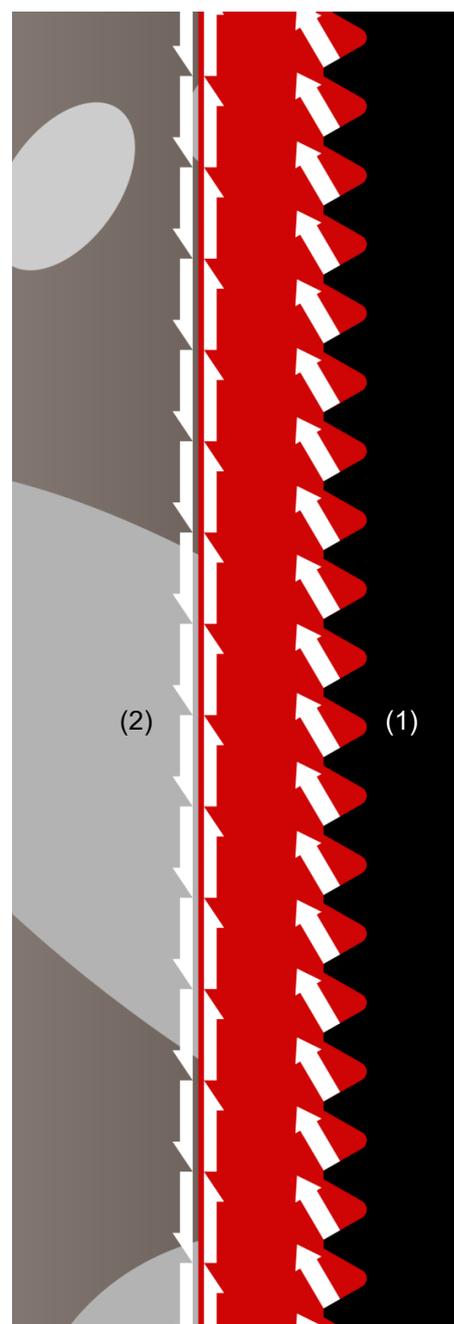
Während das Anwendungsprinzip jeweils dasselbe ist, unterscheiden sich die auf dem Markt befindlichen Mörtelsysteme in ihrem chemischen Aufbau und der chemischen Reaktion während des Aushärtungsprozesses zum Teil erheblich voneinander. Eine Einführung zum chemischen Aufbau üblicher Verbunddübelssysteme findet sich in [3, 4].

Bei den zur Anwendung kommenden Klebstoffen handelt es sich um 2-Komponentensysteme, bestehend aus einem Harz und einem Härter, die beim Einbringen in das Bohrloch durchmisch werden. Infolge einer chemischen Reaktion (Polymerisation) zwischen beiden Komponenten wird hierdurch ein Härtingsprozess in Gang gesetzt, durch den die Gewindestange, die unmittelbar nach dem Injizieren des Mörtels in das Bohrloch eingebracht wird, kraftschlüssig mit dem Ankergrund verbunden wird. Die Kraftübertragung von der Gewindestange in den Beton erfolgt dabei über verschiedene Mechanismen (siehe Abbildung 1.3). Zwischen Gewindestange (rechts, schwarz) und Verbundmörtel (mittig, rot) erfolgt die Kraftübertragung mittels Verzahnung (1) (Formschluss). Zwischen Verbundmörtel und Beton (links, grau) wird von einer stoffschlüssigen Kraftübertragung durch das Wirken von Adhäsionskräften (2) ausgegangen. Die genaue Wirkweise dieses Stoffschlusses ist im Detail auch heute noch nicht geklärt [2]. Die mit einem Hammerbohrverfahren erstellten Bohrlöcher weisen zudem erhebliche Unebenheiten auf, sodass im Falle eines Versagens der Klebung entlang der Bohrlochwand (Adhäsionsversagen) ein nachfolgender Tragmechanismus in Form eines Formschlusses zwischen Verbundmörtel und Beton zu erwarten ist.

Eine Überprüfung der statischen Nachweise zu den im Ted-Williams-Tunnel verwendeten Verankerungen zeigte damals auf, dass die Lastannahmen korrekt gewählt waren und der Konstrukteur bei der Wahl des Dübeldurchmessers und der Verankerungstiefe erhebliche rechnerische Reserven vorgesehen hatte. Der naheliegendste Fall einer Unterbemessung der Verankerungen konnte somit als Ursache früh ausgeschlossen werden.

Im Zuge der anschließenden Untersuchungen, eingeleitet durch das National Transportation Safety Board (NTSB) [5], wurde abschließend festgestellt, dass es bei der Installation der Systeme zu einer Verwechslung zweier Varianten desselben Produktes gekommen war. So wurde das Produkt eines amerikanischen Lieferanten damals sowohl in einer Standardvariante mit normalem Härungsverhalten als auch in einer Variante mit beschleunigtem Härungsverhalten vertrieben. Während das Standardprodukt über eine entsprechende bauaufsichtliche Zulassung für den hier gegebenen Anwendungszweck verfügte, war dies bei der schnellhärtenden Variante nicht der Fall. Da sich die Gebinde beider Varianten damals äußerlich lediglich in Details voneinander unterscheiden haben, war diese Verwechslung von keinem der am Bau des Tunnels Beteiligten bemerkt worden. Dies führte letztlich dazu, dass die Befestigung der abgehängten Tunneldecke mit einem Verbunddübelssystem erfolgte, dem der entsprechende Eignungsnachweis hierfür fehlte. Wie sich weiter herausstellte, waren viele der gebohrten Löcher vor dem Setzen der Gewindestangen nicht ausreichend mit Mörtel verfüllt worden, sodass bei einer Vielzahl der Verankerungen, unabhängig vom Mörteltyp, die in den statischen Nachweisen in Ansatz gebrachten Tragfähigkeiten nicht gegeben waren. Weiter wurde vermutet, dass die Lagerung von Teilen der Mörtelchargen bei zu hohen Temperaturen erfolgte, was noch vor dem Verarbeiten zu einer Schädigung der beiden Teilkomponenten des Mörtels hätte geführt haben können. Wie weiterführende Untersuchungen am Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC, Teil der Federal Highway Administration) mit beiden Mörtelvarianten aufzeigten [6], waren für das Versagen jedoch nicht ausschließlich die teilweise fehlerhafte Installation (unzureichende Verfüllung des Bohrlochs) oder die ggf. unzulässigen Lagerungsbedingungen verantwortlich. Verantwortlich hierfür war die Tatsache, dass die schnellhärtende Mörtelvariante, im Vergleich zur Standardvariante, eine extrem reduzierte Tragfähigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung aufwies, obwohl die Kurzzeitfestigkeiten beider Systeme auf vergleichbar hohem Niveau lagen.

Die unter dauerhafter Lasteinwirkung geringe Tragfähigkeit der schnellhärtenden Variante des Mörtels konnte in eigenen Versuchen am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart bestätigt werden. So zeigte sich, dass selbst bei optimaler Installation des Dübels (gründliche Reinigung des Bohrlochs, vollständige Bohrlochverfüllung mit Mörtel, keine Beeinträchtigung der Ausgangskomponenten des Mörtels) be-



(1) Verzahnung, (2) Adhäsion

**Abbildung 1.3:** Kraftübertragung im Dübelssystem

reits unter einer Dauerlast von ca. 5% der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  ein Versagen der Systeme innerhalb weniger hundert Versuchsstunden auftreten kann. Das schnellhärtende System wies damit, selbst unter der Einwirkung äußerst geringer dauerhafter zentrischer Zuglasten, kein baupraktisch relevantes Tragvermögen auf. Im Gegensatz hierzu war ein ähnlich ausgeprägtes Verhalten bei der Standardvariante des Mörtels, ausgestattet mit der entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassung, nicht zu beobachten. Der Vorfall im Jahr 2006 liefert somit zunächst keinen Anlass, die Anwendung chemischer Befestigungssysteme unter dauerhaft wirkenden Lasten grundsätzlich in Frage zu stellen. Allerdings muss er als Anlass dienen, den Fokus bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von Verbunddübelssystemen verstärkt auf die Dauerhaftigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung zu richten.

Zu diesem Zweck wurde 2007 am IWB ein Forschungsvorhaben initiiert, das die Entwicklung der theoretischen und versuchstechnischen Basis hierfür zum Ziel hatte. Dabei sollte die bisherige Vorgehensweise für die Zulassung von Verbunddübelssystemen gemäß aktuell gültigen Regelwerken (hier der entsprechenden „European Technical Approval Guideline“ ETAG 001 und der „Acceptance Criteria“ des ICC-ES, AC 308) auf den Prüfstand gestellt und auf ihre Aussagequalität in Bezug auf die Dauerhaftigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung neu bewertet werden. Hierzu sollte ein alternatives Verfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen entwickelt und validiert werden sowie im Anschluss, auf Basis dieses Verfahrens, eine Überprüfung der sich auf dem Markt befindlichen, zugelassenen Dübelssysteme erfolgen.

Der Umstand, dass Verbunddübelssysteme seit vielen Jahren bereits millionenfach angewendet wurden und voraussichtlich in weiter ansteigender Zahl künftig angewendet werden dürften, verdeutlicht die Dringlichkeit einer zeitnahen und schnellen Überprüfung. Rückrufaktionen, wie sie in den letzten Jahren, beispielsweise in der Automobil- oder Spielzugindustrie, beinahe regelmäßig erfolgten, sind aus naheliegenden Gründen hier nicht möglich. Selbst bei Bekanntwerden einer konkreten Schwäche hinsichtlich der Dauerhaftigkeit eines Verbunddübelsystems dürfte es allenfalls möglich sein, einen nur sehr geringen Teil der betroffenen Installationen ausfindig zu machen und zu ertüchtigen. Das Ziel muss daher sein, derartige Systeme ggf. schnellstmöglich zu identifizieren und Neuinstallationen hiervon zu verhindern. Dieser Anforderung war bei der Entwicklung des neuen Prüfverfahrens vorrangig Rechnung zu tragen.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Verbunddübelssysteme unter kurzzeitiger Lasteinwirkung

Die Eigenschaften von Verbunddübelssystemen unter kurzzeitiger Belastung (Einzeldübel und Gruppenbefestigung) sind in [3], [7] und [8] ausführlich behandelt. Die Arbeit von APPL aus dem Jahr 2009 stellt diesbezüglich zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Arbeit den aktuellen Wissensstand dar. Sofern für das Verständnis vorliegender Arbeit relevant, wird an entsprechender Stelle nochmals konkret im Detail darauf verwiesen.

### 2.2 Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung

Hinsichtlich der Eigenschaften von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung, speziell hinsichtlich der Beurteilung ihrer Dauerhaftigkeit unter hoher, dauerhafter zentrischer Lasteinwirkung, existierten zu Beginn des hier durchgeführten Forschungsvorhabens nahezu keine öffentlich zugänglichen Daten oder Informationen.

Allerdings beinhalten die Vorschriften aktuell gültiger europäischer und amerikanischer bauaufsichtlicher Zulassungsverfahren für Verbunddübel (ETAG 001 und AC 308) diesbezüglich Versuchsreihen, deren Ergebnisse eine derartige Beurteilung unter statisch einwirkender Dauerbelastung ermöglichen sollen. Bauaufsichtliche Zulassungen sind für Dübelssysteme zwingend dann erforderlich, wenn deren Versagen eine Gefahr für Leib und Leben bedeuten kann, beispielsweise bei abgehängten Tunneldecken. Deren Gültigkeit ist auf die konkret überprüften Anwendungsfälle beschränkt (z.B. Anwendung nur im ungerissenen Beton, unter nicht dynamischer Lasteinwirkung etc.). Ziel der Zulassungsverfahren ist es, die Tragwiderstände für das gesamte Spektrum an möglichen Lasteinwirkungen (z.B. Zugbelastung, Querbelastung, diverse kombinierte Lasteinwirkungen, etc.) zu ermitteln und hieraus charakteristische Werte für die zugehörigen Bemessungskonzepte abzuleiten. Sie bilden somit die Grundlage für die Bemessungspraxis.

Für den europäischen Raum sind die Anforderungen, die von den Dübelssystemen dabei zu erfüllen sind, in den Prüfvorschriften (European Technical Approval Guideline, ETAG) der EOTA (European Organisation for Technical Approvals) festgelegt. Das hierfür maßgebende Dokument ist die ETAG 001 [9, 10, 11, 12]. Für den amerikanischen Raum finden sich vergleichbare Prüfvorschriften im Regelwerk des ICC-ES in Form der „Acceptance Criteria“, hier im Weiteren kurz „AC“ genannt. Das maßgebende Dokument ist der AC 308 [13]. Art und Umfang der erforderlichen Versuchsreihen nach ETAG und AC gleichen sich diesbezüglich in weiten Teilen.

In Abhängigkeit vom Dübeltyp und dessen Einsatzzweck bzw. dessen Einsatzbedingungen definieren diese Regelwerke detailliert die einzuhaltenden Randbedingungen bei der Durchführung von Zulassungsversuchen. Darüber hinaus enthalten sie vielfach Beispiele zu Versuchseinrichtungen und Details zur Versuchsdurchführung, deren Anwendung zum Teil jedoch nicht zwingend vorgeschrieben ist. Zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Arbeit stellen die annähernd identischen Verfahren nach ETAG und AC im Hinblick auf die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübeln unter dauerhafter zentrischer Zuglasteinwirkung den aktuellen Stand der Technik dar. Das Verfahren wird nachfolgend am Beispiel der ETAG erläutert. Die hierbei aufgezeigten Unzulänglichkeiten dienen als Anlass zur Entwicklung eines Prüfverfahrens, das vollständig auf einem alternativen Prüfkonzept beruht. Die Beschreibung und Validierung dieses Prüfverfahrens stellt den Kern der vorliegenden Arbeit dar.

### 2.3 Beurteilung der Dauerhaftigkeit nach ETAG 001, Teil 5 bzw. AC 308

Sämtliche nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die ETAG 001, Teil 5, in der überarbeiteten Fassung von 2008 bzw. den AC 308, in der Erstausgabe von 2006.

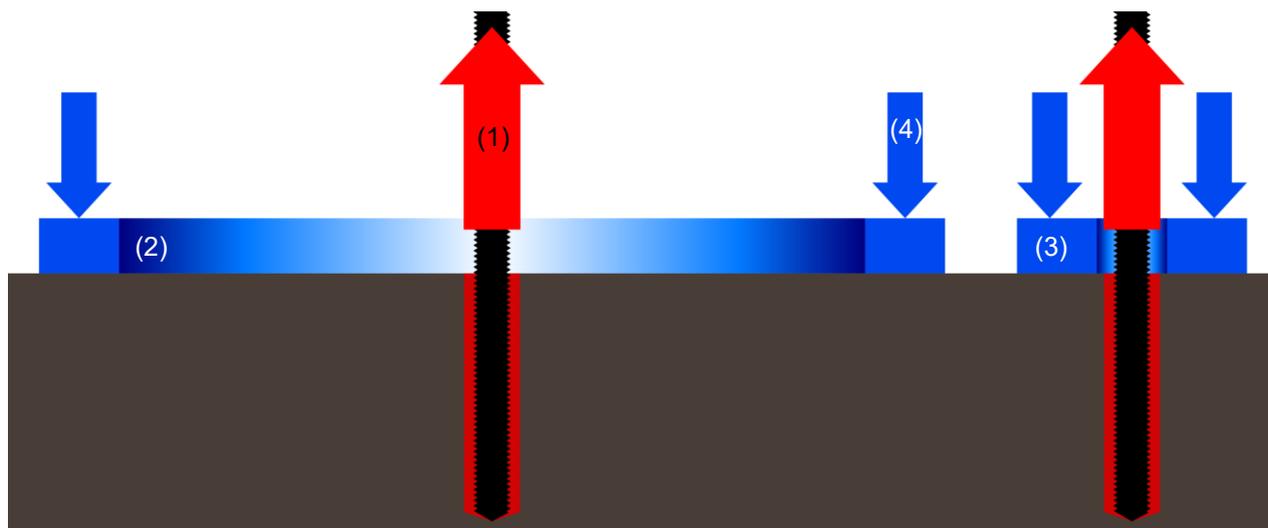
Während der Begriff „Dauerhaftigkeit“ im Bereich der Stahldübel vorrangig im Sinne der Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer Einwirkung aggressiver Medien genutzt wird, beispielsweise bei chloridinduzierter Korrosion, steht bei Kunststoffdübeln und Verbunddübeln deren zeitabhängiger Tragwiderstand im Mittelpunkt, insbesondere unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung. Grund hierfür ist, dass der Lastabtrag eines Verbunddübels in den Ankergrund mittelbar über die Mörtelschale erfolgt, eine Komponente aus Kunststoff, die ein ausgeprägt zeitabhängiges mechanisches Verhalten aufweist [14]. Sie stellt somit hinsichtlich der Dauerhaftigkeit unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung die maßgebliche Systemkomponente dar. Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen beschränken sich auf die Dauerhaftigkeit unter mechanischer Krafteinwirkung. Die Dauerhaftigkeit unter chemischen oder physikalischen Einflüssen, z.B. allgemeinen Umwelteinflüssen, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Die Zulassungsversuche nach ETAG bzw. AC zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit eines Verbunddübel systems unter dauerhafter Lasteinwirkung haben nicht die konkrete Ermittlung eines zeitabhängigen Tragverhaltens zum Ziel. So werden beispielsweise keine charakteristischen zeitabhängigen Tragwiderstände ermittelt (mögliche Basis für Bemessungskonzepte). Vielmehr soll sichergestellt werden, dass innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer eines Dübels, unter der dauerhaften Einwirkung der maximal zulässigen Gebrauchslasten, kein Versagen zu erwarten ist. Als Bezugsgröße dient hierbei die zeitabhängige Dübelverschiebung unter Last. Das Verfahren beruht dabei auf der Grundannahme, dass eine Korrelation zwischen der am System auftretenden Dübelverschiebung und einem (nicht näher spezifizierten) inneren Schädigungsgrad des Systems besteht. So wird das Versagen eines Dübel systems generell gleichgesetzt mit dem Erreichen eines bestimmten Grenzverschiebungszustandes, unabhängig davon, ob dieser unter kurzzeitiger, zentrischer Zuglasteinwirkung sofort erreicht wird oder erst nach längerer Zeit infolge zeitabhängiger Verschiebungsvorgänge unter der Einwirkung einer dauerhaften Lasteinwirkung. Bezüglich des Versagens wird dabei zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Mechanismen unterschieden [15]:

**Adhäsionsversagen:** Versagen der Klebung entlang der Grenzfläche zwischen Verbundmörtel und Beton (Versagensmodus „P<sub>M</sub>“ nach ETAG)

**Kohäsionsversagen:** Versagen des Verbundmörtels selbst, in der Regel durch das Abscheren der Mörtelzähne entlang der Einhüllenden der Gewindestange (Versagensmodus „P“ nach ETAG)

Eine mögliche dritte Versagensart unter Beteiligung eines Betonausbruchs, ggf. in Kombination mit Adhäsions- und/oder Kohäsionsversagen, kann hier nicht auftreten aufgrund einer speziellen Weise der Abstützung aller Abstützkräfte aus der aufgebrachten Prüflast. Es handelt sich hierbei um die sogenannte „enge Abstützung“. Sie bildet das Gegenstück zur „weiten Abstützung“. Die Prinzipien beider Abstützalternativen sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Die weite Abstützung (links im Schnitt dargestellt) stützt die Abstützkräfte (blau) der Versuchsapparatur in einem solchen Abstand zum Dübel ab, dass sich ein Betonausbruch ungestört ausbilden kann (Innendurchmesser des Abstützrings min.  $4 h_{ef}$ ). Die enge Abstützung (rechts im Schnitt dargestellt) verhindert einen Betonausbruch vollständig, sodass die ermittelten Tragfähigkeitswerte nur unwesentlich von den Festigkeitseigenschaften des Betons abhängen.

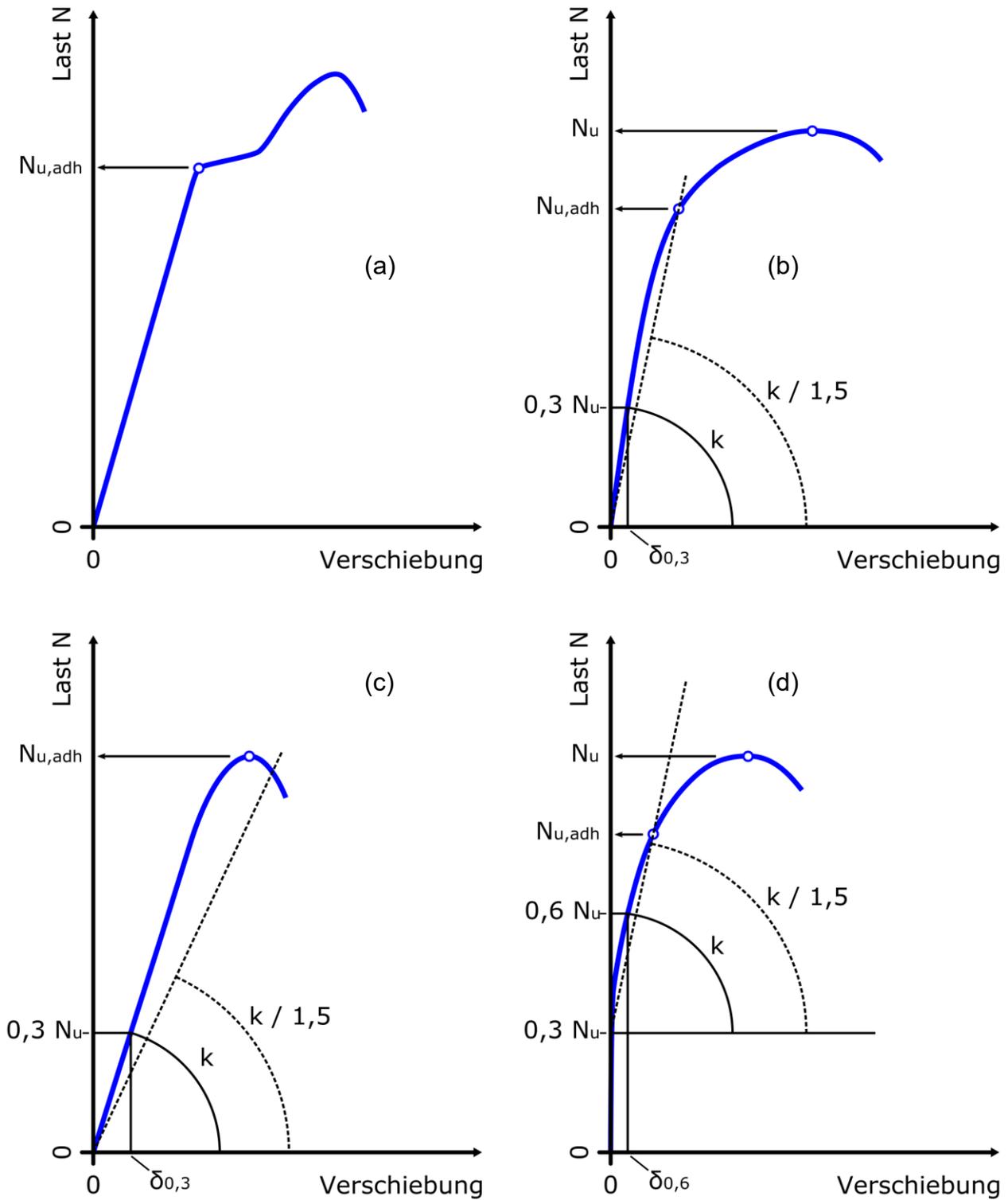


(1) Prüflast, Schnitt durch (2) weites und (3) enges Abstützelement, (4) Abstützlasterlast

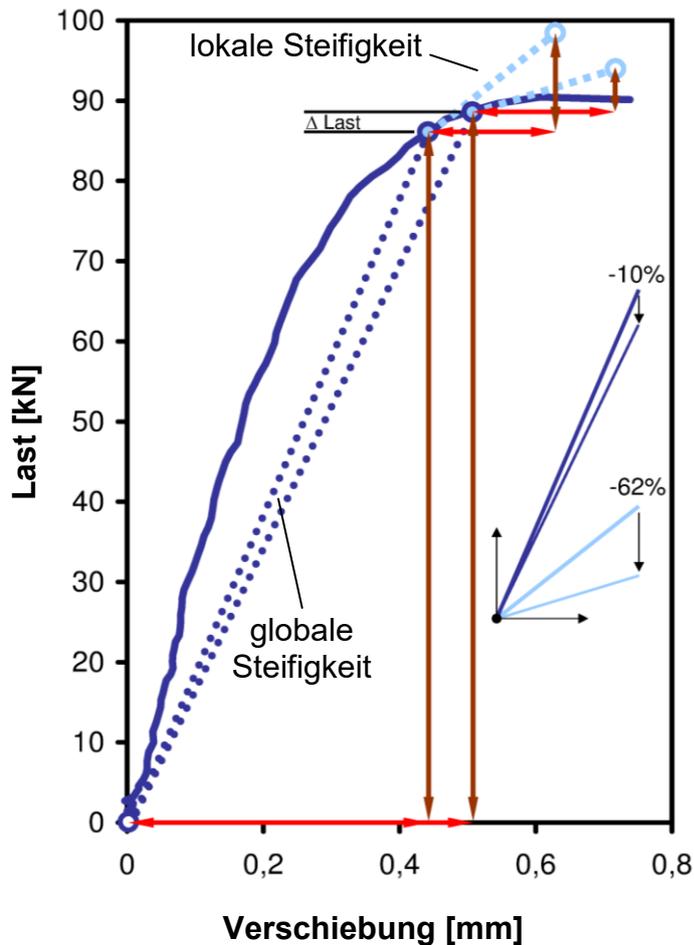
**Abbildung 2.1:** schematische Darstellung einer weiten (links) und engen Abstützung

Aus der hierbei angenommenen Korrelation zwischen Verschiebungszustand und dem Schädigungsgrad des Systems folgt die Annahme, dass sich die für Langzeitversuche als maßgeblich betrachtete Grenzverschiebung aus den Last-Verschiebungskurven kurzzeitiger, zentrischer Bruchlastversuche mit enger Abstützung bestimmen lässt [16, 17]. Voraussetzung hierfür ist, dass sich der Versagenszeitpunkt und somit die zugehörige Versagensverschiebung in den Verschiebungskurven eindeutig identifizieren lässt. Abbildung 2.2 zeigt die vier in der ETAG 001, Teil 5, beispielhaft aufgeführten Verschiebungscharakteristika. Für Gewindestangen als Verankerungselemente zeigt die Erfahrung, dass diese vier Fälle tatsächlich die üblicherweise auftretenden Verschiebungscharakteristika beschreiben.

Ein eindeutiger Fall ist in Abbildung (a) dargestellt. Nach einem annähernd linear-elastischen Anfangsverhalten erfolgt ein plötzlicher Steifigkeitsabfall. Es wird angenommen, dass sich das Dübelssystem auf diesem Lastniveau entlang der Kontaktfläche zwischen Verbundmörtel und Beton durch das Versagen der Klebung (Adhäsionsversagen) vom Versuchskörper löst. Entsprechend ist das Lastniveau mit  $N_{u,adh}$  bezeichnet. Nach einer Phase des Schlupfes setzt eine Wiederversteifung des Systems ein, die in der Regel auf eine Aktivierung eines Formschlusses zurückzuführen ist, der durch Bohrlochunebenheiten verursacht wird. Das endgültige Versagen tritt ein, wenn die einwirkende Last den Tragwiderstand aus Formschluss final überwindet. Festzuhalten ist, dass das maßgebliche Systemversagen jedoch bereits mit dem Verlust der Adhäsion erfolgt ist. Ein weniger eindeutiges Verhalten zeigt sich in den Fällen, die in Abbildung (b) bis (d) dargestellt sind. Hier findet kein plötzlicher Steifigkeitsabfall statt. Dieser schreitet stattdessen bis zum Versagen über einen mehr oder weniger ausgedehnten Lastbereich kontinuierlich fort. Der Zeitpunkt des Adhäsionsversagens  $N_{u,adh}$  ist gegenüber Beispiel (a) nicht klar definiert. Zur Bewertung der Fälle nach Abbildung (b) bis (d) wurde daher ein rechnerisches Versagenskriterium eingeführt, das die Ableitung einer rechnerischen Adhäsionsversagenslast auf Basis einer einfachen geometrischen Konstruktion ermöglicht. Es beruht auf einer Begrenzung des Verlustes der resultierenden Systemsteifigkeit, betrachtet über den gesamten Belastungsvorgang (globale Definition der Steifigkeit). Es begrenzt folglich nicht den Fortschritt des Steifigkeitsverlustes auf einem bestimmten Lastniveau (lokale Definition der Steifigkeit). Aus Diagramm 2.1 ist ersichtlich, dass die globale Steifigkeit im dargestellten Fall immer größer ist als die lokale Steifigkeit.



**Abbildung 2.2:** Verschiebungscharakteristika (a) bis (d) nach ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.1.1 für Verbunddübelssysteme unter zentrischer Zugbelastung bei Anwendung einer engen Abstützung



**Diagramm 2.1:** Definition der lokalen und der globalen Steifigkeit eines Verbunddübel-systems

Als Grenzverlust der resultierenden Systemsteifigkeit wurde ein Abfall um 33,3 % definiert. Es handelt sich hierbei um eine willkürliche Festlegung, da sie nicht auf Grundlage mechanischer Prozesse abgeleitet ist. Sie soll einen Belastungszustand kennzeichnen, in welchem die Steifigkeit des Dübel-systems derart abgefallen ist, dass ein Versagen der Adhäsion unterstellt werden muss. Ein Blick auf Abbildung (c) macht dabei deutlich, dass es sich um eine sehr vereinfachte rechnerische Annahme handelt. Die Duktilität des hier abgebildeten Systems ist innerhalb des Lastbereichs, in dem ein kontinuierlicher Steifigkeitsabfall erfolgt, offensichtlich so gering, dass das rechnerische Adhäsionsversagen im Nachbruchbereich der Kurve bestimmt würde, also erst nach Überschreiten der Kurzzeitfestigkeit  $N_u$ . Die Adhäsionsversagenlast muss hier notgedrungen auf  $N_u$  begrenzt werden, was eine Inkonsistenz innerhalb des Verfahrens darstellt. Dies verdeutlicht, dass die Brauchbarkeit der Ergebnisse dieser Vorgehensweise konkret vom jeweiligen Systemverhalten abhängt, da dieses offensichtlich maßgeblichen Einfluss darauf hat, ob sich der Zeitpunkt des Adhäsionsversagens überhaupt sinnvoll eingrenzen lässt.

Unter der nach ETAG und AC getroffenen Annahme einer Korrelation zwischen Verschiebung und Schädigungsgrad kann die Lebensdauer eines Verbunddübel-systems unter dauerhafter Lasteinwirkung auf einfache Weise ermitteln werden, wenn sowohl die maßgebliche Grenzverschiebung als auch die zur jeweiligen Dauerlast gehörige Verschiebungscharakteristik bekannt und mathematisch vorhersagbar (extrapolierbar) sind. Als Verschiebungscharakteristik wird hierbei nach ETAG und AC ein einheitlicher Ansatz in Form einer Potenzfunktion zugrunde gelegt, unabhängig vom verwendeten Verbunddübel-system:

$$s(t) = s_0 + a \cdot t^b, \quad (2.1)$$

Als Parameter dienen die Versuchsdauer  $t$ , die Anfangsverschiebung  $s_0$  unter der aufgetragenen Dauerlast zum Zeitpunkt  $t = 0$  und die Konstanten  $a$  und  $b$ , die mittels einer Regressionsanalyse der während des Dauerlastversuchs gemessenen Verschiebungskurve ermittelt werden. Dieser Ansatz beruht auf einer Beschreibung des Kriechverhaltens von Kunststoffen unter einachsiger Zugbelastung nach FINDLEY [18]. Er ist folglich nicht explizit zur Beschreibung der Verschiebungscharakteristik ganzer Verbunddübel-systeme abgeleitet bzw. formuliert worden und diesbezüglich auch nicht verifiziert. Den-

noch bildet er derzeit die mathematische Grundlage zur Beschreibung sämtlicher Dübelverschiebungen unter Dauerlast in den aktuell gültigen Prüfvorschriften.

### 2.3.1 Durchführung von Dauerlastversuche nach ETAG

Nachfolgend ist die Durchführung der Versuche nach ETAG sowie deren Auswertung erläutert. Da die Verfahren nach ETAG bzw. AC einander weitgehend ähnlich sind, wird hier nicht näher auf das Verfahren nach AC eingegangen. Weiter wird an dieser Stelle nur dann auf spezielle Details der Normung eingegangen, wenn es zum Verständnis des Verfahrens sowie dessen Bewertung erforderlich ist. Für eine erschöpfende Beschreibung wird an dieser Stelle auf den relevanten Teil 5 sowie die Anhänge A und C der ETAG 001 verwiesen.

#### 2.3.1.1 Prüftemperatur nach ETAG

Dauerlastversuche sind im Rahmen von Zulassungsverfahren sowohl bei Normaltemperatur ( $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , „Normal Ambient Temperature“ nach ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 3.2.1) als auch bei erhöhter sowie verminderter Prüftemperatur durchzuführen. Hierzu ist vorab vom Hersteller aus drei möglichen Optionen ein Temperaturbereich wie folgt zu wählen (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 4.1.1.2):

- a) -  $40^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$ , maximal zulässige Temperatur bei Dauereinwirkung:  $+24^{\circ}\text{C}$
- b) -  $40^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ , maximal zulässige Temperatur bei Dauereinwirkung:  $+50^{\circ}\text{C}$
- c) -  $40^{\circ}\text{C}$  bis  $T_1$ , mit  $T_1 \geq +40^{\circ}\text{C}$ , maximal zulässige Temperatur bei Dauereinwirkung:  $0,6 T_1 - 1,0 T_1$

Die Grenzen dieser drei Temperaturbereiche stellen hierbei die oberen und unteren Temperaturlimits dar, für welche die korrekte Funktion eines Dübel-systems mit der geforderten Sicherheit gegeben sein muss. Hierzu muss die Standsicherheit gewährleistet sein (Grenzzustand der Tragfähigkeit) sowie die Vermeidung unzulässiger Verformungen (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit). Dabei wird unterschieden zwischen kurzzeitiger Temperatureinwirkung und dauerhafter Temperatureinwirkung. Das Attribut „kurzzeitig“ kennzeichnet hierbei eine Einwirkungsdauer, wie sie üblicherweise während eines gewöhnlichen Tag/Nacht-Zyklus zu erwarten ist, also wenige Stunden in Folge. Das Attribut „dauerhaft“ kennzeichnet demgegenüber eine unbestimmt länger andauernde Einwirkung bis hin zu einem permanenten Auftreten (z.B. im unmittelbaren Einwirkungs-bereich von Heizungsinstallationen im Dauerbetrieb). Während die Kategorie 1 und 2 jeweils durch einen fest vorgegebenen Temperaturbereich gekennzeichnet ist, kann der Hersteller in Kategorie 3 die Temperaturobergrenze  $T_1$  für den zulässigen Temperaturbereich frei wählen und unter Berücksichtigung der von ihm unterstellten Leistungsfähigkeit seines Produktes anpassen.

#### 2.3.1.2 Prüflast nach ETAG

Die Prüflast wird auf Basis des charakteristischen Widerstands  $N_{\text{RK},p}$  des Dübels ermittelt. Dieser bestimmt sich gemäß ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.2.2.1 zu

$$N_{\text{RK},p} = N_{\text{RK}} = N_{\text{RK},0} \cdot \min(\min(\alpha / \text{req. } \alpha); \min(\alpha_1 / \text{req. } \alpha)) \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \quad (2.2)$$

Der erforderliche charakteristische Widerstand  $N_{\text{RK},0}$  ist hierbei vorab als 5%-Fraktilwert der Bruchlasten üblicher zentrischer Zugversuchen mit weiter Abstützung zu ermitteln, die mit Normalbeton der Festigkeitsklasse C20/25 bei Normaltemperatur ( $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) durchzuführen sind (Details hierzu, siehe ETAG 001, Teil 1, Abschnitt 6.1.2.2.1 (a)). Im Nachgang ist die Berücksichtigung weiterer Aspekte erforderlich, die zu einer Abminde-

ung des Grundwertes von  $N_{RK,0}$  führen. Das Ergebnis dieser Abminderung ist der maßgebliche Wert  $N_{RK,p}$ . Mögliche Gründe für eine Abminderung sind für Verbunddübel in ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.2.2.1(b) definiert. Die Abminderung erfolgt mittels der Abminderungsfaktoren  $\alpha_i$ . Auf eine konkrete Ableitung der  $\alpha$ -Faktoren wird an dieser Stelle verzichtet, da sie nicht zum Verständnis des Verfahrens beiträgt. Details sind direkt der ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.1.1 und 6.1.2.2.1 zu entnehmen. So wird sich nachfolgend auf die Beschreibung der Funktionen der einzelnen Abminderungsfaktoren beschränkt:

1.  $\alpha$  (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.1.1, Gleichung 6.13)

Faktor  $\alpha$  berücksichtigt die Abnahme der Tragfähigkeit unter den Sonderbedingungen spezieller Eignungstests (z.B. feuchtes Bohrloch, verminderte Reinigung, etc.), bezogen auf Referenzversuche unter Standardbedingungen. Maßgeblich ist hierbei der kleinste sich ergebende Wert ( $\min(\alpha / \text{req. } \alpha)$ ) aus sämtlichen zu berücksichtigenden Sonderbedingungen.

2.  $\alpha_1$  (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.1.1, Gleichung 6.12)

Faktor  $\alpha_1$  berücksichtigt den Umstand, dass bei Verbunddübeln das Systemversagen häufig bereits vor Erreichen der Höchstlast  $N_u$  in Form eines Adhäsionsversagens (Versagen der Klebung) angenommen werden muss. Die sich dennoch anschließende Laststeigerung bis zum Bruch kann hier lediglich auf Reibung und Klemmeffekte zurückgeführt werden. Sie ist demnach nicht definiert und somit zu vernachlässigen. Maßgeblich ist hierbei der kleinste sich ergebende Wert ( $\min(\alpha / \text{req. } \alpha)$ ) aus sämtlichen durchzuführenden Eignungsversuchen („Suitability Tests“) und Versuchen zur Bestimmung der zulässigen Anwendungsbedingungen („Admissible Service Conditions“).

3.  $\alpha_2$  (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.2.1, Gleichung 6.15)

Faktor  $\alpha_2$  berücksichtigt die Abnahme der Tragfähigkeit bei Einwirkung der maximal zulässigen Temperatur während einer dauerhaften Einwirkung gegenüber den Referenzversuchen (unter Standardbedingungen nach Herstellerangaben gesetzt, geprüft bei Normaltemperatur).

4.  $\alpha_3$  (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.2.1, Gleichung 6.16)

Faktor  $\alpha_3$  berücksichtigt die Abnahme der Tragfähigkeit bei Einwirkung der maximal zulässigen Temperatur für eine kurzzeitige Einwirkungsdauer gegenüber den Referenzversuchen (unter Standardbedingungen nach Herstellerangaben gesetzt, geprüft bei Normaltemperatur).

5.  $\alpha_4$  (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.3, Gleichung 6.22)

Faktor  $\alpha_4$  berücksichtigt die Abnahme der maximalen Verbundspannung im Falle einer Schwächung des Verbundmörtels durch Einwirkung alkalischer Medien oder schwefelhaltiger Atmosphäre.

Der charakteristische Widerstand  $N_{RK,p}$  berücksichtigt demnach bereits die maßgeblichen traglastmindernden Einflüsse, welche auf Verbunddübelssysteme einwirken können. Aus ihm wird, gemäß ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 5.1.2.5, die für die Prüfung der Dauerhaftigkeit aufzubringende Dauerlast  $N_{sust}$  abgeleitet, differenziert nach Dauerlastversuchen unter Normaltemperatur (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 5.1.2.5, Gleichung 5.6a):

$$N_{sust} = 1,1 \cdot N_{RK,p} / (\gamma_{MC} \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4) \quad (2.3)$$

sowie unter maximal zulässiger Temperatur bei dauerhafter Einwirkung (ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 5.1.2.5, Gleichung 5.6b):

$$N_{\text{sust}} = 1,1 \cdot N_{\text{RK,p}} / (\gamma_{\text{MC}} \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4) \quad (2.4)$$

Zu beachten ist, dass bei der Bestimmung der Dauerlast  $N_{\text{sust}}$  die Abminderungsfaktoren  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  (unter Normaltemperatur) bzw.  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  (unter erhöhter Temperatur) wieder aus dem charakteristischen Widerstand  $N_{\text{RK,p}}$  eliminiert werden. Die Abminderung aus den Eignungsversuchen in Form des Faktors  $\alpha$  bleibt hingegen erhalten. Gleiches gilt für den Faktor  $\alpha_1$ , durch welchen in den Referenzversuchen die Abweichung der maßgeblichen Versagenslast (Adhäsionsversagenslast) von der erzielten absoluten Höchstlast  $N_u$  berücksichtigt ist. Mit einem beispielhaften Wert für den Variationskoeffizienten von  $v = 10\%$  bei zentrischen Zugversuchen mit weiter Abstützung folgt in Anlehnung an ETAG 001, Teil 1, Abschnitt 6.0, Gleichung 6.0, der 5%-Fraktilwert  $N_{\text{RK,0}}$  aus der mittleren Versagenslast  $N_{u,m}$  zu

$$N_{\text{RK,0}} = N_{u,m} (1 - k_S \cdot v) = 0,66 \cdot N_{u,m} \quad (2.5)$$

mit  $k_S = 3,40$ , für eine übliche Anzahl von 5 durchgeführten Versuchen.

Mit der Unterstellung einer guten Montagesicherheit des Dübelsystems ergibt sich aus ETAG 001, Anhang C, Abschnitt 3.2.3.1 ein Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_{\text{MC}} = 1,8 \quad (2.6)$$

Aus Gleichung 2.3 bzw. 2.4 folgt somit

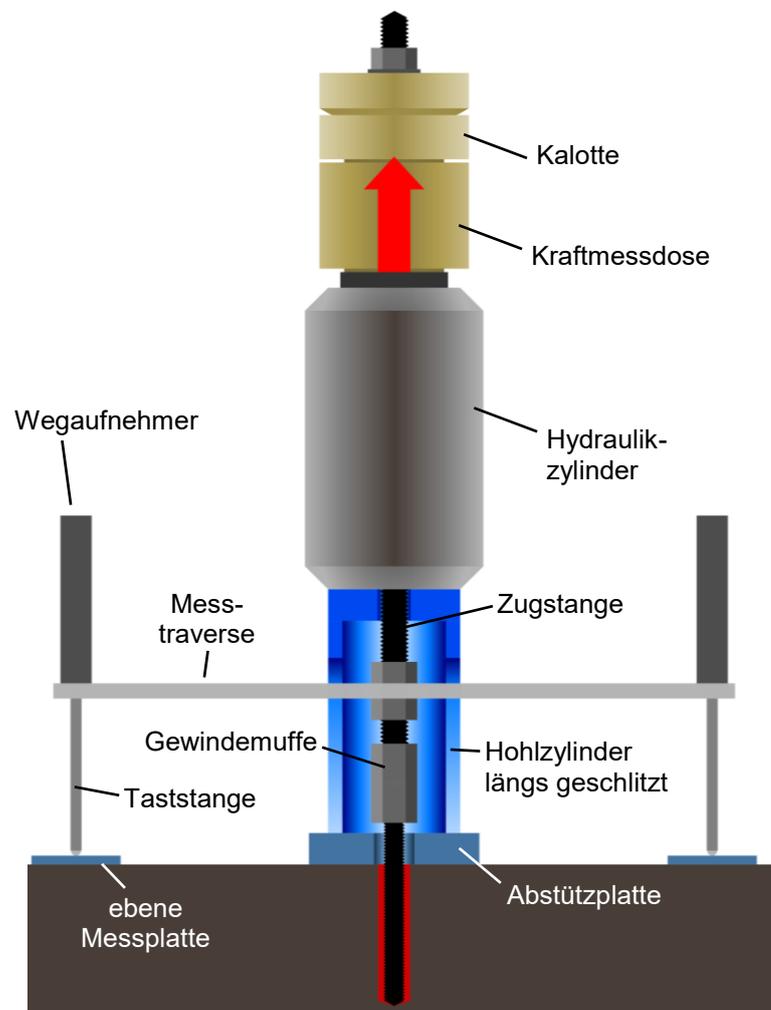
$$N_{\text{sust}} = 1,1 \cdot (0,66 \cdot N_{u,m}) / \gamma_{\text{MC}} = 0,4 \cdot N_{u,m} \quad (2.7)$$

Im vorliegenden Beispiel beträgt die anzusetzende Dauerlast im Dauerlastversuch nach ETAG demnach ca. 40% der mittleren Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ .

### 2.3.1.3 Versuchssetup nach ETAG

Unter Anwendung der ermittelten Randbedingungen (Versuchstemperatur und Versuchslast) erfolgt die Durchführung der Versuche unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung. Das Versuchssetup entspricht hierbei demjenigen der Versuche zu Bestimmung des Versagenskriteriums in Form der Versagensverschiebung  $s_{\text{adh}}$ , entsprechend ist ebenso eine enge Abstützung anzuwenden. Idealerweise handelt es sich hierbei sogar um den geometrisch identischen Versuchsaufbau unter Anwendung derselben Messvorrichtung, um unterschiedliche Einflüsse aus der Versuchstechnik auf das Ergebnis vermeiden oder zumindest in derselben Weise bewerten und ggf. filtern zu können.

ETAG bzw. AC enthalten nahezu identische Beispiele zur Ausführung des Versuchsaufbaus und zur Installation der Messvorrichtungen (vgl. ETAG 001, Teil 5, Abbildung 5.1 und 5.2). Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft eine Ausführung, wie sie in der ETAG vorgeschlagen ist. Die Koppelung der Zugstange an den Dübel erfolgt hierbei unmittelbar mittels einer Gewindemuffe. Das System der Wegmessung ist an der Zugstange befestigt und tastet auf den Beton. Es ist ersichtlich, dass hierbei keine direkte Messung der Verschiebung des Dübelkopfes relativ zur Betonoberfläche erfolgt. Der gemessene Weg enthält Anteile aus der Dehnung der Zugstange, der Gewindemuffe sowie aus Gewindeschlupf. Die dargestellte Art der Befestigung der Messvorrichtung führt zu erheblichen Messfehlern, die unbedingt zu berücksichtigen sind. Auf diese Problematik wird in diesem Kapitel im Detail eingegangen.



**Abbildung 2.3:** schematische Darstellung des Versuchsaufbaus nach ETAG

#### 2.3.1.4 Versuchsdurchführung nach ETAG

Nach der Installation des Versuchsaufbaus und der Instrumentierung mit Wegmessern sowie der meist nur temporär vorgesehenen Kraftmessvorrichtung erfolgt nach ETAG unmittelbar die Belastung mit der Prüfdauerlast  $N_{\text{sust}}$  unter Normaltemperatur. Erst im Anschluss an die Lastaufbringung erfolgt der Aufheizvorgang auf die jeweilige Prüftemperatur. Von diesem Vorgehen weicht der AC entscheidend ab: Hier erfolgt nach der Installation zuerst der Aufheizvorgang. Im Anschluss wird eine Vorlast von maximal 5% aufgebracht, um gegebenenfalls vorhandenes Spiel in der Versuchsvorrichtung zu eliminieren. Erst dann erfolgt die Belastung auf die volle Prüfdauerlast  $N_{\text{sust}}$ . Die Messung der Dübelverschiebung beginnt somit unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorlast im bereits aufgeheizten Zustand, also nach der Eliminierung des ggf. im System vorhandenen Spiels. Diagramm 2.2 zeigt sinnbildlich je eine typische Verschiebungskurve unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung nach ETAG und AC. Gemäß Vorgabe des AC findet die Belastung nach dem vollständigen Aufheizen statt (obere Kurve). Der Aufheizvorgang zeichnet sich in der Verschiebungskurve somit nicht ab. Anders bei der Durchführung nach ETAG. Hier wird zuerst belastet und anschließend aufgeheizt. Der Aufheizvorgang zeichnet sich in der Verschiebungskurve vollständig ab und erschwert damit die Beurteilung des Verschiebungsverhaltens.

Die Auswertungen nach ETAG sind diesbezüglich kritisch zu hinterfragen, insbesondere wenn Verschiebungswerte der ersten ca. 100 Versuchsstunden zur Auswertung herangezogen werden sollen.

### 2.3.1.5 Auswertung nach ETAG

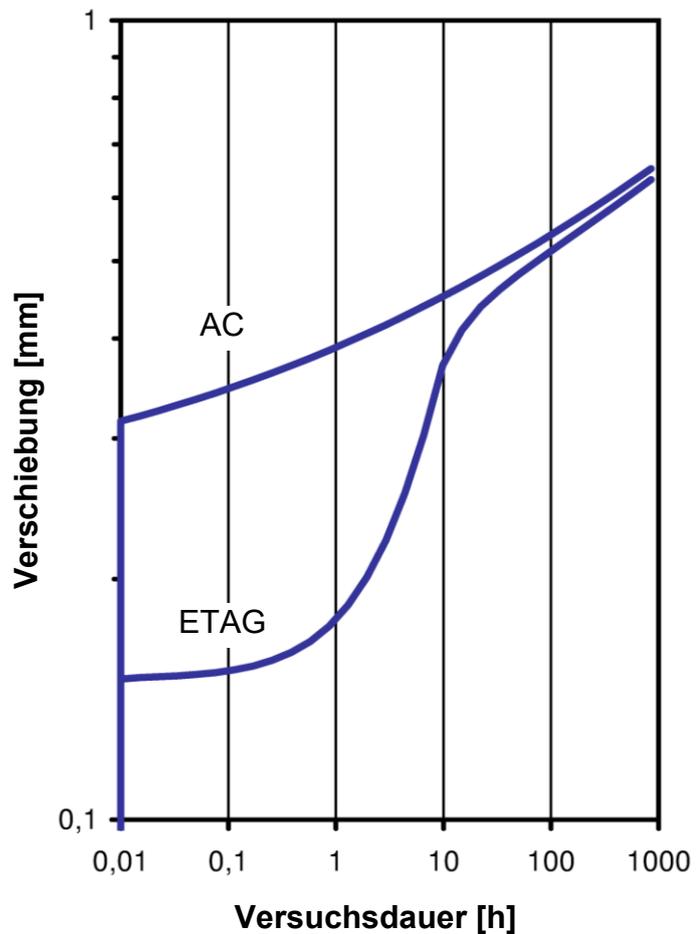
Diagramm 2.3 zeigt exemplarisch die Ermittlung des rechnerischen Adhäsionsversagens nach ETAG 001, Teil 5, Abschnitt 6.1.1.1. Die Auswertung der resultierenden Messergebnisse erfolgt gemäß ETAG in folgenden Schritten:

**Schritt 1:** Bestimmung des rechnerischen Adhäsionsversagens aus den kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen mit enger Abstützung:

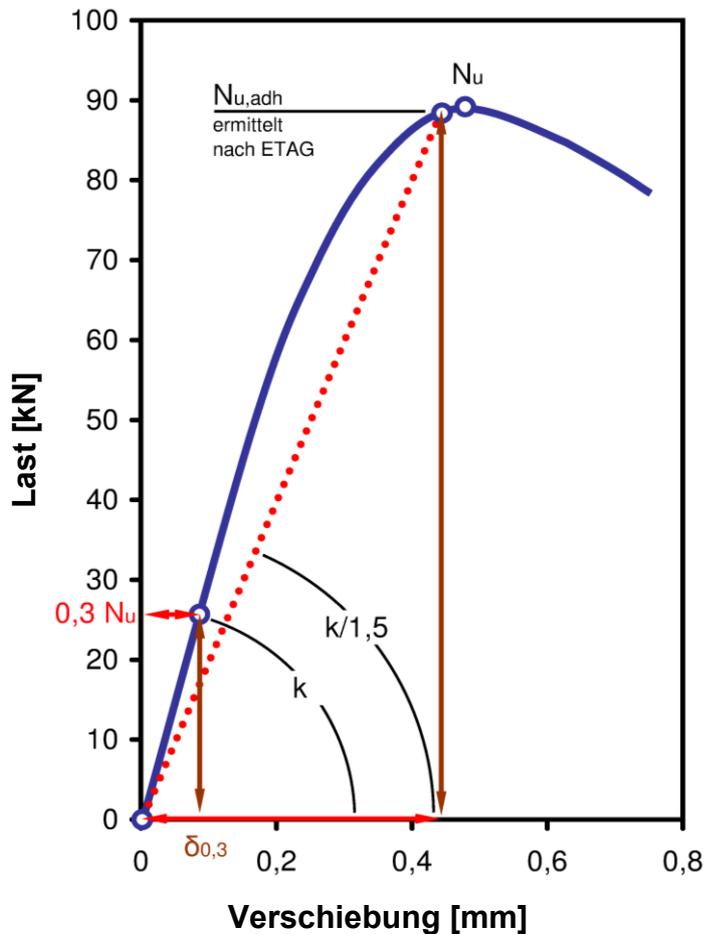
- a) Bestimmung der Anfangssteigung  $k$
- b) Auftragen der verminderten Steigung  $k/1,5$  und Ermittlung der Adhäsionsversagenslast  $N_{u,adh}$  sowie der zugehörigen Verschiebung  $s_{u,adh}$  aus dem Schnittpunkt mit der Verschiebungskurve

**Schritt 2:** Extrapolation der gemessenen Verschiebungskurve unter Annahme eines Verschiebungsverhaltens nach FINDLEY bis zu der in Schritt 1 ermittelten Verschiebung bei Adhäsionsversagen  $s_{u,adh}$  und Ablesen der zugehörigen extrapolierten Standzeit

**Schritt 3:** Abgleich der in Schritt 2 durch Extrapolation ermittelten Standzeit mit der geforderten Standzeit (Normaltemperatur: 50 Jahre, maximal zulässige Temperatur bei Dauereinwirkung: 10 Jahre)



**Diagramm 2.2:** Verschiebungskurven in Abhängigkeit vom Aufheizzeitpunkt



**Diagramm 2.3:** rechnerische Ermittlung der Last für den Zeitpunkt des Adhäsionsversagens ( $N_{u,adh}$ ) nach ETAG bzw. AC

## 2.4 Unzulänglichkeiten des Verfahrens nach ETAG und AC

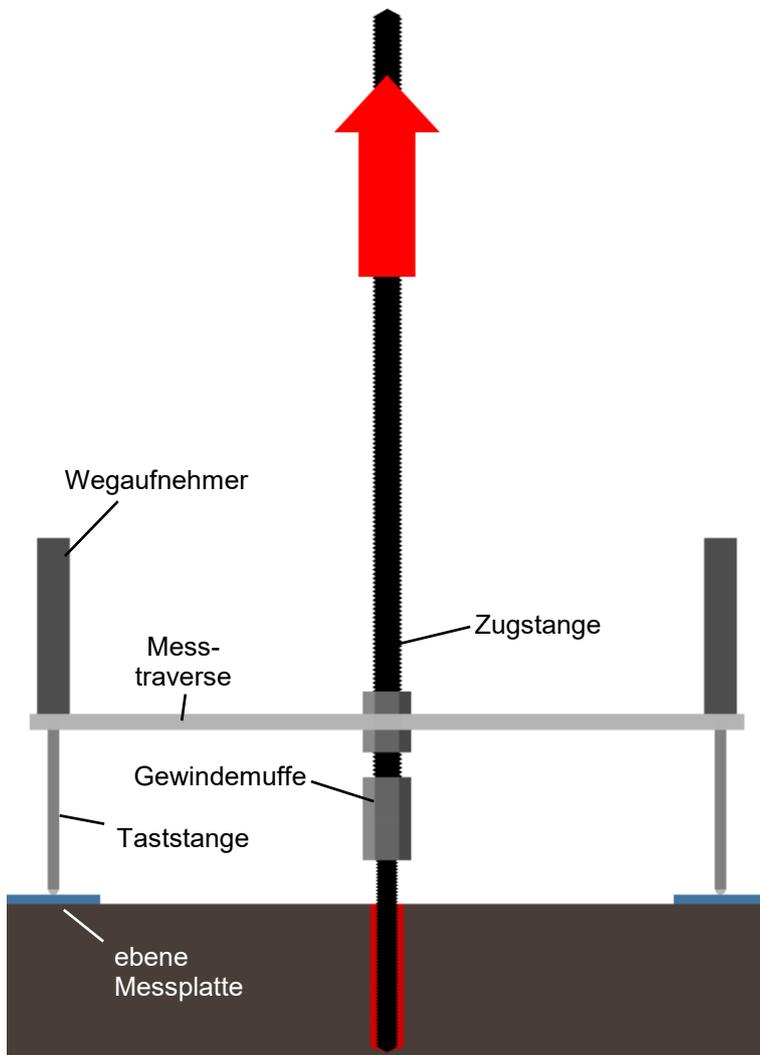
Das Verfahren zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit nach ETAG (und damit ebenso nach AC) weist einige signifikante Defizite auf, die im Folgenden erläutert werden.

### 2.4.1 Methode der Lastabstützung

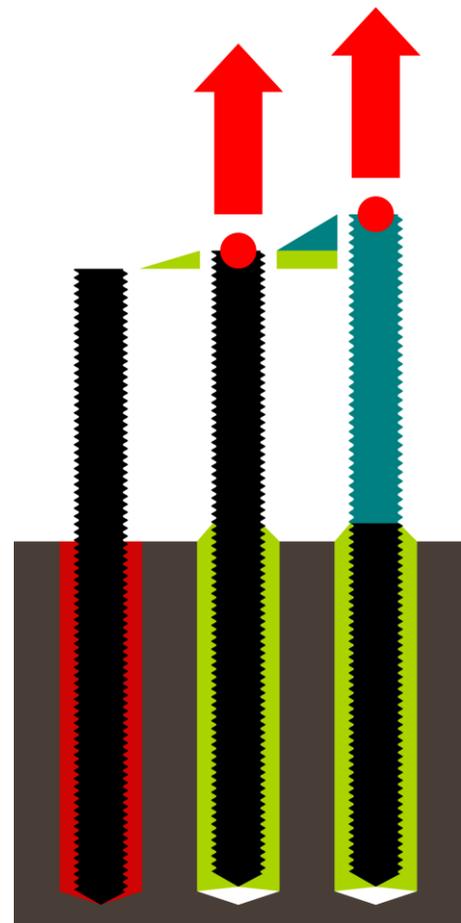
Durch die generelle Anwendung eines Setups mit enger Abstützung wird, insbesondere in den kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen, ein Betonversagen wirksam unterbunden. Einflüsse aus Rissbildung im Beton, die sich in praxisrelevanten Einbausituationen ergeben und möglicherweise für das Tragverhalten unter dauerhafter Lasteinwirkung maßgeblich sein können, bleiben im Dauerlastversuche unberücksichtigt. In ETAG und AC findet sich mit dem Faktor  $\alpha_{\text{setup}}$  nur eine pauschale rechnerische Berücksichtigung der unterschiedlichen Abstützarten.

### 2.4.2 Installation der Messvorrichtung

Durch das Fehlen verbindlicher Vorgaben zur Ausführung der Messvorrichtungen kann die Qualität der Ergebnisse, insbesondere deren Vergleichbarkeit, beeinträchtigt sein. In Abbildung 2.4 ist der Vorschlag zur Ausbildung der Messvorrichtung nach ETAG bzw. AC dargestellt.



**Abbildung 2.4:** Vorschlag zur Ausbildung der Messvorrichtung nach ETAG bzw. AC



**Abbildung 2.5:** Verschiebungsanteile infolge Dehnung

Das Messsystem, meist bestehend aus zwei oder drei Wegaufnehmern, ist mittels der Messtraverse an der zentralen Zugstange befestigt, die zur Lastübertragung vom Hydraulikzylinder auf den Dübel dient. Die Zugstange ist hierzu über eine Gewindemuffe mit dem Dübel kraftschlüssig verbunden.

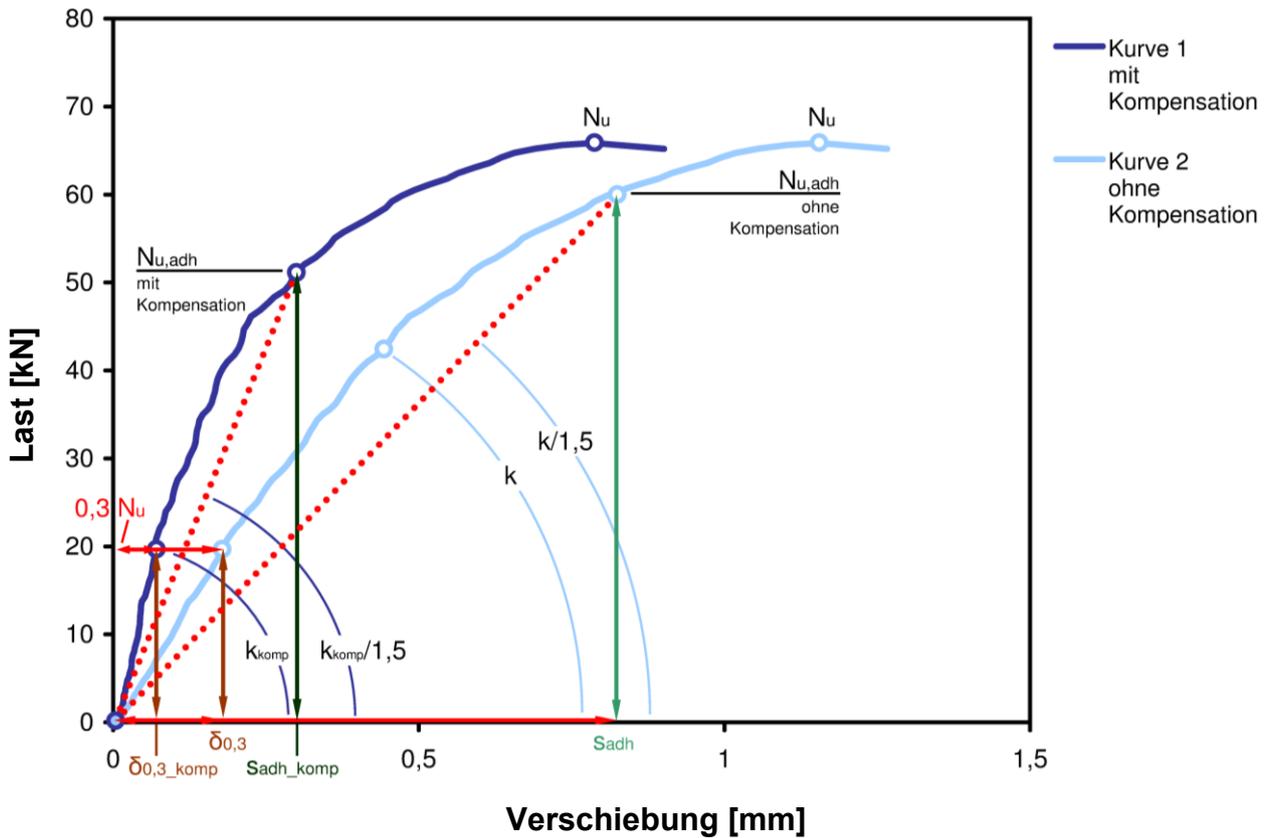
Verfolgt man den Weg der Last im Detail, so ist zu erkennen, dass die gemessene Gesamtverschiebung mehrere Verschiebungsanteile enthält. Gemäß Abbildung 2.5 sind neben der Verformung des Verbundmörtels (hellgrün) ebenso Anteile aus der Dehnung des Dübelüberstandes (dunkelgrün) zwischen Lastangriffspunkt (roter Punkt) und Betonoberfläche vorhanden. Da die getesteten Verbunddübelssysteme eine sehr hohe Steifigkeit in Dübellschichtungsrichtung besitzen, muss dieser Verschiebungsanteil zwingend bestimmt und kompensiert werden. Hinzu kommt der Gewindeschlupf zwischen Dübel und Muffe sowie zwischen Muffe und Zugstange und die elastische Dehnung der Zugstange, vom theoretischen Lastangriffspunkt der Muffe bis zum theoretischen Befestigungspunkt der Messtraverse.

Da Bruchverschiebungen von Verbundmörtelsystemen im zentrischen Zugversuch sehr gering sind, kann allein die Teilverschiebung aus Stahldehnung des Dübelüberstandes bei steifen Dübelsystemen (z.B. vinylesterbasierte Systeme) unter Anwendung der am IWB für diese Forschungsvorhaben verwendeten Versuchsaufbauten und Systemparameter (Einbindetiefe, Ringspaltmaß etc.) 30 % (!) der gemessenen Dübelkopfverschie-

bung betragen. Darüber hinaus verfälscht dieser linear-elastische Verschiebungsanteil die tatsächliche Last-Verschiebungs-Charakteristik des Verbunddübel-systems erheblich, indem er zu einer „Linearisierung“ führt. Dies bedeutet, dass ein ggf. vorhandenes, nicht-lineares Last-Verschiebungs-Verhalten des Systems durch diesen vergleichsweise großen, linearen Anteil überlagert wird und im ungünstigsten Fall mit der zur Verfügung stehenden Messgenauigkeit als solcher nicht mehr zu erkennen ist.

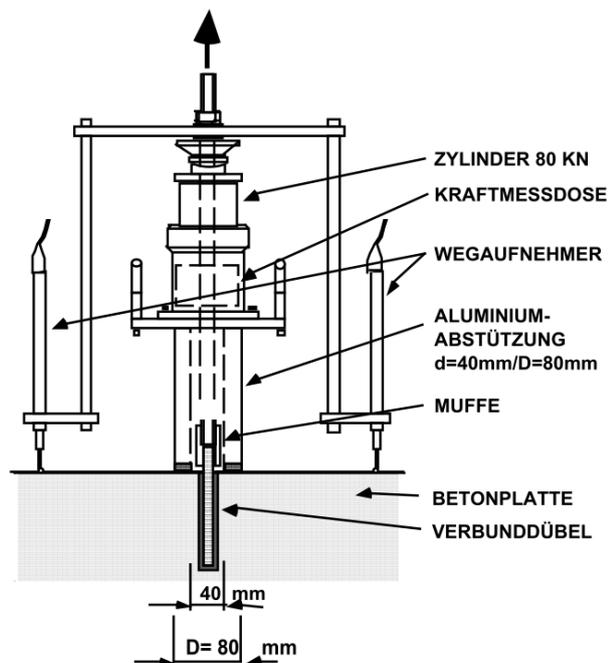
Kritischer zeigt sich der Sachverhalt bei Betrachtung des Gewindespiels und Gewindec-schlupfes innerhalb der Muffe, da dieser, bedingt durch eine mögliche Reibung der Kon-taktflächen, nichtlineare Verschiebungsanteile verursachen kann, die auf einfache Weise nicht zu bestimmen und damit nicht zu kompensieren sind. Bedenkt man, dass bei der Gesamtbetrachtung des vorgeschlagenen Messsystems von einem Messfehler ausge-gangen werden muss, dessen Höhe dem Betrag der zu messenden Dübelverschiebung entspricht, so ist anstelle einer rechnerischen Kompensation dieses Fehlers dringend eine Änderung des Versuchsaufbaus anzuraten. Abweichend von den Vorschlägen der ETAG und des AC bezüglich des Versuchsaufbaus erfolgte die Messung von Dübelver-schiebungen daher in Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit in der Regel durch eine direkte Messung der Verschiebung des Dübelkopfes, bezogen auf die Betonoberfläche (Details zur Ausführung, siehe Kapitel 4). Für eine Rückrechnung der gemessenen Dü-belkopfverschiebung auf eine Dübelverschiebung, die auf die Betonoberfläche bezogen ist, ist die Kompensation der Dehnung des Dübelüberstandes dann ausreichend. Hierbei ist anzumerken, dass weder ETAG noch AC explizit die „Dübelverschiebung bezüglich der Betonoberfläche“ als zu messende Verschiebung definiert. D.h., der Dauerlastver-such nach ETAG und AC kann selbst dann noch als normgerecht durchgeführt gelten, wenn die Verschiebungen mit den dort vorgeschlagenen Versuchsaufbauten gemessen, jedoch keine geeignete Kompensation der enthaltenen zusätzlichen Dehnungen vorge-nommen wurde.

Die möglichen Auswirkungen auf die Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben. In Dia-gramm 2.4 ist beispielhaft die Last-Verschiebungskurve eines kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchs mit enger Abstützung dargestellt. Es wurde eine Direktmessung auf den Dübelkopf durchgeführt, weshalb nur die Stahldehnung des Dübelüberstandes zu kom-pensieren ist. Kurve 2 zeigt den gemessenen Verlauf ohne diese Kompensation. Für Kurve 1 wurde eine Kompensation in Form einer Rückrechnung der gemessenen Dübel-kopfverschiebung auf eine Dübelverschiebung bezüglich der Betonoberfläche durchge-führt. Für die Kurven erfolgt die Bestimmung der Adhäsionsversagenslasten nach ETAG zu  $N_{u,adh_1} = 52 \text{ kN}$  und  $N_{u,adh_2} = 60 \text{ kN}$ . Aufgrund der Dehnung aus Dübelüberstand überschätzt die Auswertung der Kurve 2 die tatsächliche Verschiebung bei Adhäsions-versagen (Kurve 1) mit 0,82 mm gegenüber 0,27 mm um den Faktor 3 (!). Besondere Vorsicht ist bei der Auswertung von Last-Verschiebungskurven aus älterer Literatur an-gebracht. Ein diesbezüglich als kritisch zu betrachtendes Beispiel hinsichtlich der An-bringung der Messvorrichtung findet sich bei MÉSZARÓŠ (2002).



**Diagramm 2.4:** Last-Verschiebungskurve mit (dunkelblau) und ohne Kompensation der Dehnung aus Dübelüberstand

In Abbildung 2.6 ist dieser Versuchsaufbau dargestellt, wie er bis ca. 1995 auch am IWB für Versuche mit enger Abstützung verwendet wurde. Es ist offensichtlich, dass die hiermit gemessenen Verformungen zu einem weit überwiegenden Teil aus der Verformung des Versuchsaufbaus bestanden. Der Anteil der Dübelverschiebung hieran ist praktisch vernachlässigbar. Allein die Dehnung der zentralen Zugsange dürfte in den meisten Fällen den Verschiebungsanteil des Mörtels deutlich übersteigen, trotz der gegenläufig wirkenden Stauchung des Unterbaus. Jedoch ist anzumerken, dass das Ziel dieser Versuche nicht darin bestand, das Last-Verschiebungsverhalten von Verbunddübeln zu bestimmen, sondern die Höhe der Versagenslasten unter verschiedenen Randbedingungen zu ermitteln. Das Beispiel zeigt jedoch deutlich auf, dass bei der Beurteilung des Verschiebungsverhaltens von Ver-



**Abbildung 2.6:** Versuchsaufbau, verwendet in Versuchen zum Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung (MÉSZARÓŠ, 2002)

bunddübeln nicht auf die Ergebnisse extern durchgeführter Versuche zurückgegriffen werden kann, wenn die Ausführung der Versuchsaufbauten nicht in sämtlichen Details dokumentiert ist.

### 2.4.3 Berücksichtigung von Steifigkeit und Ausrichtung der Gewindestange

Bei der Bewertung von Messwerten, beispielsweise von Anfangsverschiebungen, ist zwingend der Umstand zu berücksichtigen, dass die gemessenen Rohwerte, neben der üblichen Stahldehnung aus Dübelüberstand, weitere Verschiebungsanteile enthalten können, welche die tatsächlichen Verschiebungen überlagern. Selbst kleinste Fehler bei der Kompensation der Stahldehnung aus Dübelüberstand, beispielsweise aufgrund von Fertigungstoleranzen der Gewindestange (unterschiedliche Spannungsquerschnitte), können bei der Größenordnung der hier auftretenden Anfangsverschiebungen auf Gebrauchslastniveau, selbst innerhalb einer Serie, zu Interpretationsschwierigkeiten führen. Beispielsweise beträgt der zu kompensierende Weg aus der Stahldehnung des Dübelüberstandes in Dauerlastversuchen bei den hier verwendeten Versuchsaufbauten ca. 0,093 mm unter einer Last von 15,9 kN und entspricht somit bereits annähernd dem zweifachen des Wertes der tatsächlich vorhandenen Anfangsverschiebung von ca. 0,05 mm bei einem vinylesterbasierten Mörtel unter gleicher Last. Bereits ein Fehler von  $\pm 5\%$  bei der Ermittlung des zu kompensierenden Anteils an der gemessenen Verschiebung führt in diesem Fall zu einem Fehler von ca.  $\pm 10\%$  gegenüber dem tatsächlichen Wert. Noch gravierender ist der Einfluss horizontaler Dübelkopfbewegungen während des Belastens. Verursacht werden diese in erster Linie durch eine Belastung des Dübels, die nicht exakt in Richtung der Dübelachse erfolgt, beispielsweise aufgrund einer Schiefstellung des Dübels nach der Montage oder durch Versatzmomente aufgrund einer außermittigen Lasteinleitung, die z.B. durch das Lochspiel des Anbauteils oder durch ein Spiel zwischen Gewindestange und Mutter verursacht ist. Nimmt man einen vollkommen senkrecht ausgerichteten Dübel an, auf dessen Dübelkopf ein vollkommen senkrecht ausgerichteter Wegaufnehmer exakt mittig tastet, dann würde eine Auslenkung des Dübels aus dieser Position zur Seite (wobei der Wegaufnehmer sich nicht mitbewegt) eine Verkippung der Oberfläche des Dübels um dasselbe Winkelmaß bedeuten. Durch diese Verkippung wird die Taststange des Wegaufnehmers um ein geringes Maß angehoben, wodurch sich der Dübel scheinbar hebt.

Bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchen mit einem Dübelüberstand von 115 mm ergibt eine Dübelauslenkung um  $1^\circ$ , bezogen auf die Betonoberfläche, eine scheinbare Anhebung der Taststange um 0,017 mm (bei seitlich unveränderter Position der Taststange). Dies entspricht ca. 30% der Anfangsverschiebung eines steifen vinylesterbasierten Systems mit der hier verwendeten Einbindetiefe von  $h_{ef} = 80$  mm unter einer typischen Prüflast von 15,9 kN. Dübelschiefstellungen von  $1^\circ$  und mehr sind erfahrungsgemäß eher die Regel, als die Ausnahme, da eine Schiefstellung des Dübels beim Setzen selten vollständig vermieden werden kann. Zudem könnte einer horizontalen Bewegung des Dübelkopfes, z.B. aufgrund einer außermittigen Lasteinleitung (Lochspiel, Gewindenspiel, etc.), mit den zur Verfügung stehenden Mitteln in der Praxis kaum begegnet werden.

Zusammenfassend muss an dieser Stelle festgestellt werden, dass die Anwendung von Prüfverfahren, die auf eine korrekte Bestimmung eines absoluten Verschiebeweges angewiesen sind, kritisch hinterfragt werden müssen. Wie aufgezeigt können die Beträge erforderlicher Messwertkorrekturen den tatsächlichen Wert einer Verschiebung, beispielsweise einer zu messenden Anfangsverschiebung, zum Teil erheblich überschreiten. Eine ausreichend genaue Ermittlung des resultierenden Messfehlers stellt bei derartigen Prüfverfahren einen erheblichen Aufwand dar und kann mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein oder gar technisch unmöglich. In jedem Fall ist zu überprüfen, ob Verhaltensauffälligkeiten tatsächlich auf eine Eigenart des Dübelsystems unter der ge-

gebenen Belastung zurückzuführen sind oder möglicherweise nur aus einem messtechnischen Problem resultieren.

#### 2.4.4 Versuchsdurchführung

Wie bereits erläutert unterscheiden sich die Vorgaben zur Versuchsdurchführung zwischen ETAG bzw. AC in einem ganz entscheidenden Punkt: die ETAG sieht die Belastung vor dem Aufheizen vor, wohingegen diese gemäß AC erst nach dem Auf- und Durchheizen der Versuchskörper durchgeführt wird. Die Referenzversuche zur Bestimmung des Versagenskriteriums (= Adhäsionsverschiebung) finden hingegen in beiden Fällen im vollständig durchgeheizten Zustand statt. Untersuchungen darüber, in welchem Umfang diese verschiedenen Belastungszeitpunkte einen Einfluss auf den Verschiebungsfortschritt während des Dauerlastversuchs und damit auf die Ergebnisse der Extrapolationsverfahren nach ETAG und AC haben, liegen bislang nicht vor.

In jedem Fall ist das Vorgehen nach ETAG in messtechnischer Hinsicht als problematisch einzustufen. Die Wegmessung beginnt hier spätestens mit der Lastaufbringung, also noch bei Normaltemperatur. Während des sich unmittelbar anschließenden Aufheizvorganges wird nicht nur der Testkörper aufgeheizt, sondern auch der Versuchsaufbau selbst, ebenso wie das Messsystem. Somit enthalten die gemessenen Verschiebungen mindestens folgende Teilverschiebungen: die Dübelkopfverschiebung, die Verschiebung des Messsystems (Wegaufnehmer) aufgrund der thermischen Dehnung der Wegaufnehmerhalterung, eine positive oder negative Verschiebung durch die thermische Ausdehnung des Wegaufnehmers selbst sowie die thermische Längenänderung des Dübels. Bei den am IWB verwendeten Wegaufnehmern spielt, aufgrund deren Länge, auch die Dehnung der Taststange eine Rolle. Die verwendeten Taststangen der Wegaufnehmer bestehen aus nichtrostendem Stahl mit austenitischem Gefüge, wohingegen die Wegaufnehmerhalterungen aus Baustahl mit einem ferritischen Gefüge bestehen. Durch den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Gefügetypen gleicht sich der Effekt der thermischen Dehnung nicht aus, sodass ein Anteil im Messwert erhalten bleibt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Werkstoffs 1.4301 ist mit  $16,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  um ca. 50% größer als derjenige von typischem Baustahl. Für eine übliche Länge der Taststange eines am IWB gebräuchlichen potentiometrischen Wegaufnehmers von ca. 100 mm (Messspitze bis zum Abgriff des Sensors) ergibt sich für eine Temperaturerhöhung um  $23^\circ\text{C}$  (von  $20^\circ\text{C}$  Raumtemperatur, bis zur maximalen Temperatur für Dauereinwirkung von  $43^\circ\text{C}$ ) ein bleibender Anteil an der gemessenen Verschiebung von ca.  $+0,014 \text{ mm}$ . Es handelt sich hierbei um einen kleinen Wert. Bedenkt man jedoch, dass beispielsweise die Anfangsverschiebung eines Verbunddübels M12 auf Vinylesterbasis mit einer Einbindetiefe von  $h_{\text{ef}} = 80 \text{ mm}$  unter einer Last von  $15 \text{ kN}$  (ca. Gebrauchslastniveau) selten mehr als  $0,07 \text{ mm}$  beträgt, so erkennt man, dass sich schon allein durch die verschiedenen Wärmeausdehnungen einzelner Bauteile der Messvorrichtung Abweichungen in einer Größenordnung von 20% und mehr bezüglich der tatsächlichen Dübelverschiebung ergeben können, je nach Steifigkeit des Dübelsystems.

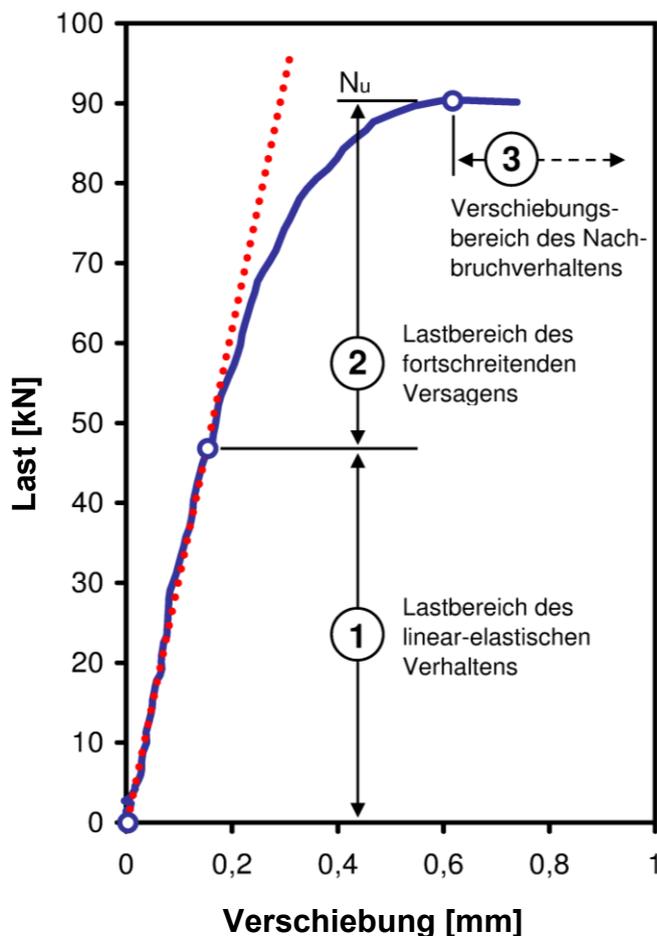
#### 2.4.5 Messwertaufbereitung

In Abschnitt 2.4.2 wurde die Auswirkung der Montage der Messvorrichtung entsprechend den Vorschlägen nach ETAG bzw. AC aufgezeigt. Die Verschiebungsanteile der Messwerte, die auf eine Dehnung des Versuchsaufbaus zurückzuführen sind und somit nicht auf einer Verschiebung des Dübels beruhen, sind erheblich. Sie müssen mit hoher Genauigkeit bestimmt und bei der Versuchsauswertung entsprechend berücksichtigt werden. Aber auch eine Direktmessung auf den Dübelkopf erfordert zumindest die korrekte Kompensation der Dehnung des Dübelüberstandes, also die korrekte Rückrechnung der gemessenen Dübelkopfverschiebung auf die Verschiebung des Dübels bezüglich der Betonoberfläche. Der Betrag des zu kompensierenden Teils der Anfangsverschiebung ist

lastabhängig, was zur Folge hat, dass schon bei der geringsten Über- oder Unterschätzung der Elastizität der Gewindestange (Abweichung des E-Moduls, Abweichung des Querschnitts, Abweichung vom theoretischen Lastangriffspunkt) ein Fehler in den Messwerten entsteht, der zu einer fehlerhaften Bestimmung dieses spontan-elastischen Anteils der gemessenen Gesamtverschiebung führt.

#### 2.4.6 Ansatz des Versagenskriteriums

Das Versagenskriterium für Dauerlastversuche gemäß ETAG bzw. AC wird in Referenzversuchen ermittelt, die als kurzzeitige, zentrische Zugversuche unter Anwendung einer engen Abstützung durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.3). Um ein Versagenskriterium überhaupt betragsmäßig bestimmen zu können, ist zuvor eine konkrete Definition des Versagenszustandes erforderlich. Dieser Versagenszustand wird mit dem Adhäsionsversagen gleichgesetzt, also als Versagen der Klebung zwischen Verbundmörtel und Beton gewertet. ETAG bzw. AC nutzen zu dessen Bestimmung beide ein rechnerisches Verfahren, um es aus dem Kurvenverlauf zu bestimmen. Zu diesem rechnerischen Ansatz ist keine Ableitung bekannt. Es ist unklar, ob der auf diese Weise ermittelte Wert tatsächlich Relevanz für die Dauerhaftigkeit des Dübel-systems besitzt. Demgegenüber kann die Definition des Versagens der Adhäsion auch in naheliegenderer Form erfolgen. In Diagramm 2.5 ist hierzu eine typische Last-Verschiebungskurve eines kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchs mit enger Abstützung dargestellt. Die Kurve kann in drei Lastbereiche unterteilt werden:



**Diagramm 2.5:** Unterteilung der Last-Verschiebungskurve in Lastbereiche

**Lastbereich 1:** linear-elastisches bzw. linear-viskoelastisches Verhalten

Es wird angenommen, dass sich innerhalb dieses Lastbereichs unter einer kurzzeitigen Belastung keine nennenswerten plastischen Verformungen einstellen und dass das Verbunddübelssystem keiner strukturellen Schädigung unterliegt. Das Verschiebungsverhalten ist dabei spontan-elastisch oder verzögert-elastisch (viskoelastisch).

**Lastbereich 2:** Versagensverhalten

Der Versagensbereich erstreckt sich vom Lastniveau des Einsetzens einer strukturellen Schädigung des Verbunddübelssystems bis zur Höchstlast  $N_u$ . Als Beginn der strukturellen Schädigung wird hierbei das Einsetzen einer kontinuierlichen Steifigkeitsänderung des Systems gewertet, die sich in Form eines zunehmend flacher werdenden Verlaufs der Last-Verschiebungskurve abzeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass die strukturelle Schädigung darin besteht, dass eine Trennung zwischen Verbundmörtel und Beton einsetzt und somit auf Adhäsionsversagen zurückzuführen ist (der Fall eines vorzeitigen Versagens der Scherfläche zwischen Gewindestange und Verbundmörtel wird hier nicht berücksichtigt). Bedenkt man das erhebliche Ausmaß des Steifigkeitsverlustes innerhalb dieses Lastbereichs und den Betrag des damit verbundenen Verschiebeweges, so ist kaum anzunehmen, dass der Schädigungsmechanismus auf einem kontinuierlichen Fortschritt des Adhäsionsverlustes beruht. Es erscheint vielmehr wahrscheinlicher, dass das Versagen der Klebung am Übergang von Bereich 1 zu Bereich 2 innerhalb eines kleinen Lastbereichs bereits vollständig erfolgt ist und die Resttragfähigkeit auf Reibung und ein Verklemmen des Mörtelstopfens entlang der Bohrlochwand zurückzuführen ist, das durch die üblichen Bohrlochimperfectionen verursacht wird.

**Lastbereich 3:** Nachbruchverhalten

Der Nachbruchbereich ist ab dem Überschreiten der Höchstlast  $N_u$  definiert. Er spielt in der weiteren Betrachtung keine Rolle.

Die sich aus der letztgenannten Definition des Adhäsionsversagens ergebende Verschiebung ist offensichtlich deutlich geringer als nach der rechnerischen Definition gemäß ETAG und AC. Folgt man weiter dem Ansatz nach ETAG und AC, wonach der Verschiebungszustand sowohl im Kurzzeit- als auch im Langzeitversuch denselben Schädigungsindikator darstellt, würden sich hieraus entsprechend deutlich geringere Standzeitprognosen ergeben. Der Ansatz des Versagenskriteriums nach ETAG und AC würde hierbei deutlich auf der unsicheren Seite liegen.

## 2.5 Zusammenfassung und Konsequenz

In diesem Kapitel wurden die wesentlichen Ansätze des Prüfverfahrens nach ETAG bzw. AC zur Beurteilung des Verhaltens von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Last einwirkung vorgestellt und bewertet. Es wurde erläutert, dass hierbei das maßgebliche Versagen derartiger Systeme unter Last als das Versagen der Klebkraft definiert ist, die zwischen Verbundmörtel und Beton wirkt (Adhäsionsversagen), und dass davon ausgegangen wird, dass diesem Versagensvorgang eine eindeutige Versagensverschiebung zugeordnet ist, die sowohl im kurzzeitigen Referenzversuch wie auch im anschließenden Dauerlastversuch Gültigkeit hat. Sie wird als Verschiebung des Dübels relativ zur Betonoberfläche gemessen. Es wurde weiter erläutert, dass die Bestimmung dieses Adhäsionsversagens im kurzzeitigen Referenzversuch nicht anhand einer Beurteilung der Steifigkeitsänderung des Systems während der ansteigenden Prüflast erfolgt, sondern auf Basis einer starren, geometrischen/rechnerischen Ableitung, die im Last-Verschiebungsdiagramm unter Zuhilfenahme der ermittelten Last-Verschiebungskurve vorgenommen wird. Dieses Verfahren ermöglicht auf der einen Seite eine einfache Auswertung, selbst für wenig Geübte, bedient sich auf der anderen Seite jedoch eines Verfahrens zur Ermittlung des Versagenskriteriums, das nach Meinung des Verfassers nicht korrekt ist, weshalb hier entsprechend Fehleinschätzungen der Dauerhaftigkeit zu erwarten sind. Darü-

---

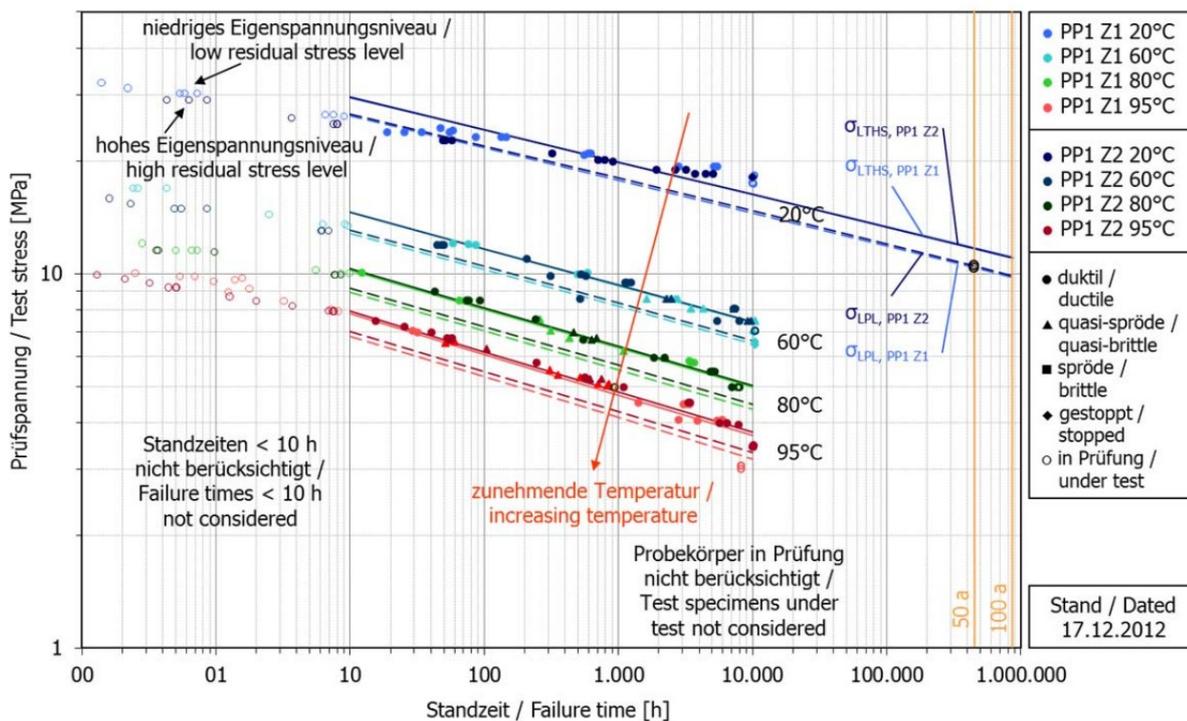
ber hinaus wurde weiter aufgezeigt, dass sich allein aufgrund mangelhafter oder fehlender Vorgaben bezüglich der Mess- und Versuchstechnik eine derartige Beeinträchtigung der Qualität der Messergebnisse ergeben kann, dass hieraus erhebliche negative Auswirkungen auf die Ergebnisse des Prüfverfahrens nach ETAG bzw. AC zu erwarten sind.

Zusammenfassend ist somit festzustellen, dass auf Basis des Prüfverfahrens nach ETAG bzw. AC, aufgrund der dargelegten Unzulänglichkeiten, eine sichere Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung nicht möglich ist. Für eine Befestigung kann das tatsächlich vorhandene Sicherheitsniveau unter einer solchen Belastung hiermit nicht bestimmt werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde daher am IWB ein alternatives Verfahren entwickelt und erprobt, das demgegenüber eine sichere Abschätzung der Lebensdauer von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung zum Ziel hat. Das Verfahren sowie die Erkenntnisse, die sich bei dessen Anwendung hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung ergeben, sind Inhalt der nachfolgenden Ausführungen.

### 3 Standzeitversuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen

#### 3.1 Grundgedanke der Standzeitkurve

Die zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Arbeit gültigen Versuchsvorschriften nach ETAG bzw. AC zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung basieren auf statischen Dauerlastversuchen. Die Dauerhaftigkeit eines Dübels gilt hier unter der jeweils aufgetragenen Prüfdauerlast als erwiesen, wenn innerhalb der planmäßigen Soll-Lebenszeit eines solchen Dübel-systems eine definierte Grenzverschiebung (Verschiebung bei angenommenem Adhäsionsversagen, vgl. Kapitel 2) infolge des zeitabhängigen Verschiebungsfortschritts nicht überschritten wird. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit anhand solcher Versuche, die üblicherweise 1000 h Laufzeit in Anspruch nehmen, ist eine Vorwärtsprojektion der ermittelten Verschiebungskurve mittels eines geeigneten Extrapolationsansatzes erforderlich. Bislang ungeklärt ist, ob auf Basis dieser fortschreitenden Verschiebung unter Dauerlast tatsächlich eine Aussage über deren Lebensdauer möglich ist. Wie aufgezeigt ist dieses Verfahren mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Vor allem das rechnerisch zu ermittelnde Versagenskriterium in Form einer rechnerischen Versagensverschiebung ist als solches bislang nicht validiert und daher kritisch zu hinterfragen.



**Diagramm 3.1:** Beispiel für eine Auswertung von Standzeitversuchen an mit Innendruck beaufschlagten Kunststoffrohren mittels Extrapolation (Quelle: TU-Darmstadt, MPA-Darmstadt, 2013)

Anstatt eine Verschiebung zu extrapolieren und mit einem angenommenen Versagenskriterium zu vergleichen sind Ansätze erforderlich, mit denen sich unmittelbar die Standzeit unter einer gegebenen Last ermitteln lassen. Idealerweise handelt es sich hierbei unmittelbar um eine Funktion der Standzeit in Abhängigkeit von der einwirkenden Dauerlast. In diesem Sinne wird ein in anderen technischen Bereichen üblicher Ansatz auf die Dübeltechnik übertragen. Er besteht darin, Verbunddübel auf verschiedenen hohen Dauerlastniveaus zu belasten, das tatsächliche Auftreten des Versagens abzuwarten,

aus den ermittelten Wertepaaren (aufgebrachte Last und zugehöriger Versagenszeitpunkt) die Standzeitfunktion zu bestimmen und mittels geeigneter Extrapolationsansätze fortzuschreiben. Ein solches Verfahren findet beispielsweise Anwendung bei Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an mit Innendruck beaufschlagten Kunststoffrohren nach DIN EN ISO 1167 (Versuchsdurchführung) [19] und DIN EN ISO 9080 (Auswertung) [20] (vgl. Abbildung 3.1).

## 3.2 Vorgehensweise

### 3.2.1 Ermittlung vollständiger Verschiebungskurven bis zum Versagen

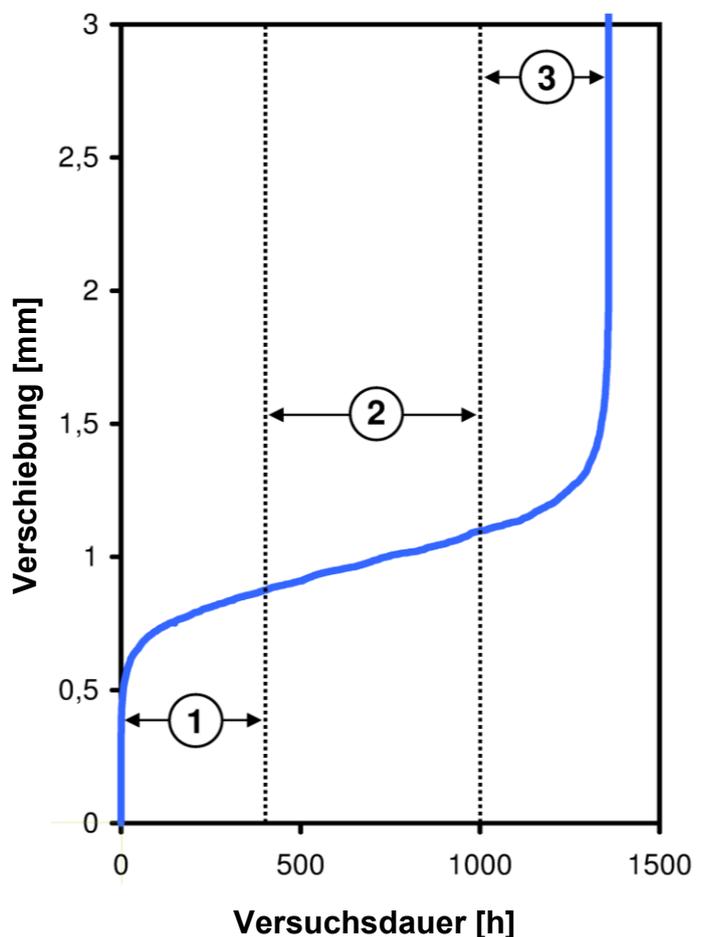
Die Ausgangsdaten für die Ermittlung der Standzeitkurve werden in Dauerlastversuchen gewonnen, bei deren Durchführung tatsächlich ein Versagen des Dübelsystems eingetreten ist. Diagramm 3.2 zeigt eine typische zeitabhängige Verschiebungskurve vom Beginn der Belastung des Dübels bis zum Zeitpunkt des Versagens. In der Materialprüfung von Werkstoffen werden vergleichbare Verschiebungskurven üblicherweise in drei Abschnitte unterteilt, das primäre, das sekundäre und das tertiäre Kriechen:

**Primäres Kriechen:** Ständige Abnahme der Verschieberate.

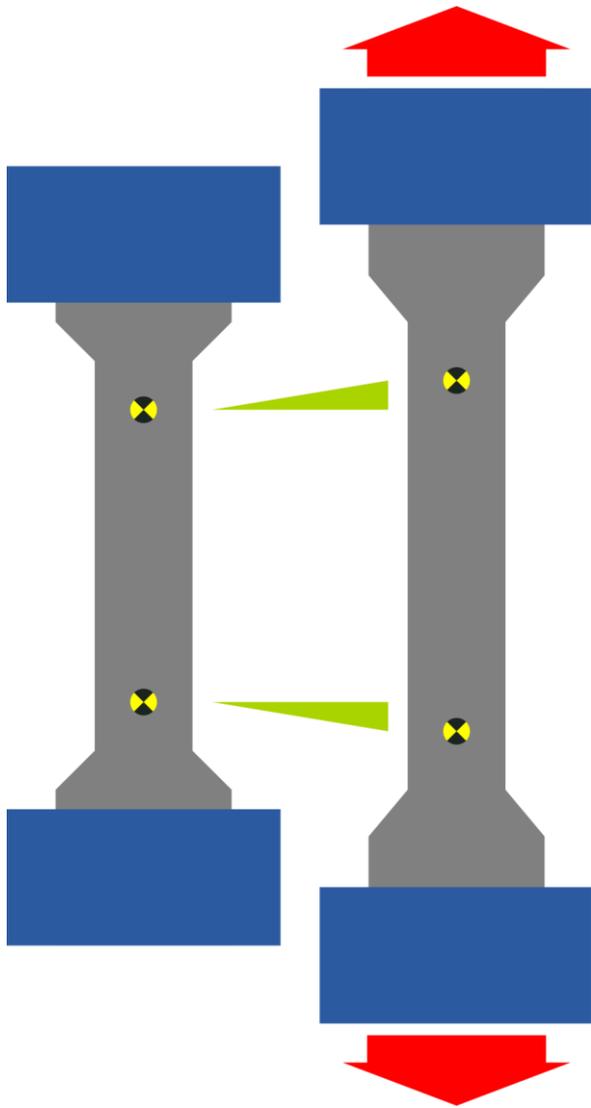
**Sekundäres Kriechen:** Konstante Verschieberate

**Tertiäres Kriechen:** Progressive Zunahme der Verschieberate bis zum Versagen.

Üblicherweise sind derartige Kriechkurven das Ergebnis eines Dauerlastversuchs an einer genormten Zugprobe, die einer konstanten Zuglast ausgesetzt wurde [21, 22]. Die Verformungsmessung erfolgt hierbei zwischen zwei eindeutig definierten Messpunkten auf der Probe. Abbildung 3.1 zeigt dies sinnbildlich. Hellgrün dargestellt ist die Messpunktverschiebung unter Dauerlast zwischen den beiden Zuständen der Probe. Hierdurch kann isoliert das Kriechverhalten eines Kunststoffes unter reiner einaxialer Zugbelastung ermittelt werden. Bei der Betrachtung des Verschiebungsverhaltens eines Verbunddübels unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung handelt es sich hingegen um die Betrachtung des Zusammenspiels eines vergleichsweise komplexen Systems mit einer Vielzahl von Einflussfaktoren.



**Diagramm 3.2:** drei typische Kriechabschnitte der Verschiebungskurve eines Verbunddübelsystems unter Dauerlast



Grundsätzlich zeigen auch die am Gesamtsystem ermittelten Verschiebungskurven eine Phase der Stabilisierung (vergleichbar dem primären Kriechen), eine Phase gleichmäßigen Verschiebungsfortschritts (vergleichbar dem sekundären Kriechen) und einer Phase des progressiv fortschreitenden Verschiebungsfortschritts bis zum Versagen (vergleichbar dem tertiären Kriechen). Es ist jedoch zu erwarten, dass dieses die einfache Ausprägung eines gegenüber der Zugprobe vergleichsweise komplexen Verschiebungsmechanismus ist, der in seiner Komplexität der des Systems selbst entspricht.

**Abbildung 3.1:** schematische Darstellung einer Standardzugprobe mit Messpunkten, unbelastet (links) und belastet

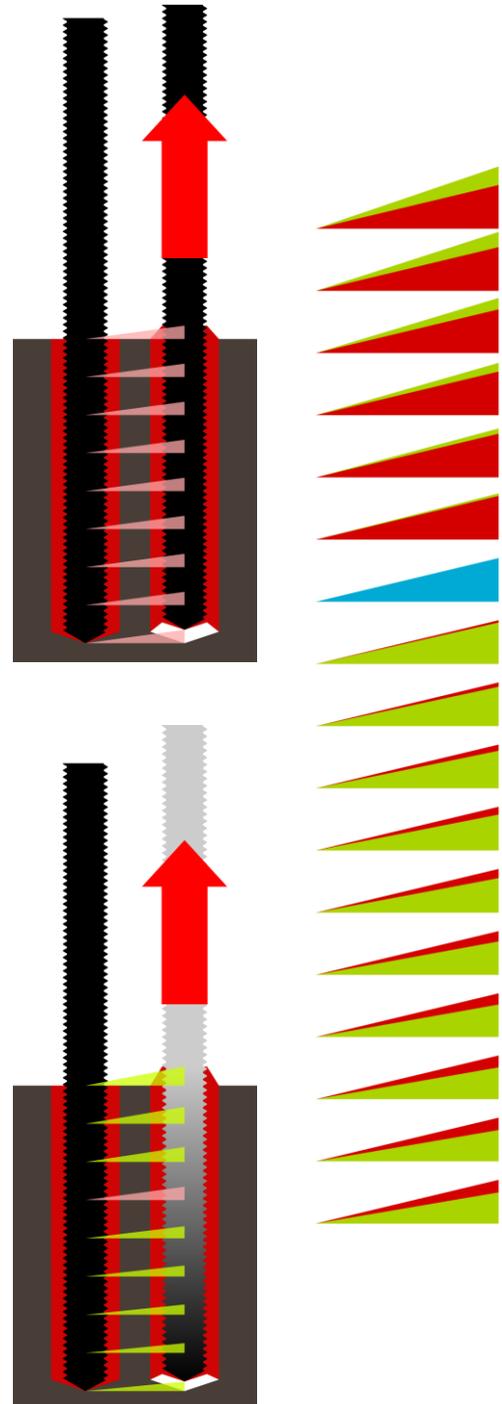
### 3.2.1.1 Verformungsanteile der gemessenen Verschiebungen

Die gemessene Dübelverschiebung ist nicht allein auf die Schubverformung des Verbundmörtels und die Dehnung des Dübelüberstandes (vgl. Kapitel 2, Abbildung 2.5) zurückzuführen. Vielmehr setzt sie sich maßgeblich aus den folgenden Verformungsbestandteilen zusammen:

#### a) Dehnung der Gewindestange

Um den Sachverhalt zu erläutern, wird hier stark vereinfachend davon ausgegangen, dass die Lastübertragung zwischen Gewindestange und Mörtel sowie zwischen Mörtel und Beton ausschließlich durch Adhäsion bzw. Verzahnung entlang der Gewindestange erfolgt. Formschlüssige Effekte, die aus Bohrlochunebenheiten resultieren können, werden hierbei nicht berücksichtigt. Dieses vereinfachte Tragmodell ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Links, jeweils direkt paarweise nebeneinander, ist ein Dübelssystem im belasteten und unbelasteten Zustand dargestellt. Links oben wird die Gewindestange als unendlich steif angenommen, während links unten die Dehnung der Gewindestange berücksichtigt ist. Dabei wird vereinfachend von einer linearen Dehnungsänderung ausgegangen, die sich im Helligkeitsverlauf der Darstellung widerspiegelt. Eine ausführliche Untersuchung zur tatsächlichen Spannungsverteilung entlang der Dübelachse und der Dehnungsverteilung entlang des Dübels findet sich in [23].

In beiden Abbildungen sind die Verschiebungen von neun Punkten entlang des einbindenden Teils der Gewindestange durch Dreiecke dargestellt. In der Abbildung rechts daneben sind die Verschiebungen beider Fälle überlagert dargestellt, wobei jeweils ein Zwischenwert ergänzt wurde. Während die roten Verschiebungen konstant sind, variieren diese bei einer Berücksichtigung der Gewindestangendehnung über die Tiefe. Das blaue Dreieck kennzeichnet eine in beiden Fällen identische Verschiebung. Offensichtlich sind in beiden Fällen, über die Einbindetiefe betrachtet, unterschiedliche Verbundspannungen zu erwarten, weshalb entsprechend mit einem ortsabhängigen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Mörtelschale zu rechnen ist.



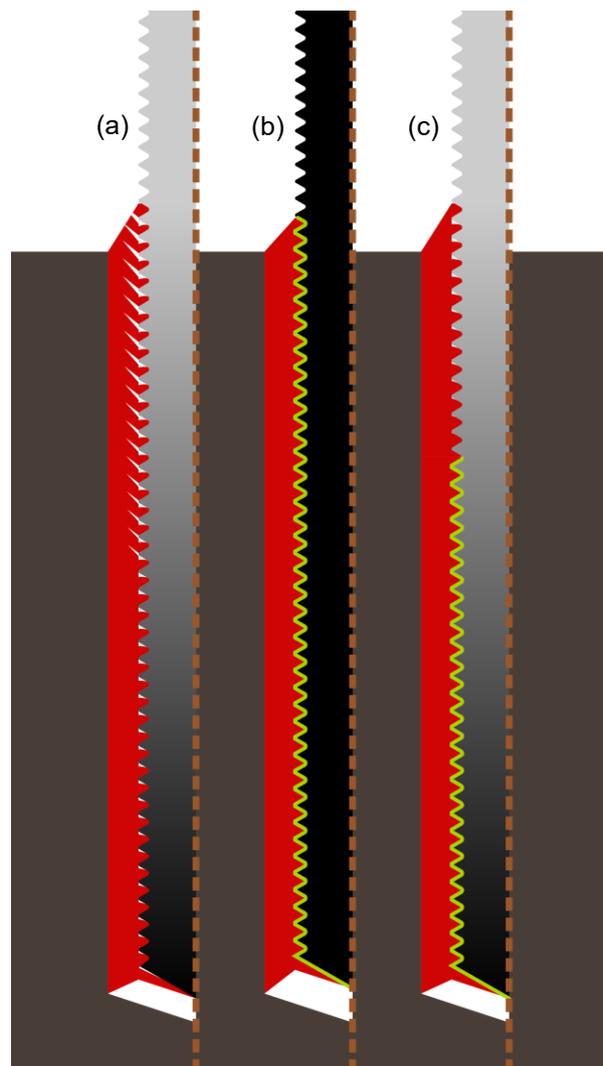
**Abbildung 3.2:** schematische Darstellung der Verbundspannungen bei Annahme einer unendlich steifen (links oben) und einer dehnweichen Gewindestange

b) Schlupf zwischen Gewindestange und Mörtel

Die vereinfachende Annahme des vorangegangenen Abschnitts, dass zwischen Gewindestange und Verbundmörtel eine monolithische Verbindung gegeben ist, stellt einen Sonderfall dar. Diese Annahme setzt vollflächig wirkende Adhäsionskräfte entlang der gesamten Kontaktfläche zwischen Mörtel und Gewindestange voraus. Allerdings ist die Höhe der möglichen Bindungskräfte von der Oberflächenbeschaffenheit der Gewindestange abhängig, insbesondere vom Reinigungszustand, sodass anzunehmen ist, dass eine rein monolithische Verbindung selten gewährleistet werden kann. Abbildung 3.3 zeigt demgegenüber zwei weitere mögliche Zustände, diesmal unter Annahme einer dehnweichen Gewindestange. Links dargestellt ist eine rein formschlüssige Kraftübertragung, wobei hier in Bereichen höchster Gewindestangendehnung bereits eine Rissbildung im Verbundmörtel unterstellt wird. Mittig ist eine rein stoffschlüssige Kraftübertragung durch Adhäsion zwischen Gewindestange und Mörtel dargestellt (grün), wieder unter der Annahme einer unendlich dehnsteifen Gewindestange wie zuvor. Der rechte Fall stellt einen Übergang vom anfänglich stoffschlüssigen zum anschließend formschlüssigen Tragverhalten dar, für den Fall eines Versagens der Adhäsion, ausgehend vom Bereich höchster Gewindestangendehnungen nahe der Betonoberfläche. Bei vollflächigem Wirken der Adhäsionskräfte (mittige Darstellung) bindet der Mörtel zug- und druckfest an die Gewindestange. Der Mechanismus des Lastübertrags kann als monolithisch und somit stetig über die gesamte Einbindetiefe betrachtet werden. In einem solchen Fall stimmen der Dehnungszustand der Gewindestange und des Mörtels entlang ihrer gemeinsamen Kontaktfläche überein. In Fällen, in denen die Adhäsion zwischen Verbundmörtel und Gewindestange bereits teilweise oder vollständig versagt hat, ist eine Übereinstimmung der Dehnungszustände dagegen nicht mehr gegeben (z.B. im Falle von Rissbildung). Im Extremfall resultiert der gemessene Weg vorwiegend aus Schlupf, wenn es bereits zu einem Abscheren der Mörtelzähne entlang der Gewindestange gekommen ist.

c) Schubkriechen der Mörtelschicht

Wie bereits aufgezeigt stellt die Schubverformung der Mörtelschale nur einen von mehreren möglichen Verschiebungsmechanismen dar, sodass die Verschiebungscharakteristik eines Dübelystems keineswegs allein auf das reine Schubkriechen der Mörtelschale reduziert werden darf. Ein Schubkriechen der Mörtelschale ist

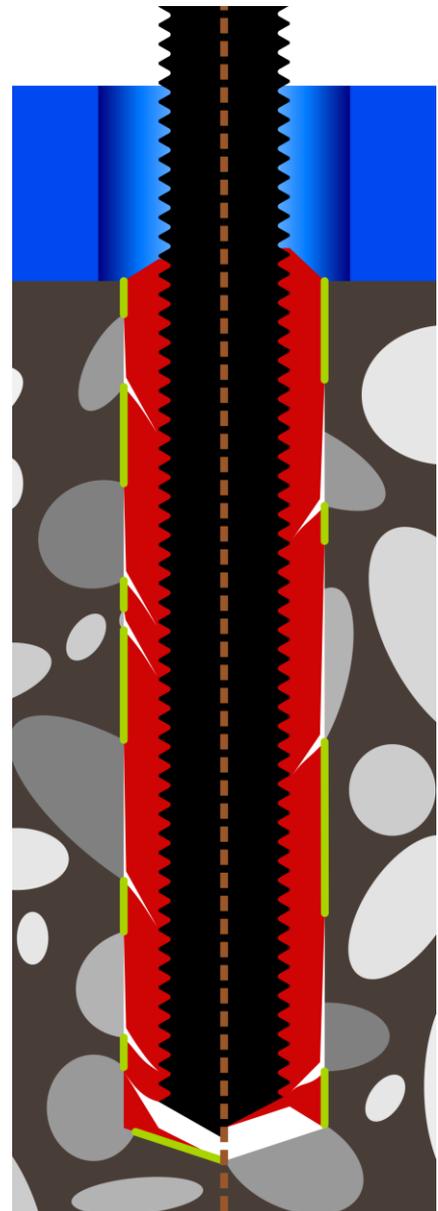


**Abbildung 3.3:** Kraftübertragung rein formschlüssig (a), rein stoffschlüssig (b, grün) sowie in Kombination (c)

praktisch nur bei niedrigen Belastungen als maßgeblicher Verschiebungsanteil denkbar, wenn diese noch nicht zu einem Versagen der Klebung zwischen Gewindestange und Beton oder zu Rissbildung im Verbundmörtel geführt haben.

d) Schlupf zwischen Mörtelschale und Beton

Unter der Voraussetzung, dass keine Fehlstellen (z.B. durch Luftblasen) vorhanden sind, ist die Verbindung zwischen Verbundmörtel und Beton im Idealfall vollflächig wirksam. Durch Adhäsionskräfte und feinste Formschlüsse (mechanische Adhäsion) infolge einer Penetration feinsten Risse des Betons durch den Mörtel wird eine vollflächige Tragwirkung erzielt [24]. Das Penetrationsvermögen und damit die mögliche Penetrationsschichtdicke hängen vom jeweiligen Mörtelsystem ab. Je nach chemischer Basis (z.B. Epoxidharz- oder Vinylesterharzbasis) mag diese Dicke variieren. Gegenüber der Dicke der Mörtelschale bleibt diese jedoch immer äußerst gering. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass der Beton in dieser Grenzschicht eine lokale Ertüchtigung erfährt, indem der Zementstein, der während der Bohrlocherstellung infolge des Bohrprozesses selbst eine Schädigung seiner Struktur erfahren hat, hierdurch ertüchtigt wird. Es wird daher angenommen, dass sich im Falle eines Versagens von Dauerlastversuchen mit enger Abstützung die Versagenszone grundsätzlich innerhalb des Verbundmörtels befindet und nie innerhalb der Penetrationsschicht oder gar innerhalb des Betonkörpers. Gestützt wird diese Vermutung durch die Beobachtung, dass bei Systemen auf Epoxidharzbasis, nach dem Versagen im Dauerlastversuch, augenscheinlich ein Belag auf der Oberfläche der ursprünglichen Bohrlochwand verbleibt, bei dem es sich nur um Reste des Mörtels handeln kann. Dies legt den Schluss nahe, dass es sich hierbei nicht um ein reines Adhäsionsversagen gehandelt haben kann, sondern vielmehr um ein Versagen entlang dieser Grenzfläche zur Penetrationsschicht innerhalb der Mörtelsubstanz selbst, was ein Kohäsionsversagen als Versagensursache nahelegt. Eine solche Trennung der Mörtelschale vom Versuchskörper führt dazu, dass der gemessene Verschiebeweg vorwiegend auf Schlupf beruht. Das Verhalten gleicht dem Fall eines Abscherens der Mörtelzähne entlang der Gewindestange, das den üblichen Versagensfall vinylesterbasierter Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung darstellt. Im Gegensatz zum Versagen der vinylesterbasierten Verbunddübel findet das Versagen der epoxidharzbasierten Verbunddübel somit in der Regel nicht entlang der Fläche mit der höchsten Schubbelastung statt (entlang der Einhüllenden der Gewindestange), sondern entlang einer Fläche, innerhalb derer mit niedrigeren Schubbelastungen zu rechnen ist aufgrund des vergleichsweise größeren Umfangs. Dies legt den Schluss nahe, dass entlang der Verbundzone zwischen Mörtel und Beton eine signifikante Schwächung der



**Abbildung 3.4:** sich ausweitendes Versagen der Adhäsion (grün)

Substanz oder ein besonderer Belastungszustand vorliegen muss. Da bei den versagten Dauerlastversuchen eine annähernd vollflächige dünne Mörtelschicht entlang der Bohrlochwand verblieben ist, kann es sich hierbei nicht um eine Schwächung der Klebung selbst handeln. Über den tatsächlichen Grund kann an dieser Stelle zunächst nur spekuliert werden. Denkbare Gründe sind:

#### I. Entzug einer Mörtelkomponente

Die Durchmischung der beiden Verbundmörtelkomponenten erfolgt im Mischeraufsatz der Mörtelkartusche. Für einen optimalen Aushärtungsprozess sind epoxidharzbasierte Verbundmörtel auf ein streng stöchiometrisches Verhältnis ihrer Bestandteile im Mischungsprozess angewiesen [25]. Ist dies nicht gewährleistet, verbleiben Reste der überschüssigen Komponente unverbraucht und behindern eine optimale Vernetzung. Bei unzureichender Durchmischung ist denkbar, dass es bei Kontakt eines nicht vollständig vermischten Anteils einer Mörtelkomponente mit der Betonoberfläche zu einem Entzug dieser Komponente kommt, beispielsweise durch ein Einziehen in den Beton infolge von Kapillarwirkung. Im Fall des Entzuges der mengenmäßig vergleichsweise geringen Härter-Komponente könnte hieraus entlang der Penetrationszone eine kritische Änderung des Mischungsverhältnisses der Mörtelkomponenten resultieren, welche die Mörtelfestigkeiten dort lokal herabsetzt. Hiervon dürften ggf. jedoch nur die Anteile der Klebefläche aus Zementstein betroffen sein und auch diese nur zu einem geringen Teil. Eine signifikante Schwächung großflächiger Bereiche erscheint deshalb kaum möglich.

#### II. Vorbelastung aus Schwindverformungen

Erfahrungsgemäß können epoxidharzbasierte Verbundmörtel während des Polymerisationsprozesses ein deutliches Schwindverhalten aufweisen. Werden diese Schwindverformungen während des Aushärtungsprozesses behindert, so werden hierdurch Spannungen hervorgerufen. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse verlaufen die maßgeblichen Schwindvorgänge in Richtung der Dübellängsachse. Dies ist leicht zu erkennen an der üblichen lunkenartigen Vertiefung an der Mörteloberfläche entlang des Bohrlochrandes. Mit einer Schwindneigung ist jedoch auch in tangentialer Richtung zu rechnen, weshalb mit dem Aufbau von Ringzug- bzw. Ringdruckspannungen gerechnet werden muss, da diese Schwindverformung sowohl durch den Kontakt zur Gewindestange als auch durch die Bindungskräfte zwischen Mörtel und Beton behindert werden. Letztlich ist auch ein Schwinden in Dickenrichtung der Mörtelschicht gegeben. Dessen mögliche Auswirkungen werden jedoch, aufgrund der vergleichsweise geringen Dicke dieser Schicht, als gering eingeschätzt. Es ist denkbar, dass die aus den Schwindbestrebungen resultierenden Spannungen während des Aushärtevorganges die im Aufbau befindlichen Zugfestigkeiten bereichsweise überschreiten können, was entsprechend zur Folge hätte, dass bereits während des Aushärteprozesses eine Vorschädigung des Mörtels eintritt.

#### III. Verschieden hohe Bindungskräfte entlang der Bohrlochwand

Wenn ein Dübelsystem durch Herausziehen versagt, dann wird dessen Systemfestigkeit in der Regel über die maximal erreichte, mittlere Verbundspannung charakterisiert [26, 27]. Hierbei wird unterstellt, dass die Verbundspannungen stetig entlang der Verbundfläche verteilt sind. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die Bindungskräfte zwischen Verbundmörtel und dem porösen Zementstein sowie zwischen Verbundmörtel und den vergleichsweise glatten Oberflächen der angebohrten Zugschläge unterschiedlich groß sind [28, 29]. Ist dieser Unterschied ausgeprägt, dann ist es zudem wahrscheinlich, dass die tragschwachen Teile der Klebefläche bereits beim Aufbringen der hohen Prüflasten im Standzeitversuch versagen, wodurch die Belastung auf die tragfähig verbliebenen Klebeflächen und die darüber angeschlos-

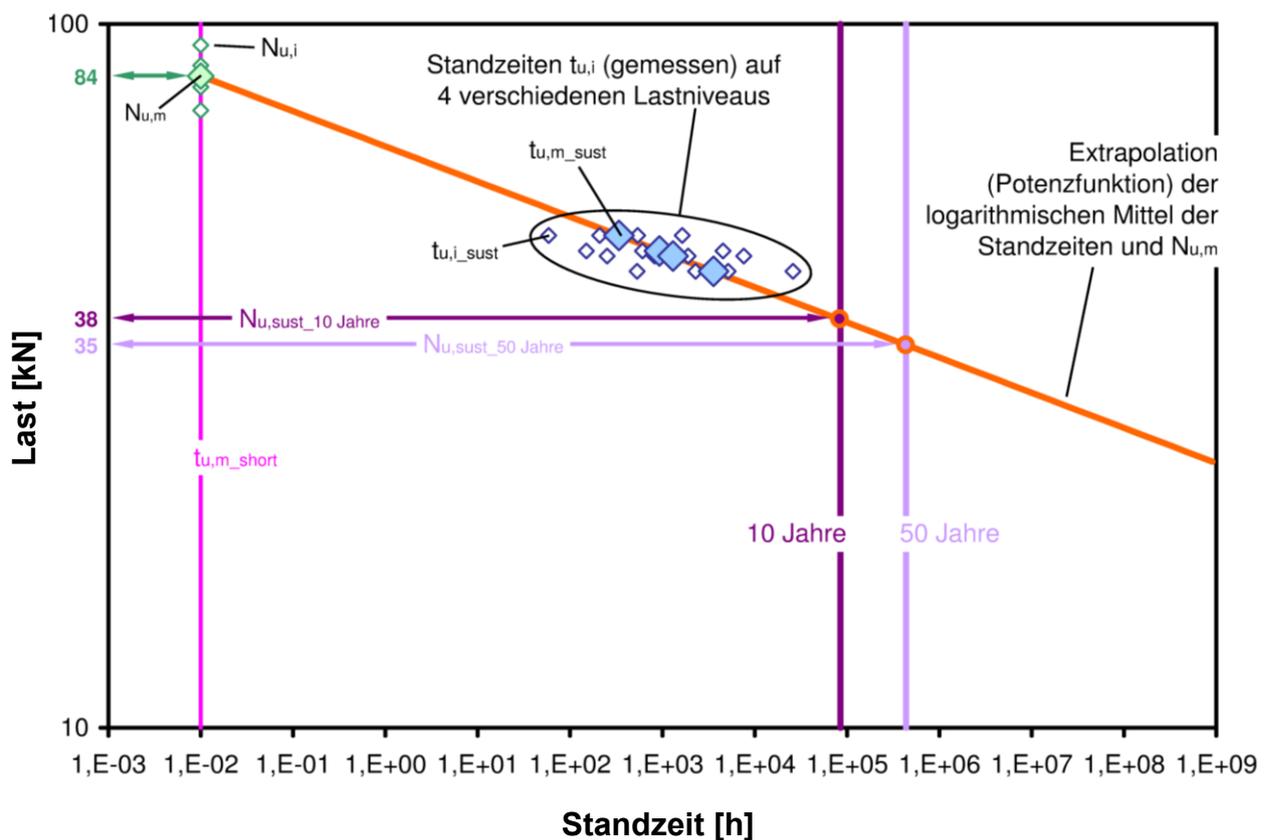
senen Teile der Mörtelschale entsprechend ansteigt. Es ist anzunehmen, dass infolge von Kerbwirkung, ausgehend von den Grenzen zwischen versagten und nicht versagten Zonen, eine ständige Ausweitung dieser versagten Zonen entlang der Verbundfläche zwischen Mörtel und Beton erfolgt (vgl. Abbildung 3.4). Die Tragfähigkeit entlang der Einhüllenden der Gewindestange wäre dann nicht maßgeblich.

### 3.2.1.2 Messwertqualität der Verschiebungskurven

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen muss für das hier vorgeschlagene Standzeitverfahren gefordert werden, dass es praktisch ohne Kenntnis des Verschiebungsverhaltens des Verbunddübels unter dauerhafter Lasteinwirkung anwendbar ist. Die Vorhersage von Standzeiten für beliebige Lastniveaus muss einzig durch die Ermittlung tatsächlicher Standzeiten und die geeignete Extrapolation des hieraus abgeleiteten Versagensverhaltens möglich sein. Die Notwendigkeit eines Rückgriffs auf das konkrete Verschiebungsverhalten würde erforderlichenfalls das gesamte Verfahren in Frage stellen. Die Gründe hierfür sind identisch wie beim Prüfverfahren nach ETAG bzw. AC (vgl. Kapitel 2).

### 3.2.2 Ermittlung der Standzeitkurve

Diagramm 3.3 zeigt exemplarisch den Idealfall des Verlaufs einer Standzeitkurve im doppelt-logarithmischen Maßstab:



**Diagramm 3.3:** Standzeitprognose mittels Extrapolation auf Basis einer Potenzfunktion im doppelt-logarithmischen Maßstab

Die Ermittlung der Standzeitkurve erfolgt auf einfache Weise durch das Auftragen der einwirkenden Last über der ermittelten Standzeit. Unter Zuhilfenahme der Bruchkräfte  $N_{u,i}$  aus den kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen als zusätzliche Stützpunkte der Standzeitkurve in Bereich kürzester Standzeiten kann mittels einer geeigneten Extrapolation (hier mittels einer Potenzfunktion) eine Prognose der 10- bzw. 50-Jahres-Festigkeit

durchgeführt werden, die als Basis für ein dauerfestigkeitsbasiertes Bemessungskonzept dienen kann.

### **3.2.2.1 Interpretation kurzzeitiger, zentrischer Zugversuche**

Die kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche bis zum Bruch dienen der Ermittlung des ersten Stützpunktes der Standzeitfunktion. Die Versuchsdauer beträgt ca. 90 Sekunden, in denen die Last stetig gesteigert wird, bis das Versagen eintritt. Der hierbei ermittelte Lastwert darf dabei nicht als „90-Sekunden“ Standzeit interpretiert werden. Vielmehr ist zu berücksichtigen, dass das System vor Erreichen der Kurzzeitfestigkeit den überwiegenden Teil der Versuchszeit mit nur geringen bis mittleren Lastniveaus belastet ist, welche wiederum nur geringen Anteil an einer zeitabhängigen Gesamtschädigung haben. Die Berücksichtigung als „90-Sekunden“ Standzeit würde demnach quasi eine unendlich schnelle Belastung auf das Ziellastniveau unterstellen, woraufhin nach 90 Sekunden das Versagen eintritt. Je kürzer jedoch die Standzeit ist, desto größer ist der anteilige Einfluss aus der Belastungsgeschichte anzunehmen.

## **3.3 Eigenschaften des Standzeitverfahrens**

Das Standzeitverfahren in der hier vorgestellten Form weist theoretisch, gegenüber dem bisherigen Verfahren nach ETAG bzw. AC, offensichtliche Vorteile auf:

### **Vorteil 1:**

Das Versagen ist im Last-Verschiebungsdiagramm eindeutig bestimmbar. Es ist kein künstliches Ersatzkriterium zur Definition des Systemversagens erforderlich. Die Genauigkeit der fehlerbehafteten Wegmessung spielt keine Rolle.

### **Vorteil 2:**

Es ist keine genaue Kenntnis des Verschiebungsverhaltens des Verbunddübel-systems unter dauerhafter Lasteinwirkung erforderlich.

Demgegenüber steht der Nachteil, dass das Verfahren ungleich aufwendiger in der Durchführung ist, da es vergleichsweise viele Versuche erfordert. Beiden gemein ist die Notwendigkeit einer Extrapolation. Diese ist erforderlich, um Standzeitprognosen für Lasten auf Gebrauchslastniveau durchzuführen. Die Funktion der Standzeiten in Abhängigkeit vom Lastniveau muss hierzu so genau wie möglich ermittelt bzw. auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden können.

## 4 Versuchstechnik

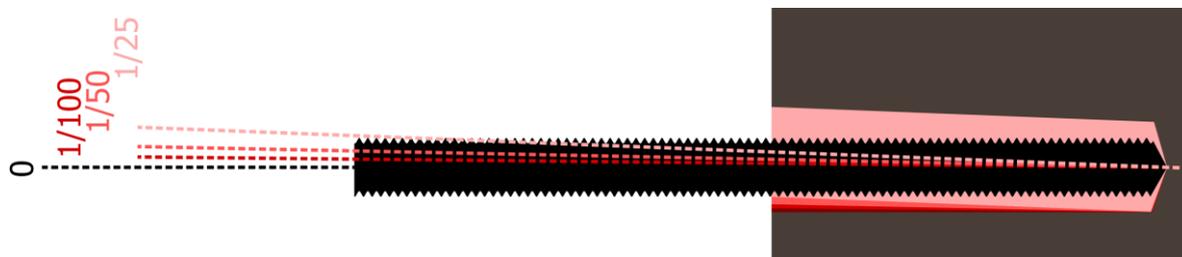
### 4.1 Entwicklung spezieller Versuchstechnik

Für eine korrekte Interpretation von Versuchsergebnissen müssen sämtliche Details der Versuchstechnik, der Messtechnik sowie der Art und Weise der finalen Aufbereitung der Rohdaten bekannt sein. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten die detaillierten Beschreibungen der maßgeblichen versuchs- und messtechnischen Randbedingungen.

### 4.2 Versuchstechnik für die Versuchsvorbereitung

#### 4.2.1 Vorrichtung zur zentrischen Bohrlocherstellung

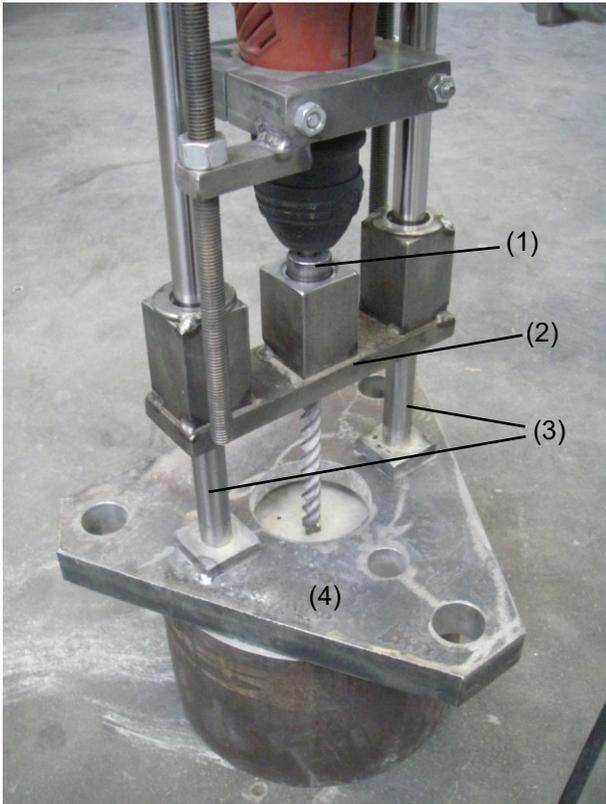
Die Lage der eingemörtelten Ankerstange im Bohrloch kann einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Dübel haben [30] und muss daher eindeutig definiert sein. Die Herstellung von Bohrlochern mit einer reproduzierbaren Qualität erfordert das Bohren mit einem Bohrgestell, das senkrecht zur Betonoberfläche eine achsparallele Führung entlang der Bohrerachse ermöglicht. Handelsübliche Bohrgestelle garantieren jedoch nur eine zur Betonoberfläche orthogonale Führung der Maschine selbst, nicht die des Bohrers. Aus dem Spiel zwischen Bohrer und Bohraufnahme kann hier durch ein Verkanten des Bohrers beim Ansetzen eine erhebliche Schiefstellung des Bohrlochs resultieren. Auch bei einem zunächst orthogonalen Ansetzen des Bohrers bezüglich der Betonoberfläche kann eine Schiefstellung entstehen, beispielsweise durch ein Abgleiten des Bohrerkopfes an einem Zuschlagskorn. Im Vorfeld der Untersuchungen wurden diesbezüglich zahlreiche Testbohrungen mit den verschiedenen, jedoch grundsätzlich gleichartigen Bohrmaschinenführungen des IWB durchgeführt. Die dabei festgestellten Bohrlochschiefstellungen waren dabei selten geringer als 1/50 (Verhältnis der Dübelkopfausmitte zur Dübellänge), häufig sogar im Bereich von 1/25 (Abbildung 4.1).



**Abbildung 4.1:** Winkelabweichung zwischen Dübel- und Bohrlochachse infolge schiefen Bohrens

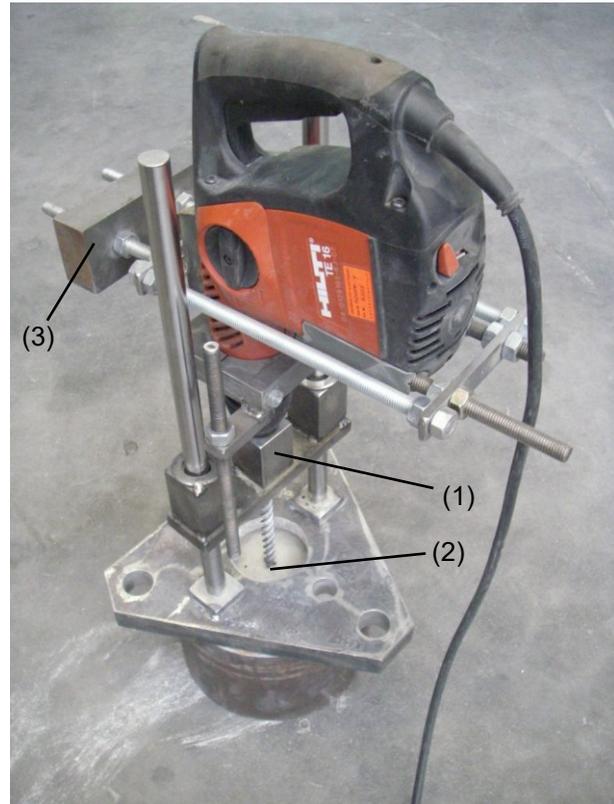
Aus diesem Grund wurde ein Bohrgestell entwickelt, das eine Führung des Bohrers selbst ermöglicht (siehe Abbildung 4.2). Die Abbildung zeigt die verwendete Führung der Bohrmaschine. Der Bohrer wurde in eine hohle Führungshülse aus Stahl (1) eingeklebt, die in einem Führungsschlitten (2) mittels Kugellagern längs verschieblich und in Drehrichtung spielfrei gelagert ist. Der Führungsschlitten ist über die zwei Führungsstangen (3) des Grundgestells (4) vertikal verschieblich kugelgelagert.

Zur Vermeidung exzentrischer Lasteinwirkung auf die Führung des Bohrers wurde der Bohrhammer mit einer speziellen Tariervorrichtung exakt über dem Bohrer ausbalanciert (siehe Abbildung 4.3). Die Bohrmaschine ist auf dem Führungsschlitten (1) geklemmt befestigt. Da der Schwerpunkt der Maschine nicht direkt über dem Aufstandspunkt (2) des Bohrers liegen würde, kann dieser mittels der Tariervorrichtung (3) justiert werden.



(1) Führungshülse, (2) Führungsschlitten, (3) Führungsstangen, (4) Grundgestell

**Abbildung 4.2:** Bohrmaschinenführung



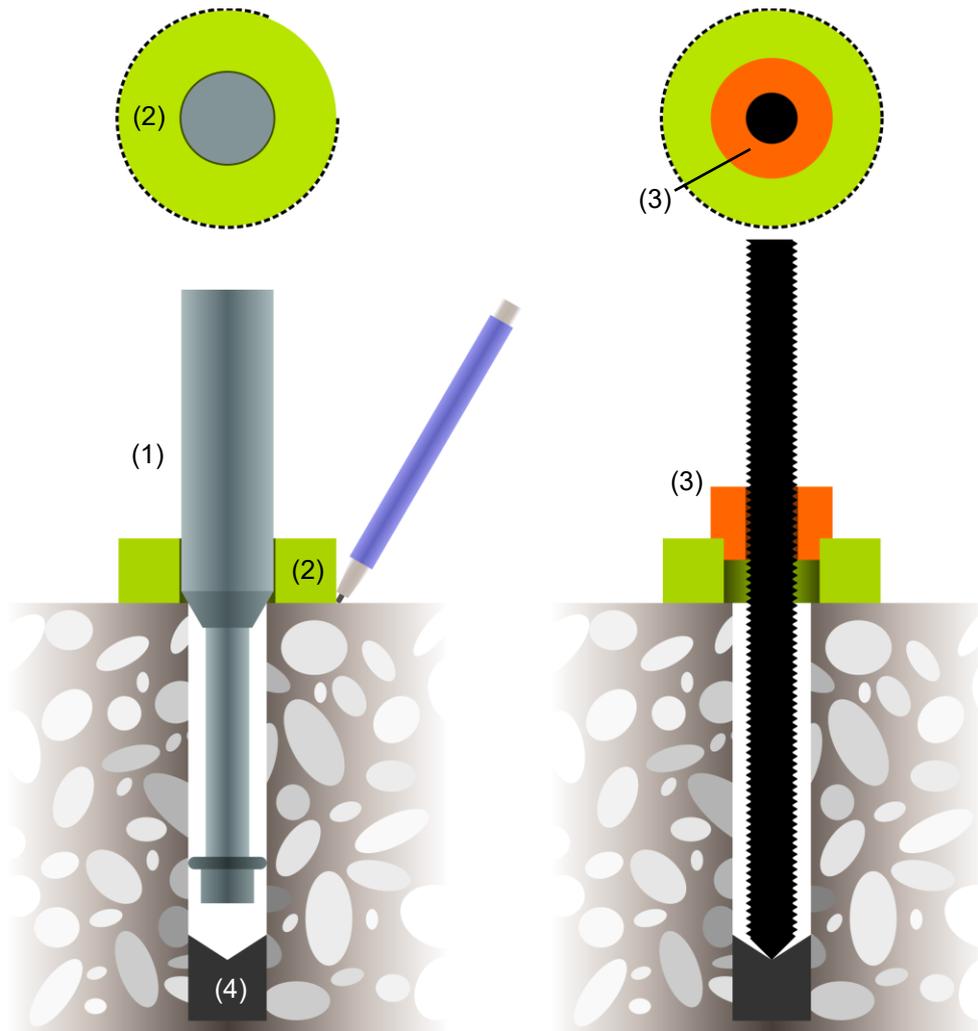
(1) Führungsschlitten, (2) Bohrer-aufstandspunkt, (3) Tariervorrichtung

**Abbildung 4.3:** Tariervorrichtung zum Ausbalancieren der Bohrmaschine über dem Bohrkopf

Die Abweichungen vom rechten Winkel, zwischen Dübelachse und Betonoberfläche, ließen sich mit Hilfe dieser Bohrerführung in der überwiegenden Zahl der Fälle signifikant reduzieren. Trotzdem erzwangen diesbezüglich vereinzelte „Ausreißer“ die Überprüfung jedes einzelnen Bohrlochs vor dem Setzen. Schiefstellungen  $> 1/50$  wurden hierbei nicht akzeptiert. In diesem Fall war ein Ersatzbohrloch zu erstellen.

#### 4.2.2 Dübelzentrierung

Das senkrechte Ausrichten des gesetzten Dübels bezüglich der Betonoberfläche erfolgt in der Praxis üblicherweise von Hand ohne Zuhilfenahme von Zentrierhilfen. Auf Baustellen erfolgt dies erfahrungsgemäß „nach Augenmaß“. Um jedoch den Einfluss der Schiefstellung im Rahmen dieser Forschungsarbeit zunächst so gering wie möglich zu halten, wurde eine einfache Vorrichtung zur Zentrierung der Gewindestange am Bohrlochgrund sowie am Bohrlochrand entworfen, bestehend aus einer Zentrierhülse, einem Zentrierkolben und einem Zentrieradapter für die Gewindestange (siehe Abbildung 4.4). Der Zentrierbolzen (1) zentriert hierbei einen Zentrierring (2) über dem Bohrlochmund. Dessen Position wird markiert. Beim Setzen des Dübels wird dieser durch einen Zentrieradapter geführt (3), der auf den Zentrierring aufgesteckt wird. Auf dem Bohrlochgrund wird er mittels einer Zentrierhülse aus Kunststoff (4) mit einer kegelförmigen Aussparung zentriert. Der Zentrieradapter verbleibt in dieser Position, bis der Mörtel ungestört ausgehärtet ist.



(1) Zentrierbolzen, (2) Zentrierring, (3) Zentrieradapter, (4) Zentrierhülse

**Abbildung 4.4:** Vorrichtung zur Dübelzentrierung während des Setzvorgangs

### 4.3 Versuchstechnik für die Versuchsdurchführung

#### 4.3.1 Versuchsvorrichtungen für Versuche mit zentrischer Zuglasteinwirkung

Sowohl für die Durchführung von kurzzeitigen als auch von langzeitigen, zentrischen Zugversuchen wurden identische Versuchsvorrichtungen verwendet. Dies ermöglichte eine Durchführung von Versuchen unter absolut identischen Randbedingungen. Bei kurzzeitigen Versuchen wurden zur Kraftaufbringung die Tellerfederpakete (siehe unten) durch einen Hydraulikzylinder ersetzt. Die Versuchsstände wurden von Grund auf neu entwickelt. Hierbei waren folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- a) Lastniveaus bis 90 kN

Der elastische Traglastbereich der Gewindestange mit Durchmesser M12 und der Festigkeit 12.9 sollte voll ausgenutzt werden, um möglichst kurze Standzeiten realisieren zu können. Die rechnerische Streckgrenze liegt hier bei ca. 90 kN, weshalb dies als Mindestanforderung an die Maximalprüflast definiert wurde.

- b) Lastaufbringung

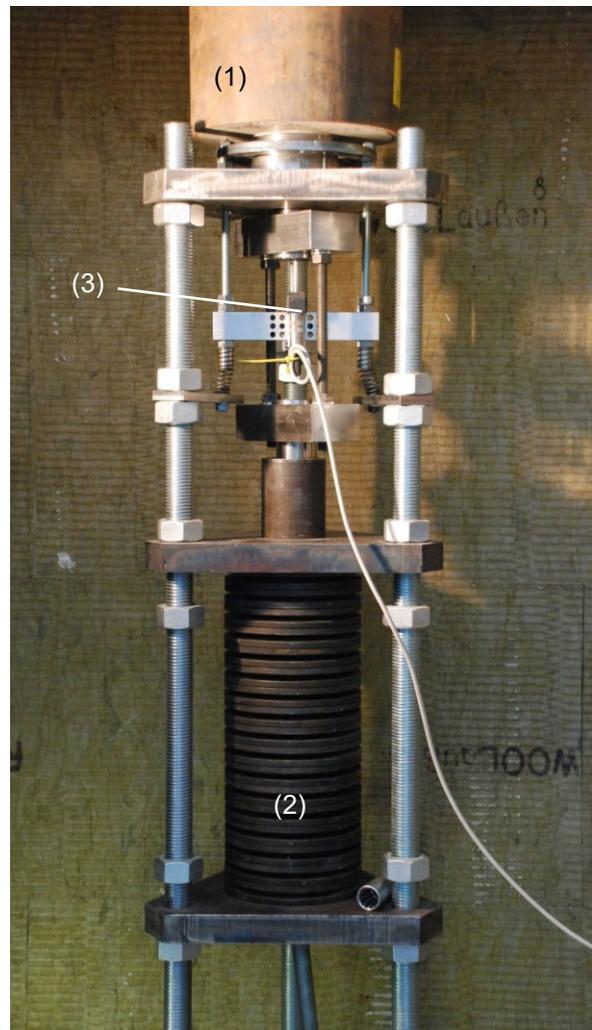
Die Lasten müssen schnell, aber kontrolliert aufgebracht werden können. Die Ziellast darf hierbei keinesfalls unplanmäßig überschritten werden.

- c) Kompakte Abmessungen

Die Versuchsstände müssen so kompakt sein, dass sie eingehaust werden können, um ein einfaches Aufheizen des gesamten Versuchsstands zu ermöglichen.

Abbildung 4.5 zeigt ein Foto eines der 60 Versuchsstände, die am IWB eigens für das Forschungsvorhaben entwickelt wurden. Dieser befindet sich in einer wärmeisolierten Kammer, in welcher der gesamte Versuchsstand, inkl. des Versuchskörpers (1), auf einer konstanten Temperatur bis maximal ca. 85°C gehalten und betrieben werden kann. Die Last wird mittels eines Tellerfederpakets (2) aufgebracht. Die Wegmessung funktioniert auf elektronischem Weg mittels eines Potentiometer-Wegaufnehmers (3), der direkt auf den Dübelkopf tastet und sein Signal kontinuierlich an eine Vielkanal-Messanlage übermittelt, deren Messwerte laufend mittels eines PCs aufgezeichnet werden.

Abbildung 4.6 zeigt Renderbilder des 3D-Modells der Versuchsstände mit einer farblichen Hervorhebung der einzelnen Funktionsgruppen. Er besteht aus 5 funktionalen Einheiten. Der Tripod (1) ist der Träger sämtlicher Komponenten. In diesen integriert ist das Tellerfederpaket mit dessen

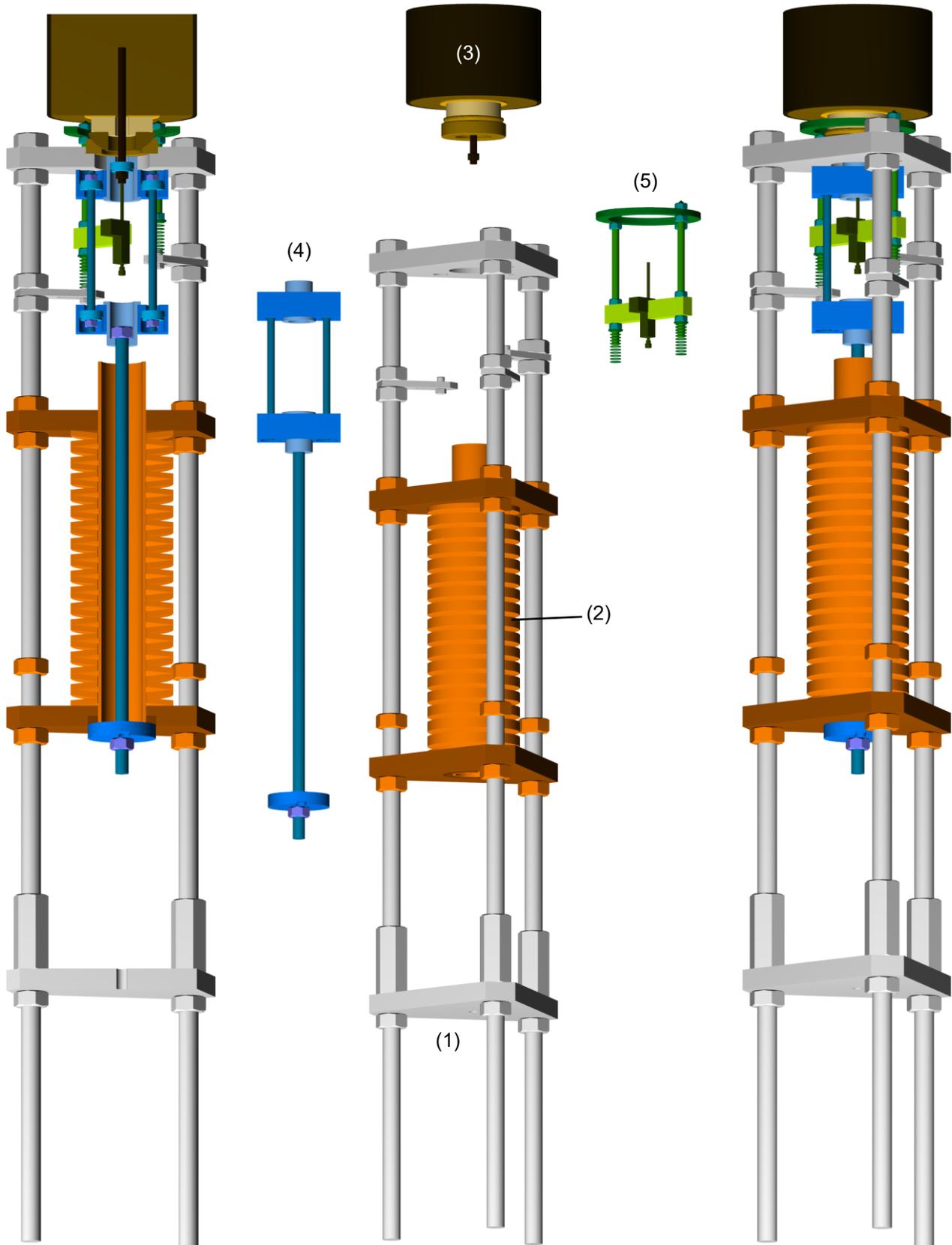


(1) Versuchskörper, (2) Tellerfederpaket,  
(3) Wegaufnehmer

**Abbildung 4.5:** neu entwickelter Versuchsstand am IWB

---

Lagerplatten (2). Auf den Tripod, kopfüber installiert, befindet sich der Versuchskörper mit Lagerkalotte (bei Bedarf) und Abstützplatte (3). Das Tellerfederpaket ist mit dem Dübel über die zentrale Zugvorrichtung (4) kraftschlüssig verbunden. In diese integriert ist ein Wechsel, der es ermöglicht, den Wegaufnehmer direkt zentrisch auf dem Dübelkopf zu platzieren. Der Wegaufnehmer ist auf einem Träger (5) installiert, der eine exakte Ausrichtung bezüglich des Dübels ermöglicht. Dieser Träger lagert an drei Punkten auf der Betonoberfläche auf und ist vom restlichen Versuchsstand durch Spiralfedern vertikal und horizontal entkoppelt. Die Lastaufbringung erfolgt durch handelsübliche Tellerfedern aus Stahl [31, 32]. Der zu verwendende Typ ist auf das jeweilige Ziellastniveau abzustimmen. Das Ziel dieser Abstimmung ist es, denjenigen Tellerfedertyp zu bestimmen, der das maximale Federweg/Kraft-Verhältnis ermöglicht, also unter der geforderten Zielast den maximalen Federweg aufweist. Die Anzahl der Federn ergibt sich aus den geometrischen Randbedingungen der Versuchsstände, da die Tellerfederaufnahme eine begrenzte Länge aufweist. Der Lastabfall bei den hier verwendeten Konfigurationen ist proportional zur Dübelverschiebung unter Dauerlast, und beträgt bei voller Bestückung der Federaufnahme maximal ca. 1% je 0,5 mm Dübelverschiebeweg. Die Versuchsstände wurden statisch und geometrisch zur Aufnahme von Tellerfedern mit einer maximal zulässigen Belastung von 150 kN ausgelegt. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche wurden Tellerfedern bis zu einer maximal zulässigen Belastung von 90 kN verwendet.



(1) Tripod, (2) Tellerfederpaket, (3) Versuchskörper, (4) Zugvorrichtung,  
(5) Wegaufnehmerhalterung

**Abbildung 4.6:** Funktionsgruppen (mittig), Schnitt (links) und Ansicht (rechts) der Dau-  
erlast-Versuchsstände am IWB



(1) Hydraulikzylinder, (2) Kraftmessdose

**Abbildung 4.7:** Belastungsvorrichtung zur Aufbringung der Versuchslasten

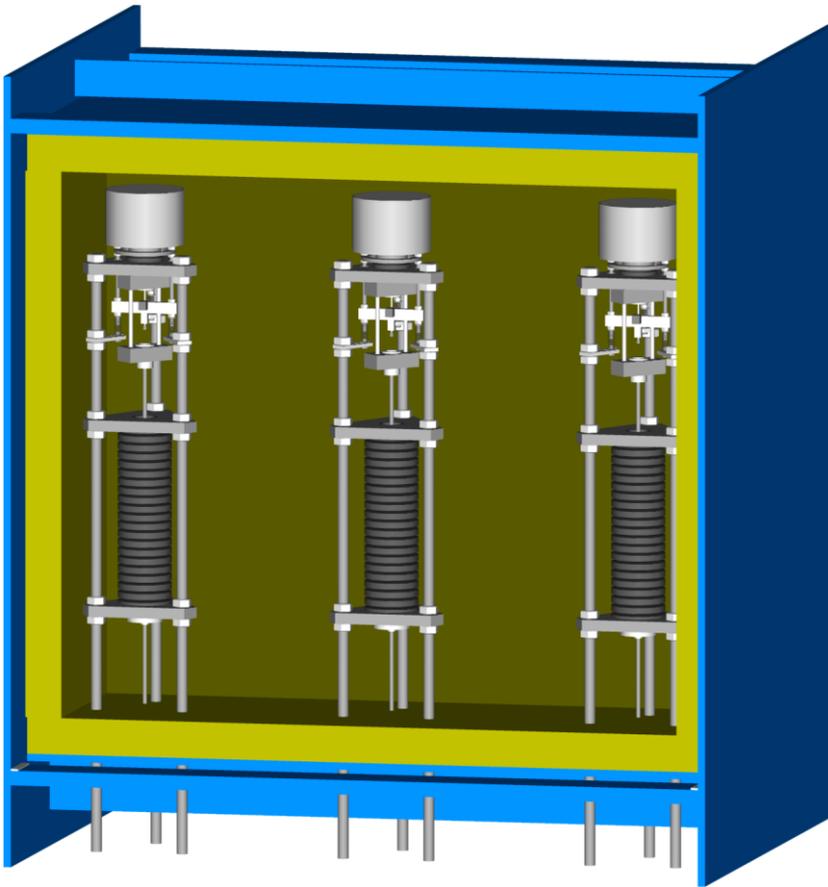


**Abbildung 4.8:** installierte Belastungsvorrichtung

Abbildung 4.7 zeigt die Belastungsvorrichtung zur Umlagerung der Prüflast von dem vorgespannten Tellerfederpaket auf den Dübel. Sie ermöglicht eine gefahrlose Bedienung des Systems während des Belastungsvorganges für den Fall, dass der Dübel bereits hierbei versagt. Unterhalb der zwei zu erkennenden Hydraulikzylinder (1) befindet sich eine Kraftmessdose (2), welche die exakte Kontrolle des Belastungsvorganges ermöglicht. Abbildung 4.8 zeigt die im Versuchsstand installierte Belastungsvorrichtung. Deren entscheidende Eigenschaft für die Qualität der Versuchsergebnisse besteht darin, dass der gesamte Versuchsstand, inklusive des Versuchskörpers, während des Belastungsvorganges bereits seine volle Lastdehnung erfährt und sich somit beim Entlasten der Belastungsvorrichtung hieraus keine Spannkraftverluste ergeben.

#### 4.3.2 Umhausung

Zur Durchführung von Versuchen bei erhöhten Temperaturen (max. 85°C) ist eine Umhausung der Versuchsstände erforderlich, innerhalb derer eine konstante Prüftemperatur sichergestellt ist. Zu diesem Zweck wurden spezielle Wärmekammern entwickelt, durch die selbst beim Aufstellen im Freien jederzeit eine konstante Prüftemperatur aufrechterhalten werden kann. Zum Einsatz kamen 6 große Wärmekammern, die in der Lage sind, vollständige Versuchsserien aufzunehmen (Abbildung 4.9) sowie 24 Einzelkammern, mit denen einzelne Dübel bei Bedarf separat getestet werden können (Abbildung 4.10).



**Abbildung 4.9:** wärmedämmte und beheizbare Versuchskammer mit einem Fassungsvermögen von maximal 2 x 5 Versuchsständen



**Abbildung 4.10:** Wärmekammer für Einzelversuche

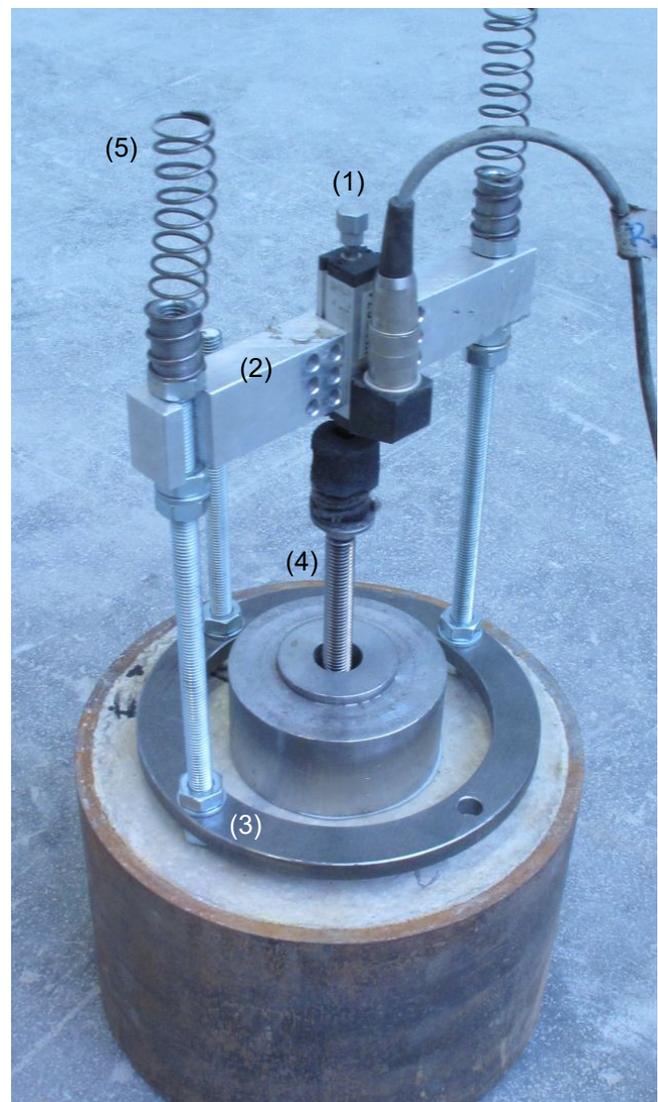
### 4.3.3 Heiztechnik

Die Prüftemperatur hat bei der Durchführung von Dauerlastversuchen an Dübelssystemen mit lastübertragenden Teilen aus Kunststoff (Kunststoffdübel, Verbunddübel) maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse, da die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen in höchstem Maße temperaturabhängig sind. Sie beeinflusst nicht nur die Standzeit des Dübelsystems, sondern auch unmittelbar den Verlauf der Messkurve, selbst bei nur geringen Schwankungen. Temperaturschwankungen haben zudem deutlich messbaren Einfluss auf das Messsystem selbst. Zur Vermeidung derartiger Effekte wurde eine Temperaturregelung vorgesehen, mit welcher die Schwankungen der Lufttemperatur in den Wärmekammern auf  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  begrenzt werden konnten. Die tatsächliche Temperaturschwankung entlang der Verbundzone zwischen Dübel und Beton konnte hiermit auf ca.  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  begrenzt werden, bei einer Prüftemperatur von  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 4.3.4 Messtechnik

#### 4.3.4.1 Wegaufnehmer

Die Wegmessung erfolgte mittels Potentiometer-Wegaufnehmern (siehe Abbildung 4.11). Diese leiten das Messsignal an einen Messlogger weiter. Im Bild ist der Wegaufnehmer (1) in der Messbrücke (2) geklemmt, auf dem Messgestell (3) installiert und zentrisch auf dem Dübel (4) ausgerichtet. Das Messgestell lagert an drei Punkten auf der Betonoberfläche auf. Da das System im Versuchsstand kopfüber eingebaut ist, wird es mittels Spiralfedern (5) von unten gegen den Versuchskörper gedrückt. Die Spiralfedern (hier 2 von 3 Stück montiert) bilden gleichzeitig die horizontale Entkopplung der Messvorrichtung vom restlichen Versuchsstand. Hierdurch bleibt diese von Erschütterungen der Versuchsstände weitgehend unbeeinflusst. In Vortests wurden diese Wegaufnehmer auf ihre Langzeitstabilität unter erhöhter Temperatur getestet. Ein Einfluss konnte nicht festgestellt werden.

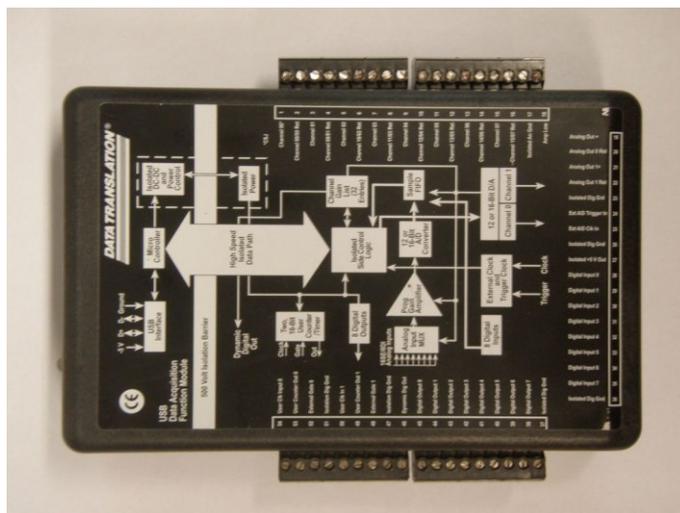


(1) Wegaufnehmer, (2) Messbrücke,  
(3) Messgestell, (4) Dübel, (5) Spiralfeder

**Abbildung 4.11:** Wegaufnehmer mit Messbrücke und Messgestell

### 4.3.4.2 Datenerfassung

Die Datenerfassung wurde mittels handelsüblicher Systeme zur Messung elektrischer Spannungen durchgeführt. Ein Messlogger (Analog/Digital-Wandler, siehe Abbildung 4.12) misst die elektrischen Spannungen der Wegaufnehmer und leitet sie digital an die Messsoftware weiter, die auf einem handelsüblichen PC installiert ist. Dabei erfolgte der Werteabgriff kontinuierlich in einem Intervall von 10 Minuten. Auf dem PC werden die Daten mehrerer Logger zusammengeführt und in einer Messwertdatei abgelegt.



**Abbildung 4.12:** verwendete Messlogger der Fa. Data-Translation

### 4.3.5 Auswertung

#### 4.3.5.1 Normierung auf eine Standardversorgungsspannung

Die gemessenen Rohdaten in Form von Spannungswerten [V] enthalten sowohl Spannungsänderungen infolge der Verschiebungen der Wegsensoren als auch Spannungsänderungen aufgrund weiterer äußerer Einflüsse. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Effekte, die infolge einer Temperaturänderung der Geräte zur Spannungsversorgung sowie der Messgeräte selbst auftreten. Durch Aufheizen oder Abkühlen dieser Geräte ändert sich in einem geringen Maße deren innerer elektrischer Widerstand, was im Fall der Spannungsversorgung zu einer geringen aber messbaren Schwankung der Versorgungsspannung führt und im Fall der Messgeräte zu einer Änderung der Empfindlichkeit des Messkerns. Da die Versorgungsspannung permanent mitgemessen wird und die Einflüsse in den Messwerten der Wegaufnehmer im Verhältnis der gemessenen Spannungen zur Versorgungsspannung enthalten sind, kann durch eine Normierung der Werte auf die Soll-Versorgungsspannung (hier 9 Volt) zu jedem Zeitpunkt eine Korrektur sämtlicher Messwerte der Wegaufnehmer erfolgen, durch welche die beschriebenen Effekte eliminiert werden.

#### 4.3.5.2 Justierung der Messwerte

Nach der Normierung der Messwerte bezüglich der Versorgungsspannung erfolgt die Umrechnung von Volt [V] in eine absolute Position des Wegaufnehmers. Hierbei wird eine ideal-lineare Abbildung des Spannungsbereichs von 0 bis 9 Volt auf den Wegbereich des Aufnehmers von 0 bis 28,9 mm angenommen.

#### 4.3.5.3 Kompensation der Stahldehnung des Dübelüberstandes

Zur Beurteilung des Verschiebungsverhaltens eines Verbunddübelssystems unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung dient dessen Verschiebung bezüglich der Betonoberfläche. Da die Messung jedoch auf den Dübelkopf erfolgt und die Last am Dübel in einem Abstand von der Betonoberfläche ansetzt (hier: 90 mm), enthält der gemessene Wert die Dehnung des Gewindestangenabschnitts dazwischen. Dieser muss folglich lastabhängig kompensiert werden. Die Kompensation erfolgt dabei jeweils auf Basis der zuvor ermittelten Längssteifigkeiten der beiden verschiedenen Gewindestangenchargen der Festigkeitsklassen 10.9 und 12.9. Hierbei wird von jedem Messwert der Dehnungsweg des Gewindestangenüberstands unter der gegebenen Last subtrahiert.

#### 4.3.5.4 Datenreduktion

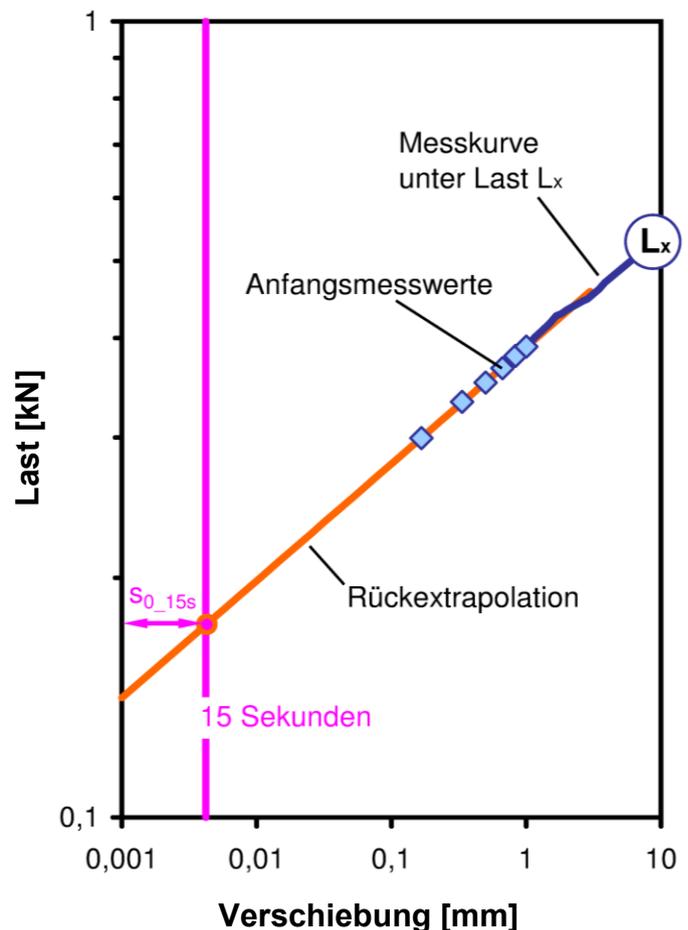
Die Auswertung der Daten erfolgte ausschließlich mit einer handelsüblichen Tabellenkalkulation. Das kurze Speicherintervall der Messwerte von 10 Minuten macht hierbei in einem ersten Schritt aus technischen Gründen eine Reduktion der Datenmenge erforderlich. Die Darstellung und Auswertung findet daher final in einem Intervall von 1 Stunde statt, wobei die Zwischenwerte eliminiert wurden. Die Aussagekraft ist hierdurch nicht eingeschränkt.

#### 4.3.5.5 Ermittlung der Anfangsverschiebungen im Dauerlastversuch

Aus technischen Gründen war es bei den durchgeführten Dauerlastversuchen nicht möglich, die Anfangsverschiebungen während des Belastungsvorgangs aufzuzeichnen. Bei den Standzeitversuchen in Kapitel 6 erfolgte die erste Messwernerfassung des Verschiebewegs zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der ersten 10 Minuten nach Beginn des Belastungsvorgangs. Um eine Vergleichbarkeit mit den Verschiebungen der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche herzustellen, wurde der Versuchsablauf zu Beginn der Dauerlastversuche für die Versuche in Kapitel 7 derart standardisiert, dass die erste Messwernerfassung grundsätzlich ca.

120 ( $\pm 10$  Sekunden) nach Beendigung des grundsätzlich ca. 15-sekündigen Belastungsvorgangs erfolgte. Für den Vergleich mit den Verschiebungen aus den kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen erfolgte die Ermittlung der Verschiebung zum Ende des Belastungsvorgangs durch eine Rückwärtsextrapolation des zeitabhängigen Verschiebungsverhaltens der ersten Versuchsstunde. Für die Rückwärtsextrapolation wurde jeweils der Extrapolationsansatz mit der besten Annäherung an die Verschiebungskurve gewählt. Das Verfahren ist in Diagramm 4.1 dargestellt. Verschiebungswerte, die mittels Rückwärtsextrapolation gewonnen werden, sollten annähernd denjenigen Verschiebungen entsprechen, die auf dem entsprechenden Lastniveau im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche auftreten. Dies konnte in der Regel beobachtet werden. In Ausnahmefällen war dies jedoch eindeutig nicht der Fall. Die durch Rückwärtsextrapolation der Verschiebungen prognostizierten Anfangsverschiebungen übertrafen hierbei diejenigen der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche zum Teil erheblich. Unterstellt man, dass die Anfangsverschiebungen unmittelbar nach Beendigung des Belastungsvorgangs tatsächlich hierbei auch denjenigen der Kurzzeitversuche entsprachen, so bedeutet dies, dass innerhalb der ersten Versuchsmi-

nuten eine kurzzeitige übermäßige Verschiebung stattgefunden haben muss, die sich im anschließenden Verschiebungsverhalten nicht mehr abzeichnet, außer durch ihren abso-

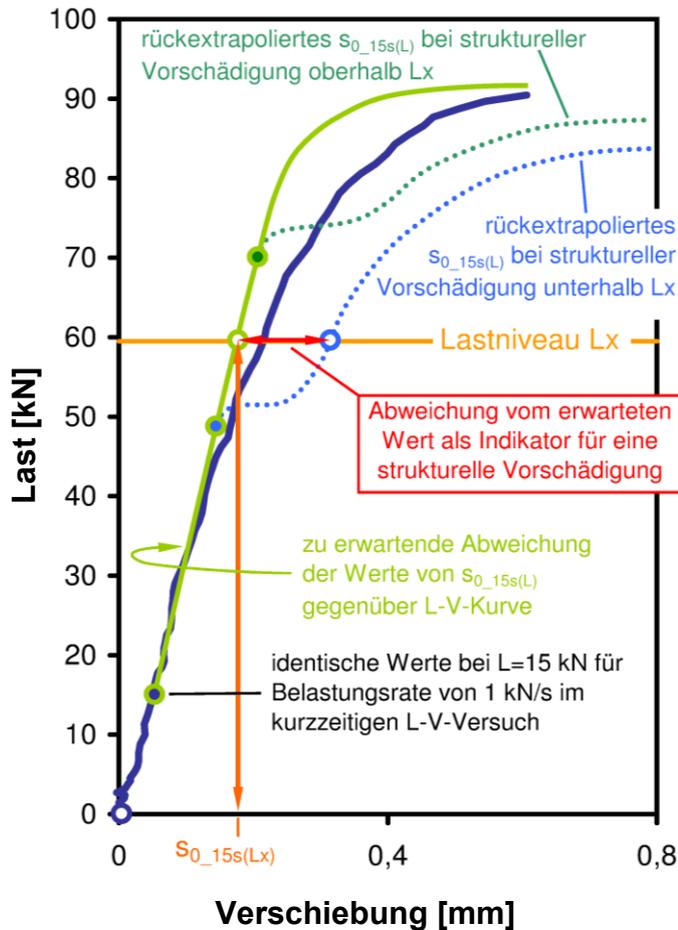


**Diagramm 4.1:** Bestimmung der Anfangsverschiebungen durch Rückwärtsextrapolation des Verschiebungsverhaltens der ersten ermittelten Messpunkte

luten Verschiebungsanteil. Diagramm 4.2 stellt diesen Sachverhalt dar. Ausgehend von der Last-Verschiebungskurve eines idealen Systems, das bis zur Streckgrenze keine strukturelle Schädigung aufweist, sind zum Vergleich hiervon abweichende Verläufe für die Kurve der rückwärtsextrapolierten 15-s-Anfangsverschiebungen aufgeführt, einmal unter Annahme einer strukturellen Schädigung bereits unterhalb des betrachteten Lastniveaus  $L_x$  und einmal darüber.

#### 4.3.5.6 Standzeitermittlung aus Kurzzeitversuchen

Es ist praktisch nicht möglich aus der 90-sekündigen Belastungsgeschichte der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche nachvollziehbar eine äquivalente Standzeit abzuleiten. Diese wird daher an dieser Stelle mit einem Schätzwert von 15 Sekunden definiert.



**Diagramm 4.2:** Abweichungen zwischen gemessenen und extrapolierten Anfangsverschiebungen infolge struktureller Vorschädigung des Dübelsystems

## 5 Standards der Versuchsdurchführung

### 5.1 Komponenten- und Verfahrensstandards

Nachfolgend sind die Komponenten und Verfahren erläutert, die in den durchgeführten Untersuchungen standardmäßig verwendet wurden. Sofern in Versuchen von diesen Standards abgewichen wurde, ist dies jeweils an entsprechender Stelle dokumentiert.

#### 5.1.1 Mörtelsysteme

Die Untersuchungen wurden jeweils an zwei handelsüblichen epoxidharzbasierten sowie an zwei handelsüblichen vinylesterbasierte Mörteln durchgeführt. Es handelt sich hierbei um Systeme, die eine hohe Marktdurchdringung besitzen, wodurch eine entsprechend hohe Praxisrelevanz gegeben ist. Die Mörtel werden im Folgenden als Epoxy 1, Epoxy 2, Vinyl 1 und Vinyl 2 bezeichnet.

#### 5.1.2 Anker (Gewindestangen)

Die Versuche wurden generell mit Gewindestangen der Gewindegröße M12 gemäß DIN 976-1 durchgeführt [33]. Für diese Wahl war ausschlaggebend, dass es sich hierbei um den üblichen Durchmesser für die Referenzversuche im Rahmen von Zulassungsversuchen nach ETAG handelt. Im Bedarfsfall kann somit auf eine große Datenbasis hinsichtlich des Kurzzeitverhaltens der geprüften Mörtelsysteme zurückgegriffen werden. Die Gewindestangen waren galvanisch verzinkt, die Festigkeitsklasse war 10.9 für Dauerlastversuche und 12.9 für kurzzeitige Bruchversuche sowie Dauerlastversuche in Versuchskörpern aus Stahl. Weiter standen als Sonderanfertigung Gewindestangen der Sonderfestigkeit 14.9 zur Verfügung, die für kurzzeitige Bruchversuche in Versuchskörpern aus Stahl verwendet wurden. Diese konnten wegen einer erhöhten Gefahr von Wasserstoffversprödung nicht galvanisch verzinkt werden und erhielten alternativ eine Sprühverzinkung.

Üblicherweise werden die hier untersuchten Verbundmörtelsysteme mit vorkonfektionierten Ankern vermarktet. Dabei handelt es sich um bereits abgelängte, handelsübliche, metrische Gewindestangen verschiedener Abmessungen, deren zu verankerndes Ende meist werksseitig angepasst ist. Stattdessen wurden die Gewindestangen durch das IWB in ausreichender Menge selbst beschafft. Die als Meterware gelieferten Gewindestangen wurden für den jeweiligen Versuch passend abgelängt und die zu verankernden Enden entsprechend mit einem Zentrierkegel versehen. Dieser gewährleistet in Kombination mit einer zugehörigen Zentrierhülse die zentrische Positionierung des Ankers am Bohrlochgrund (vgl. Abbildung 4.4). Beim Ablängen wurde darauf geachtet, dass der Wärmeeintrag in belastete Teile der Gewindestange (im Bereich der Zugmutter und unterhalb davon) minimiert blieb, um eine Entfestigung des Stahls zu vermeiden. Das luftseitige Ende der Gewindestange wurde rechtwinklig zur Dübelachse plangeschliffen. Vor dem Setzen wurden die Anker mit Aceton gereinigt.

#### 5.1.3 Bohrer

Zur Bohrlocherstellung wurden vierschneidige Hammerbohrer mit den nominellen Bohrereckmaßen  $d_{\text{cut,nom}} = 13, 14$  (Standard), 18 und 24 mm verwendet. Die tatsächlichen Bohrereckmaße entsprachen jeweils der Definition von  $d_{\text{cut,m}}$  nach ETAG.

#### 5.1.4 Bürsten

Es wurden ausschließlich Drahtbürsten verwendet. Sämtliche Bürsten entstammten dem System des Verbundmörtels Epoxy 1 und wurden projektübergreifend bei allen durchgeführten Versuchen angewendet. Der Durchmesser orientierte sich an den Vorgaben des Herstellers zum jeweiligen Bohrlochdurchmesser.

### 5.1.5 Versuchskörper

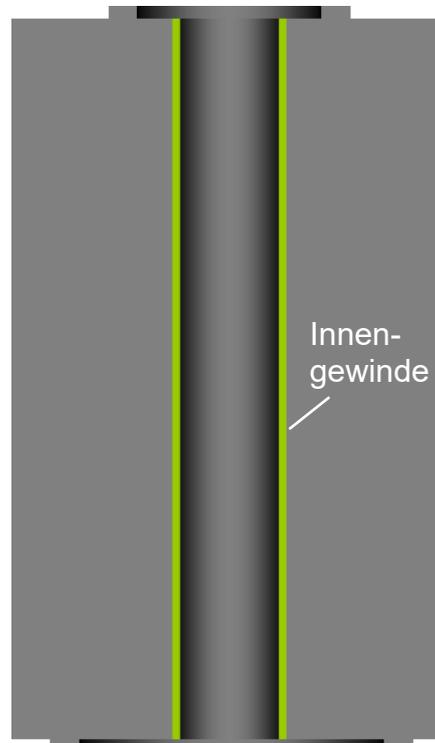
Zur platzsparenden und kostengünstigen Durchführung von kurz- und langzeitigen, zentrischen Zugversuchen mit einer engen Abstützung wurden am IWB bereits vor Längerem spezielle Beton-Versuchskörper entwickelt. Bei der Herstellung dieser Körper wird der Frischbeton in eine zylindrische Schalung aus Stahlrohrabschnitten eingebracht (Innendurchmesser = 210 mm, Höhe = 150 mm, Wandstärke = 4,5 mm) und auf einem Rütteltisch verdichtet. Der Beton verbleibt bei der Versuchsdurchführung in dieser Stahlschalung. Diese nimmt die auftretenden Ringzugkräfte auf und verhindert hierdurch ein Spalten des Betons (vgl. Abbildung 5.1).

Sämtliche Versuche wurden mit Normalbeton der Festigkeitsklasse C20/25 nach DIN 1045-1 bzw. DIN EN 206-1 [34, 35] durchgeführt. Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte durch die Fa. Rau-Betonfertigteile GmbH & Co. KG, Ebhausen.

Die Versuche wurden in fünf verschiedenen Betonchargen durchgeführt (C1 bis C5). Neben den Versuchskörpern der Chargen C1, C2, C3 und C4, die jeweils eigens für die hier durchgeführten Untersuchungen hergestellt wurden, mussten für Teile der Ringspaltversuche und für die Versuche zur Bestimmung des Feuchteinflusses (siehe Kapitel 7) auf Versuchskörper zurückgegriffen werden, die über keine eindeutige Chargenkennung verfügten (C5). Informationen zum Herstellungsdatum liegen hier nicht vor. Ebenso existieren keine Angaben zu Betonfestigkeiten, die über die reine Angabe der Festigkeitsklasse C20/25 hinausgehen. Betonwürfel zur Bestimmung der Betondruckfestigkeiten waren nicht vorhanden. Da insbesondere der Vorrat an ausgetrockneten Versuchskörpern sehr begrenzt war, wurde entschieden, hiervon keine Körper zur Festigkeitsbestimmung zu verbrauchen. Da die hiervon betroffenen Versuche mit enger Abstützung durchgeführt wurden, werden die möglichen Festigkeitsschwankungen innerhalb der Festigkeitsklasse als vernachlässigbar angenommen.



**Abbildung 5.1:** Versuchskörper aus Beton in Form eines ausbetonierten Stahlrings (hier mit installiertem Dübel und Druckplatte)



**Abbildung 5.2:** Schnitt durch den zylindrischen Versuchskörper aus Stahl (SIS-Versuchskörper,  $\varnothing$  90 mm)

Den Ergebnissen der Untersuchungen vorausgreifend kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass der Einfluss der Betonfestigkeit als untergeordnet zu betrachten ist, da Parameter mit weit höherem Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen existieren. Angaben zu Betonfestigkeiten finden sich, sofern vorhanden, in den tabellari-schen Übersichten zu sämtlichen Versuchsparametern im Anhang.

Im Rahmen von Untersuchungen zur Verbundqualität zwischen Verbundmörteln und Beton wurden spezielle zylindrische Versuchskörper aus Stahl entwickelt (siehe Abbildung 5.2), die jeweils mit einer zentrischen Bohrung mit durchgehendem, metrischen Innenfeingewinde versehen waren, in welches der Mörtel injiziert und der Dübel gesetzt wurde. Das Innenfeingewinde stellt dabei sicher, dass der Lastübertrag vom Mörtel in den Stahl maßgeblich durch Formschluss, anstatt durch Stoffschluss erfolgt. Hierdurch wird erreicht, dass die beobachtete Verschiebung des Dübels während kurz- oder langzeitiger, zentrischer Zugversuche nicht von der Qualität der Klebung bzw. des Verbundes beeinflusst ist. Der Setzvorgang der Dübel unterscheidet sich hierbei nicht von demjenigen der Versuche in Beton.

## 5.2 Bohrlochreinigung

Bei Versuchen in Beton erfolgte die Reinigung des Bohrlochs unter Zuhilfenahme einer Handluftpumpe, einer Drahtbürste sowie eines Akkuschraubers. Die Drahtbürste wurde hierbei direkt in die Bohreraufnahme des Schraubers gespannt. Der Reinigungsvorgang entsprach dabei grundsätzlich dem folgenden Schema:

3 x 3 Ausblasvorgänge, 5 Bürstvorgänge, 3 x 3 Ausblasvorgänge

Die Ausblasvorgänge erfolgten der Reihe nach am Bohrlochgrund sowie jeweils am unteren und oberen Drittelpunkt der Einbindetiefe mit jeweils drei kräftigen Luftstößen mit der Handpumpe. Die Bürstvorgänge erfolgten, bei mäßiger Drehzahl des Akkubohrers, durch mehrmaliges gleichmäßiges Einführen und Herausziehen der Bürste. Bei Versuchen in Stahlkörpern wurden die Innengewinde mit Aceton gereinigt.

## 5.3 Setzen des Dübels

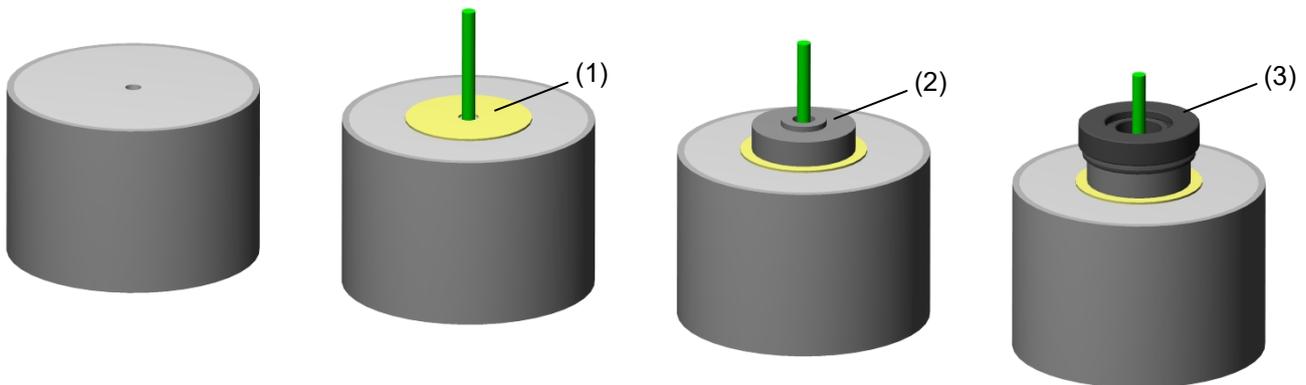
Das Injizieren des Mörtels erfolgte, am Bohrlochgrund beginnend, unter gleichmäßigem Herausziehen der Mischerspitze und gleichmäßiger Abgabe des Mörtels, bis ca. 2/3 des Bohrlochvolumens mit gebrauchsfertig durchmischtem Verbundmörtel gefüllt waren. Anschließend wurde die Gewindestange, unter ständigem Hin- und Herdrehen um ca.  $\pm 90^\circ$  um die Dübellängsachse, langsam (!) eingeführt, bis sie am Bohrlochgrund auf der Zentrierhülse aufsaß, die dort zuvor platziert wurde. Die Erfahrung hiermit zeigt, dass hierdurch der Einschluss großer Luftblasen bei den getesteten Mörteln weitgehend vermieden werden kann. Sofort im Anschluss wurde die Gewindestange anhand der zuvor erstellten Hilfsmarkierung (vgl. Kapitel 4.2.2) bezüglich des Bohrlochrandes ausgerichtet und zum Aushärten ruhiggestellt. Unabhängig vom Mörteltyp wurde generell eine Aushärtezeit von 24 h vorgesehen, bei einer Lagertemperatur von 20°C. Hierdurch ist sichergestellt, dass die verwendeten Verbundmörtel ihre Gebrauchsfestigkeit vor der Belastung erreicht haben.

## 5.4 Abstützung

### 5.4.1 Enge Abstützung

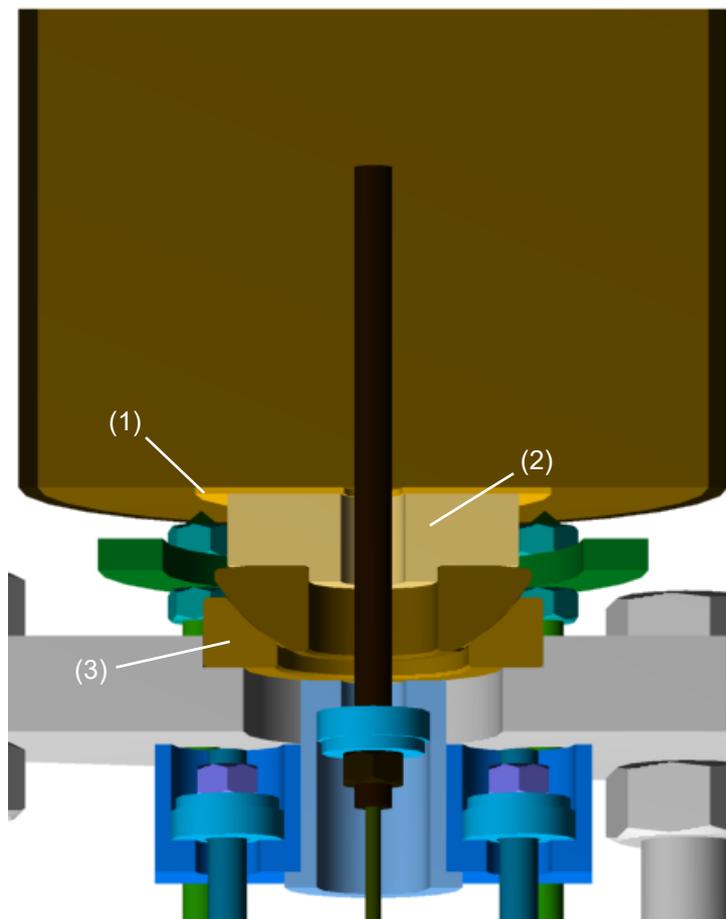
Die enge Abstützung wurde generell durch eine kreisrunde, zylindrische Abstützplatte aus Stahl realisiert. Diese hatte einen Außendurchmesser von 90 mm und einen Innendurchmesser des Bohrlochs von 28 mm. Die Dicke betrug 47 mm. Zwischen Abstützplatte und Beton wurde grundsätzlich eine einzelne Zwischenlage aus PTFE mit einer Dicke von 1,5 mm vorgesehen, welche die gesamte Pressfläche abdeckte (siehe Abbildung 5.3). Der in Abbildung 5.4 dargestellte Schnitt verdeutlicht die Einbausituation des

Versuchskörpers und der Komponenten der engen Abstützung im Versuchsstand. Die Installation erfolgt hierbei kopfüber. Zu erkennen sind die PTFE-Scheibe (1), die Abstützplatte (2) sowie die Kalotte (3), die der Ausrichtung der Dübelachse in Fluchrichtung der Zugvorrichtung dient.



(1) PTFE-Unterlage, (2) Druckplatte, (3) Kalotte

**Abbildung 5.3:** Komponenten der engen Abstützung

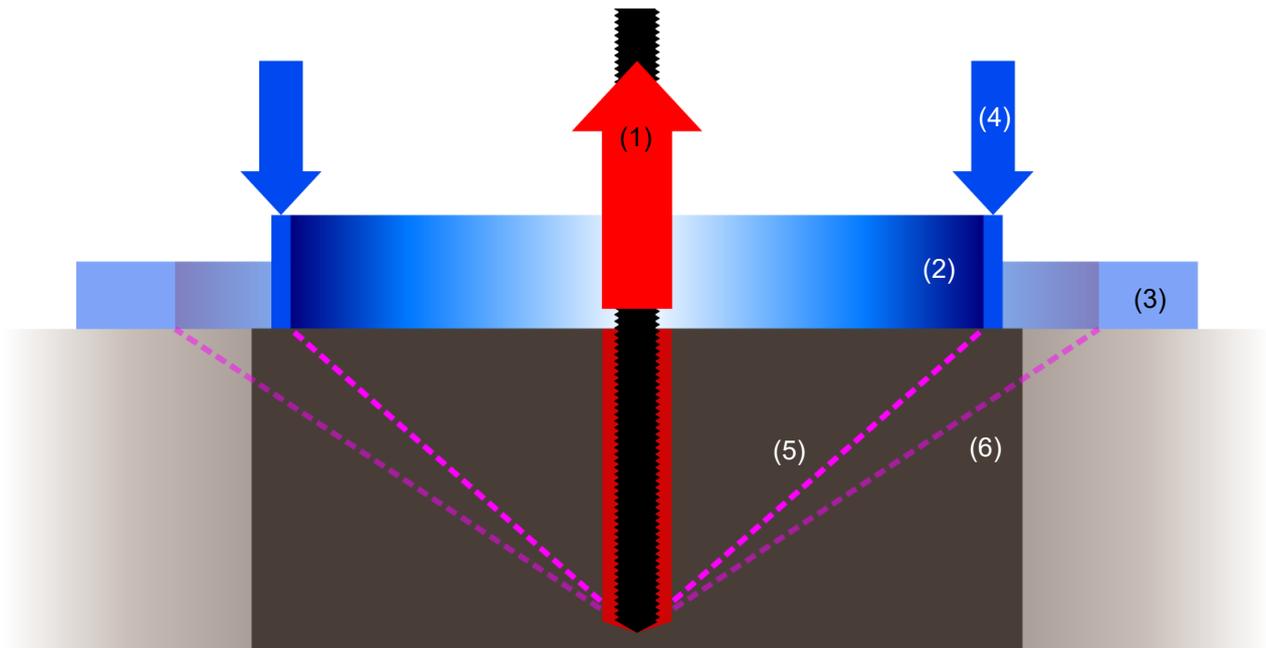


(1) PTFE-Unterlage, (2) Druckplatte, (3) Kalotte

**Abbildung 5.4:** Schnitt durch die enge Abstützung

## 5.4.2 Semi-weite Abstützung

Bei Versuchen mit weiter Abstützung ist die Abstützweite begrenzt durch den Durchmesser des verwendeten Versuchskörpers (ca. 200 mm). Bei einer standardmäßigen Einbindetiefe des Dübels von  $h_{ef} = 80$  mm handelt es sich hierbei im Grunde um eine „semi-weite“ Abstützung, da ein ungehinderter Betonausbruch, ausgehend vom Bohrlochgrund, nicht unbedingt gewährleistet ist. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist dies entsprechend zu berücksichtigen. Diese semi-weite Abstützung wurde durch einen Stahlring realisiert, der über seinen gesamten Umfang nahe dem Rand des Versuchskörpers auf dem Beton auflag (siehe Abbildung 5.5).



(1) Prüflast, (2) verwendeter und (3) üblicher weiter Abstützring, (4) Abstützlast, max. Ausbruchkegel der verwendeten (5) semi-weiten und (6) weiten Abstützung

**Abbildung 5.5:** schematische Darstellung einer semi-weiten Abstützung

## 5.5 Aufheizen

Der Aufheizvorgang erfolgte unmittelbar im Anschluss an die Regelaushärtezeit von 24 h. Versuche zur Ermittlung der Geschwindigkeit des vollständigen Durchheizens von Versuchskörpern mit der Beschaffenheit und Geometrie der hier verwendeten Standardkörper aus Beton zeigten auf, dass für das Aufheizen auf eine Zielprüftemperatur von  $43^{\circ}\text{C}$  eine Aufheizzeit von ca. 18 h ausreichend ist, wenn die Ausgangstemperatur der Versuchskörper und der Versuchsstände ca.  $20^{\circ}\text{C}$  beträgt. Diese Aufheizversuche wurden direkt in den Wärmekammern durchgeführt, sodass hier spezifische Eigenschaften der beiden verwendeten Kammertypen entsprechend berücksichtigt sind. Es sollte keine längere Aufheizdauer als unbedingt erforderlich angewendet werden, um vor dem Belastungsvorgang Effekte infolge einer möglichen Nacherhärtung [4] so gering wie möglich zu halten.

Die Standardprüftemperatur von  $43^{\circ}\text{C}$  entspricht der Temperaturobergrenze der beiden geprüften epoxidharzbasierten Verbunddübelssysteme bei einer Prüfung unter dauerhafter Lasteinwirkung nach ETAG. Aus Gründen der Vergleichbarkeit epoxidharzbasierter und vinylesterbasierter Verbunddübelssysteme wurde diese Temperatur ebenso standardmäßig für vinylesterbasierte Systeme festgelegt.

## **5.6 Belastung**

In sämtlichen durchgeführten Versuchen erfolgte die Lastaufbringung hydraulisch. Der Belastungsvorgang unterschied sich jedoch aus technischen Gründen zwischen den kurzzeitigen und den langzeitigen, zentrischen Zugversuchen.

### **5.6.1 Belastung der Kurzzeitversuche**

Die Belastung erfolgte mittels eines Hydraulikzylinders durch eine elektrisch angetriebene hydraulische Ölpumpe. Hierbei ist das Ziel, innerhalb einer definierten Zeitspanne (hier 90 Sekunden) den Bruch des Systems herbeizuführen. Die Belastungsrate ist hierbei konstant zu halten und für sämtliche Versuche identisch zu wählen, um mögliche Effekte der Belastungsgeschwindigkeit auf die Tragfähigkeit auszuschließen. Für übliche Ausziehversuche mit weiter Abstützung in gerissenem Beton sind derartig Effekte in [36] nachgewiesen.

### **5.6.2 Belastung der Langzeitversuche**

Gegenüber den kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen mit elektrisch angetriebener hydraulischer Ölpumpe erfolgte die Belastung der Langzeitversuche von Hand. Das hierfür entwickelte System wurde in Kapitel 4, Abschnitt 4.3.1 vorgestellt. Der Belastungsvorgang sollte hierbei möglichst schnell erfolgen, da insbesondere bei sehr hohen Lasten, unter denen die Dübelssysteme nur sehr kurze Standzeiten von wenigen Minuten aufweisen, die Dauer der Belastungsphase bereits signifikanten Anteil an der Standzeit hat. Die nominelle Dauer der Belastungsphase wurde generell auf ca. 15 Sekunden festgelegt.

## **5.7 Datenaufbereitung**

Für die Analyse des Anfangsverschiebungsverhaltens wurde die im Messwert enthaltene Stahldehnung des Dübelüberstandes zwischen Betonoberfläche und Lastangriffspunkt kompensiert (vgl. Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.3). Für die Analyse des Verschiebungsverhaltens unter Dauerlast erfolgte zusätzlich die Kompensation der elastischen Anfangsverschiebung (vgl. Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5).

## 6 Standzeitversuche an Verbunddübelssystemen

### 6.1 Allgemeines

Auf Basis der Prüfverfahren nach ETAG bzw. AC ist eine sichere Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung nicht möglich. Für eine Befestigung kann das tatsächlich vorhandene Sicherheitsniveau unter einer solchen Belastung hiermit nicht bestimmt werden (vgl. Kapitel 2, Abschnitt 2.4). Alternativ hierzu wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine Methode zur Standzeitprognose auf Verbunddübel übertragen, die auf Standzeitextrapolation beruht und in der Technik ein bewährtes Verfahren darstellt. Die hierfür notwendige Versuchstechnik wurde am IWB von Grund auf neu entwickelt (vgl. Kapitel 4).

Die nachfolgenden Ausführungen haben die Anwendung des Verfahrens selbst zum Inhalt sowie die Erkenntnisse, die hierbei im Bezug auf Dauerhaftigkeitsprognosen für Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung gewonnen werden konnten. Dabei handelt sich um grundlegende Betrachtungen. Einflussparameter waren nicht Gegenstand einer konkreten Untersuchung in diesem Rahmen.

Eine Parameterstudie, welche konkret die Ermittlung der Einflüsse verschiedener bau-praktischer Parameter auf die Standzeitprognosen mittels Standzeitversuchen zum Ziel hatte, findet sich in [37]. Die Untersuchungen wurden von der University of Florida, Miami, USA, in Kooperation mit dem IWB, Universität Stuttgart, zeitgleich zu den Grundlagenuntersuchungen der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Geprüft wurden hierbei drei verschiedene Vertreter von Verbunddübelssystemen mit hoher Marktdurchdringung in den USA. Typische Parameter hierbei waren beispielsweise spezielle Setzrichtungen der Dübel (z.B. vertikal über Kopf, horizontal), Frost/Tau-Wechsel-Resistenz unter Dauerlast oder der Temperatureinfluss unter Dauerlast.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erlangten Erkenntnisse können helfen, die Ergebnisse dieser Parameterstudie zu bewerten und hinsichtlich ihrer Relevanz zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen einzuordnen. Dies ist jedoch nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

## 6.2 Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2

### 6.2.1 Zielsetzung

Die Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2 dienen dem Ziel, eine Vergleichsreferenz für weiterführende Untersuchungen (z.B. Parameterstudien) auf Basis dieser Mörtel zu schaffen sowie die grundsätzliche Tauglichkeit der Standzeitmethode für die Prognose der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen zu überprüfen.

### 6.2.2 Ansatz

Es wurde das Standardsetup mit enger Abstützung nach Kapitel 5 verwendet. Die Einbindetiefe wurde so gewählt, dass eine gute Vergleichbarkeit mit einer Großzahl der Dauerlastversuche gegeben ist, die im Rahmen früherer Zulassungsversuche am IWB durchgeführt wurden.

### 6.2.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Bohrlochdurchmesser:  $d_{\text{nom}} = 14 \text{ mm}$  (Bohrereckmaß entsprechend  $d_{\text{cut,m}}$ )
- b) Einbindetiefe:  $h_{\text{ef}} = 80 \text{ mm}$ , Dübel zentriert
- c) Prüftemperatur für Epoxy 1:  $T_{\text{Epoxy 1}} = 43^\circ\text{C}$ , für Epoxy 2:  $T_{\text{Epoxy 2}} = 50^\circ\text{C}$

Im Vorfeld der Versuche wurde festgestellt, dass die Bruchlasten von Installationen mit Epoxy 2 im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch höher ausfallen, als zunächst angenommen. Diese können somit zu nahe an der Streckgrenze der Gewindestange liegen. Es wurde eingeschätzt, dass sich eine Änderung der Systemgeometrie durch eine Reduzierung der Einbindetiefe nachteiliger auf die Vergleichbarkeit mit den Versuchen mit Epoxy 1 auswirken würde, als eine Erhöhung der Temperatur, sofern diese moderat gewählt ist. Entsprechend wurde für die Baseline-Versuche an Epoxy 2 die Prüftemperatur von  $43^\circ\text{C}$  auf  $50^\circ\text{C}$  erhöht, anstatt die Verankerungstiefe anzupassen.

## 6.2.4 Programm

### 6.2.4.1 Kurzzeitversuche

Die kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche bis zum Bruch dienen der Ermittlung des ersten Stützpunktes der Standzeitfunktion. Bei der Interpretation der Ergebnisse als Standzeiten sind die Anmerkungen in Kapitel 3, Abschnitt 3.2.2.1 zu beachten.

EPOXY 1 & 2 / Baseline-Versuche							
Serienkennung	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Anz.
e1_base_ $N_{u,m}$	E 1	80	14	C20/25	eng	43	4
e2_base_ $N_{u,m}$	E 2					50	

**Tabelle 6.1:** Übersicht, Kurzzeitversuche

### 6.2.4.2 Langzeitversuche (Standzeitversuche)

Die Lastniveaus der Langzeitversuche können grundsätzlich beliebig gewählt werden. Für die Serien der Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2 wurden jeweils drei Versuche auf folgenden Laststufen vorgesehen:

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 84,2$ kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	e1_base_68,0	80	14	C20/25	eng	43	0,81	68,0	3
2.1	e1_base_63,8						0,76	63,8	
2.2							0,76	63,8	
3	e1_base_59,5						0,71	59,5	
4	e1_base_55,3						0,66	55,3	
5	e1_base_46,8						0,56	46,8	

\* zwei Serien bei 63,75 kN zu Erprobungszwecken

**Tabelle 6.2:** Übersicht, Langzeitversuche mit Epoxy 1

EPOXY 2 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 85,8$ kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	e2_base_68,5	80	14	C20/25	eng	50	0,80	68,5	3
2	e2_base_59,9						0,70	59,9	
3	e2_base_51,4						0,60	51,4	
4	e2_base_45,0						0,52	45,0	
5	e2_base_35,4						0,41	35,4	
6	e2_base_21,5						0,25	21,5	

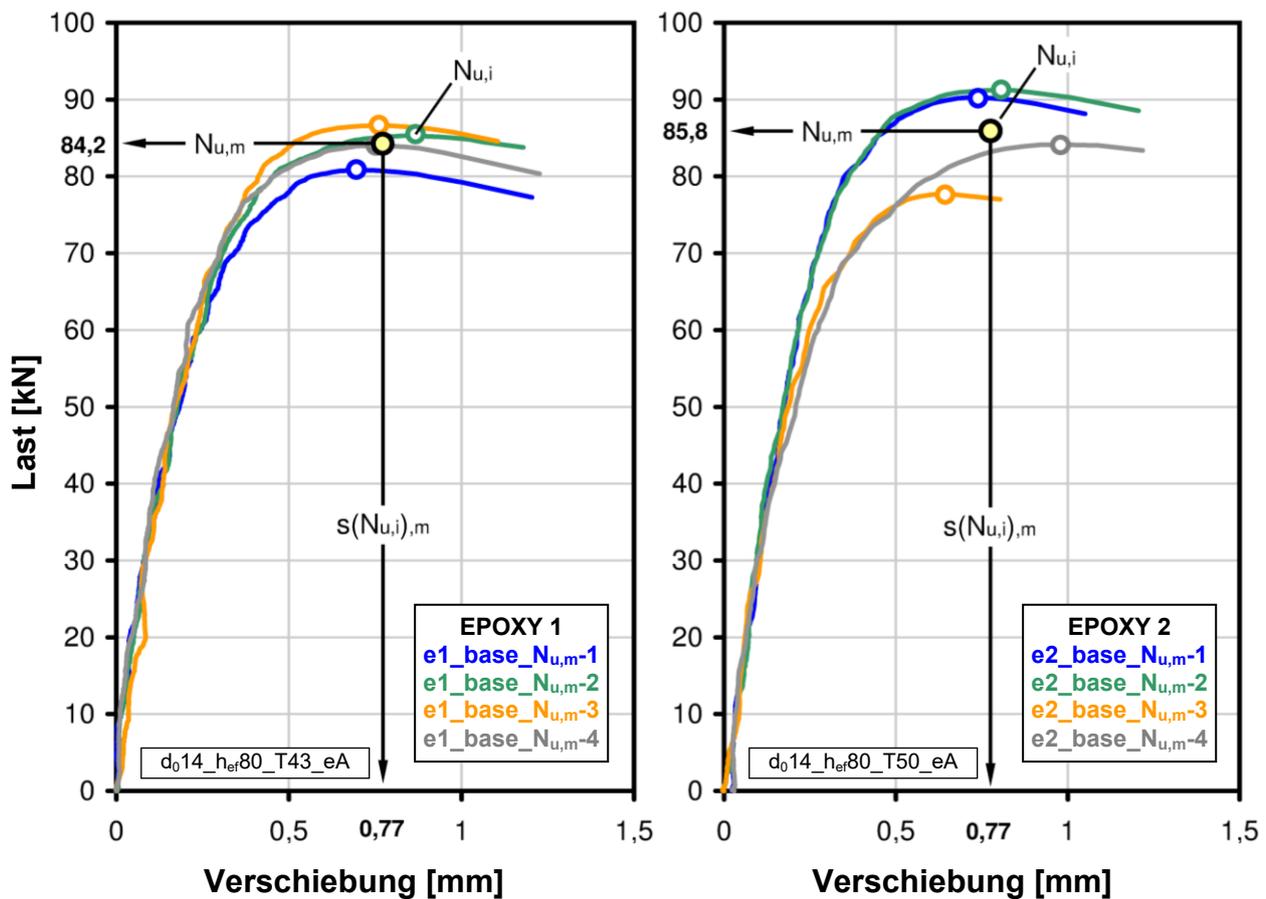
**Tabelle 6.3:** Übersicht, Langzeitversuche mit Epoxy 2

## 6.2.5 Ergebnisse

### 6.2.5.1 Analyse Kurzzeitversuche

(Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2, Serienkennungen  $e1\_base\_N_{u,m}$  und  $e2\_base\_N_{u,m}$ )

Die Diagramme 6.1 und 6.2 zeigen die Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche (Referenzversuche) zur Bestimmung der mittleren Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ .



**Diagramm 6.1:** Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit Epoxy 1

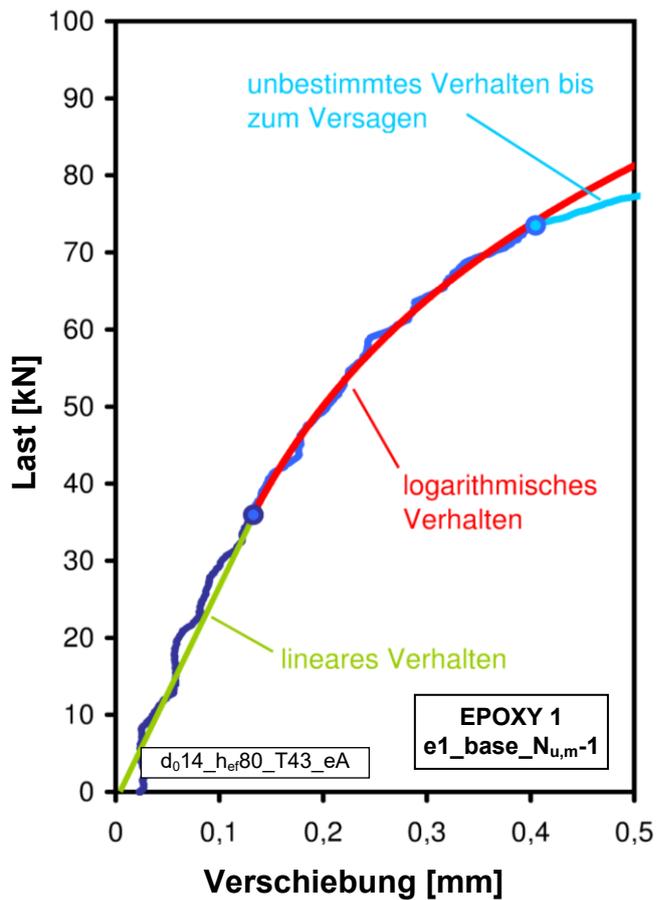
**Diagramm 6.2:** Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit Epoxy 2

Es kann Folgendes festgestellt werden:

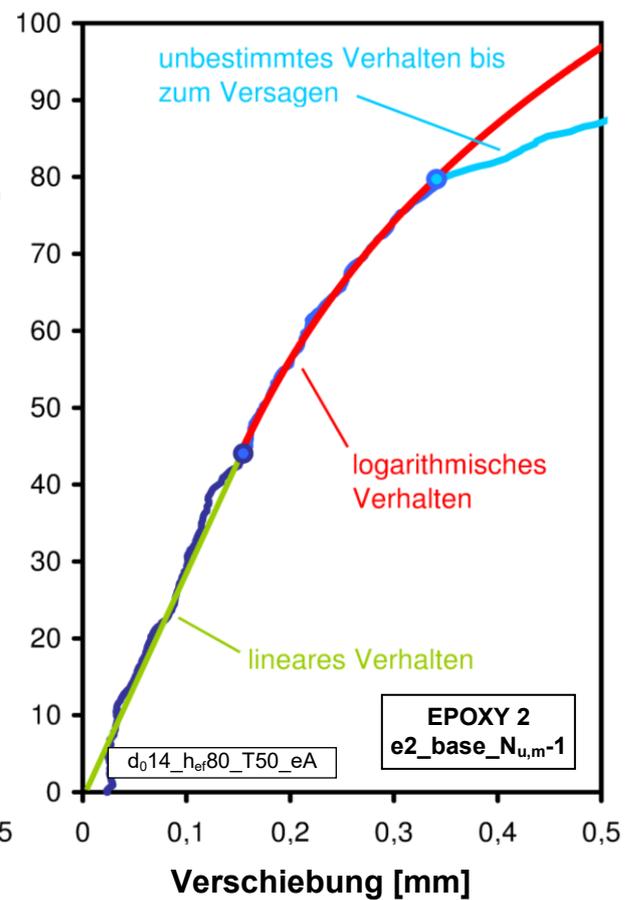
- Das Versagen erfolgte bei beiden Verbundmörteln zwischen Mörtel und Beton (Versagensmodus „ $P_M$ “ nach ETAG)
- Innerhalb von jeweils zwei aufeinander folgenden Abschnitten kann die Verschiebungscharakteristik in guter Näherung mittels einer linearen und einer logarithmischen Gesetzmäßigkeit beschrieben werden (siehe die Diagramme 6.3 und 6.4). Es wird angenommen, dass das System innerhalb des linearen Abschnitts ungeschädigt ist (monolithische Tragwirkung) und innerhalb des logarithmischen Abschnitts eine kontinuierlich fortschreitende Schädigung erfolgt (z.B. Adhäsionsversagen), bis schließlich ein unbestimmtes Verhalten zum Bruch führt.

EPOXY 1 & 2 / Baseline-Versuche										
Serienkennung	V [Nr.]	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	$N_{u,i}$ [kN]	$N_{u,m}$ [kN]	v [%]
e1_base_ $N_{u,m}$	1	E 1	80	14	C20/25	eng	43	80,8	84,2	2,96
	2							85,3		
	3							86,6		
	4							84,0		
e2_base_ $N_{u,m}$	1	E 2	80	14	C20/25	eng	50	90,3	85,8	7,30
	2							91,2		
	3							77,7		
	4							84,1		

**Tabelle 6.4:** Einzelfestigkeiten



**Diagramm 6.3:**  
Verschiebungscharakteristik von Versuch e1\_base\_ $N_{u,m-1}$



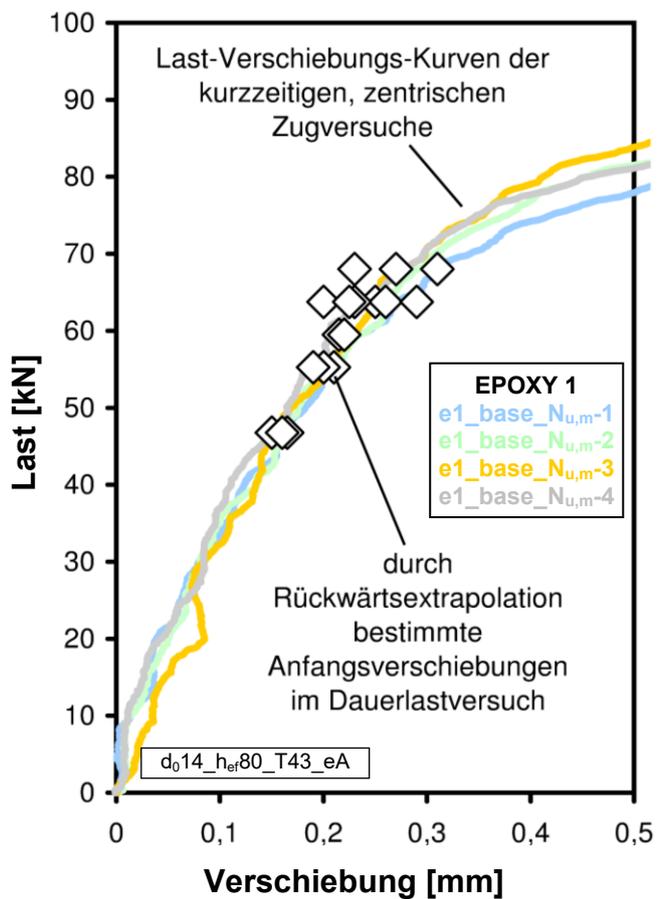
**Diagramm 6.4:**  
Verschiebungscharakteristik von Versuch e2\_base\_ $N_{u,m-1}$

## 6.2.5.2 Analyse Langzeitversuche

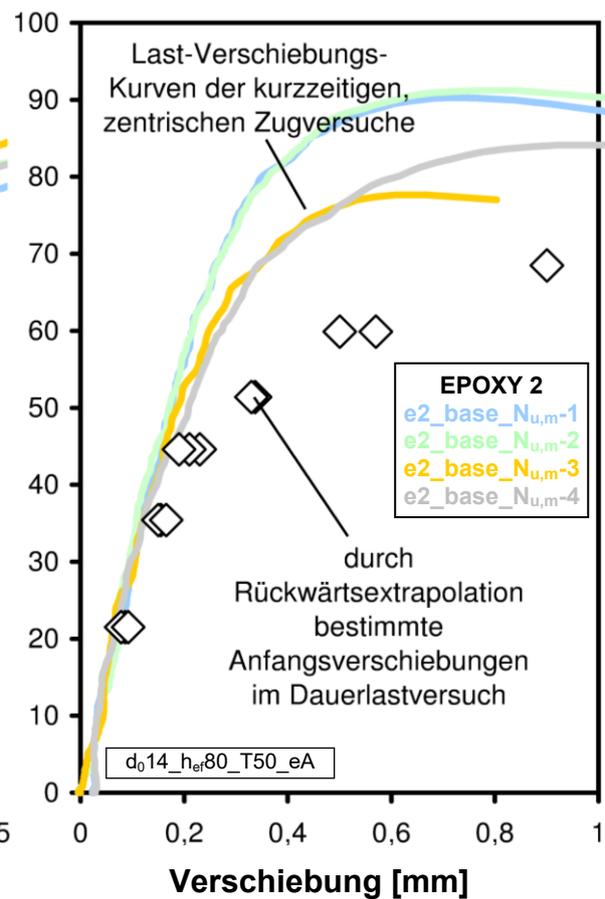
(Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2, Serienkennungen e1\_base und e2\_base)

### 6.2.5.2.1 Anfangsverschiebungen

Die Diagramme 6.5 und 6.6 zeigen die Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_base bzw. e2\_base (unterschiedlicher Maßstab!). Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.



**Diagramm 6.5:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Epoxy 1



**Diagramm 6.6:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Epoxy 2

<b>EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 84,2</math> kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)</b>										
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]	
1	e1_base_68,0	1	80	14	eng	43	0,81	0,27	0,27	
		2						0,31		
		3						0,23		
2.1	e1_base_63,8	1					0,76	0,23	0,25	
		2						0,29		
		3						0,23		
2.2		1					0,76	0,20	0,24	
								2		0,25
								3		0,26
3	e1_base_59,5	1					0,71	0,22	0,22	
		2						0,22		
		3						0,22		
4	e1_base_55,3	1					0,66	0,21	0,20	
		2						0,20		
		3						0,19		
5	e1_base_46,8	1	0,56	0,15	0,16					
		2		0,17						
		3		0,16						

**Tabelle 6.5:** Anfangsverschiebungen, Epoxy 1

<b>EPOXY 2 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 85,8</math> kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)</b>									
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]
1	e2_base_68,5	1	80	14	eng	50	0,80	-*	-
		2						-*	
		3						0,90	
2	e2_base_59,9	1					0,70	0,50	0,52
		2						0,57	
		3						0,50	
3	e2_base_51,4	1					0,60	-*	-
		2						0,34	
		3						0,33	
4	e2_base_45,0	1					0,52	0,23	0,21
		2						0,21	
		3						0,19	
5	e2_base_35,4	1					0,41	0,16	0,16
		2						0,15	
		3						0,17	
6	e2_base_21,5	1					0,25	0,09	0,085
		2						0,08	
		3						0,09	

\* Ausfall während der ersten zwei Versuchsminuten

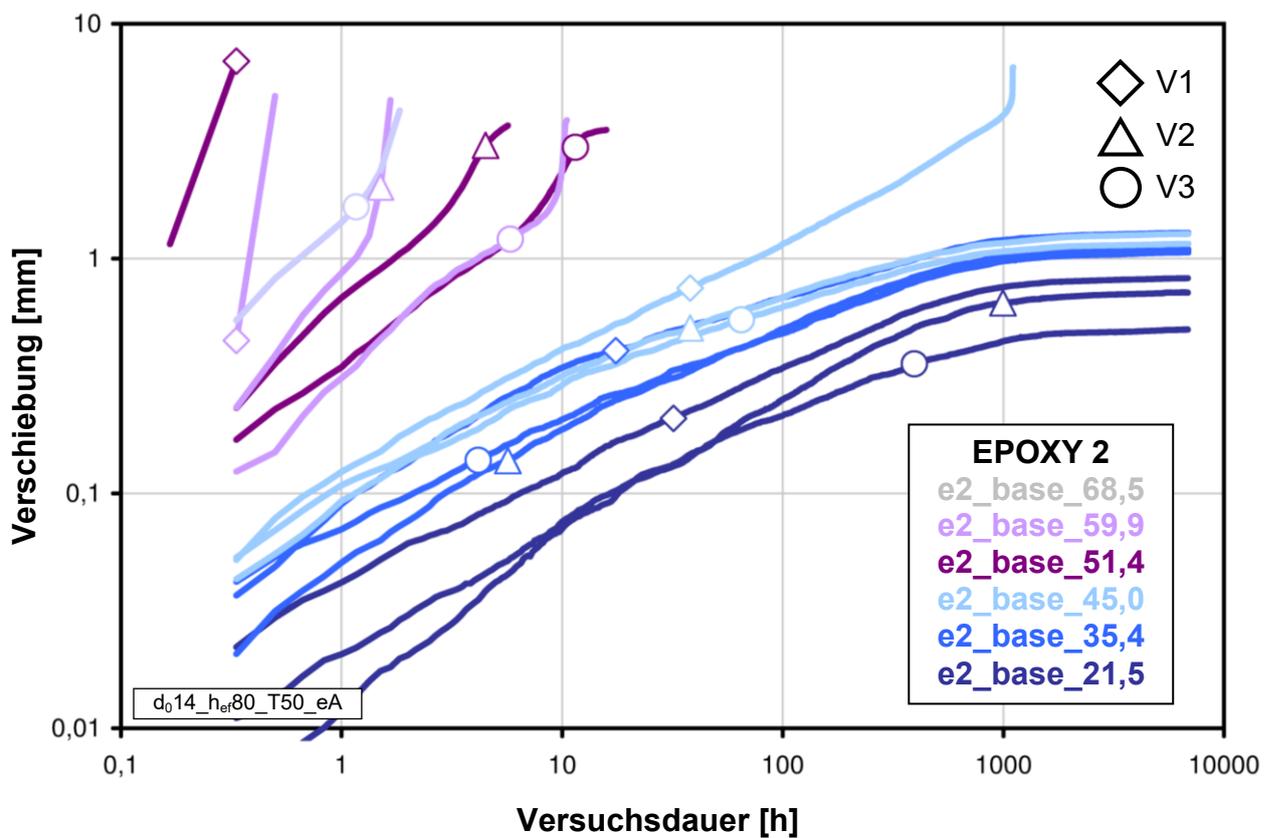
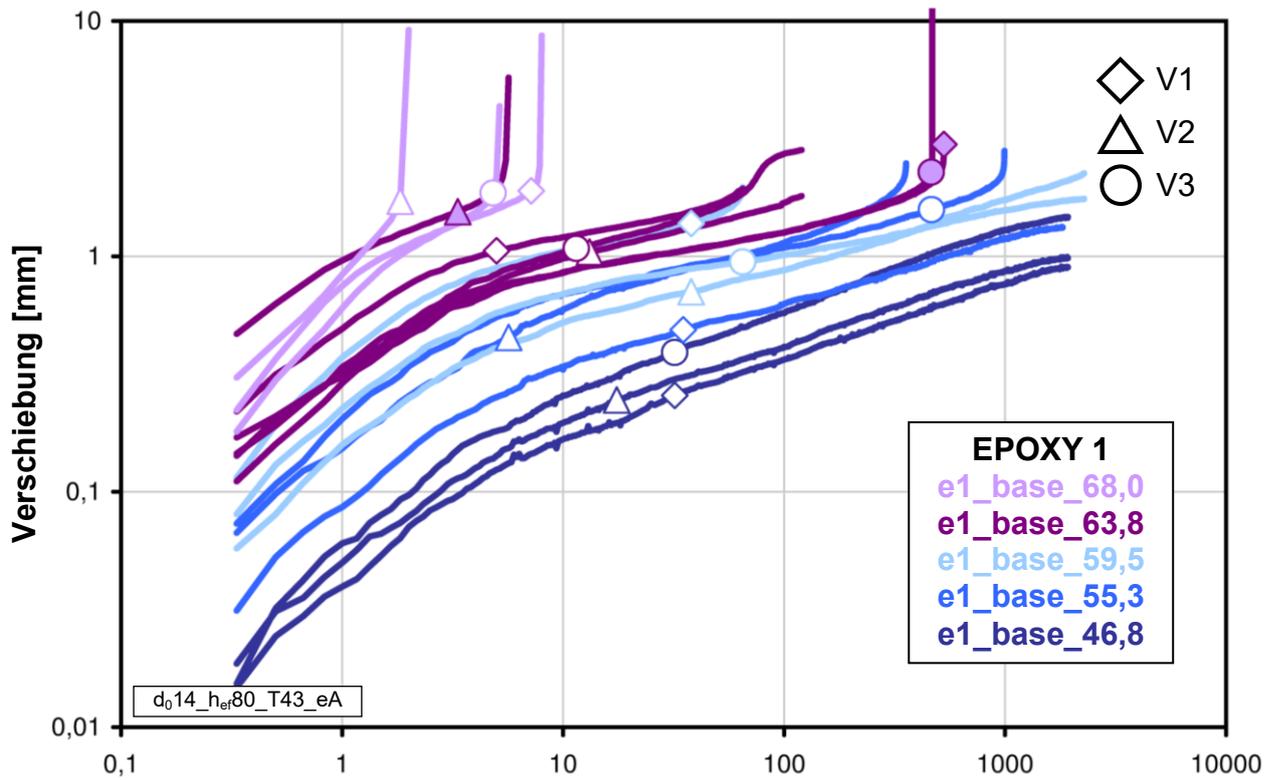
**Tabelle 6.6:** Anfangsverschiebungen, Epoxy 2

Es ist zu erkennen, dass die rückwärts extrapolierten Anfangsverschiebungen von Epoxy 1 eine gute Übereinstimmung mit den Verschiebungswerten im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch zeigen. Im Gegensatz hierzu übersteigen die auf identische Weise ermittelten Anfangsverschiebungen der Standzeitversuche von Epoxy 2, oberhalb einer Last von ca. 45 kN, den zugehörigen kurzzeitigen Referenzwert erheblich. Wie in Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5, dargelegt kann eine Abweichung der durch Rückwärtsextrapolation ermittelten Anfangsverschiebungen von den Verschiebungen im kurzzeitigen Referenzversuch darauf zurückgeführt werden, dass zwischen dem Ende der Belastungsphase und dem Zeitpunkt der ersten Erfassung eines Verschiebungsmesswertes eine Unstetigkeit im Verschiebungsverhalten aufgetreten ist. Hierbei wird von einer Trennung der Mörtelschale vom Versuchskörper ausgegangen, sodass bei den betroffenen Versuchen bereits vor Erreichen des ersten Messwertes keine monolithische Verbindung mehr zwischen Mörtelschale und Beton besteht und die Dauerhaftigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung entsprechend reduziert ist.

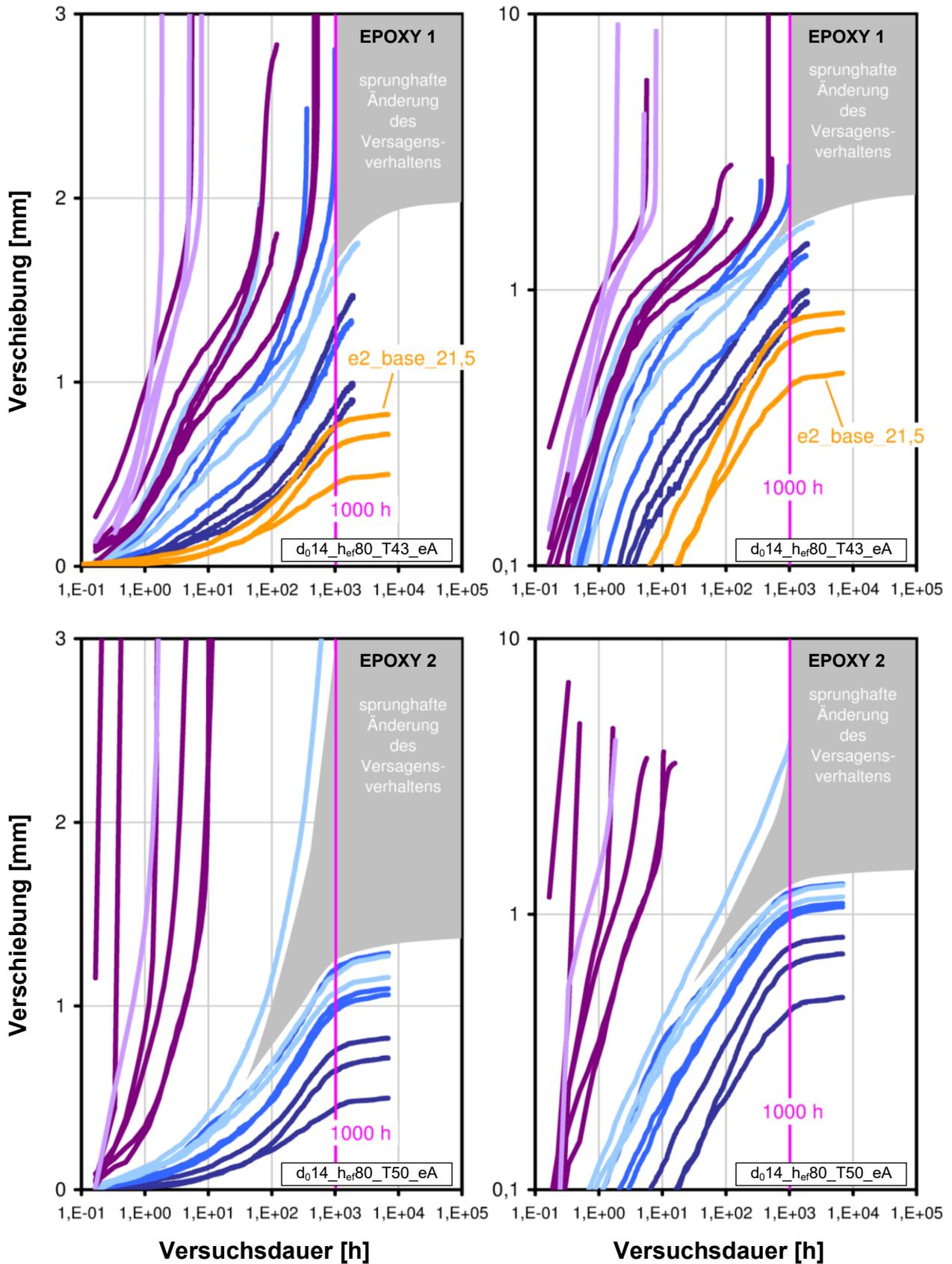
Als Ursache für die Unterschiede im Verhalten kommt offensichtlich der Temperaturunterschied zwischen beiden Versuchsreihen in Frage. Eine weitere mögliche Erklärung für dieses Verhalten liefern die Ergebnisse der im Anschluss an die Standzeituntersuchungen durchgeführten Dauerlastversuche mit Epoxy 1 zum Einfluss der Feuchte auf die Verbundausbildung (siehe Kapitel 7, Abschnitt 7.7.7, Punkt b)).

#### **6.2.5.2.2 Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten**

Die Diagramme 6.7 und 6.8 zeigen sämtliche Verschiebungskurven der Versuchsreihen e1\_base und e2\_base. Die Diagramme 6.9 und 6.10 (für Epoxy 1) bzw. 6.11 und 6.12 (für Epoxy 2) zeigen eine Gegenüberstellung sämtlicher Verschiebungskurven, sowohl im doppelt-logarithmischen als auch im einfach-logarithmischen Maßstab.



**Diagramm 6.7 (oben) und 6.8:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 (oben) und Epoxy 2 unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung auf verschiedenen hohen Lastniveaus



**Diagramm 6.9 (o.l.) und 6.10 (o.r.):** Verschiebungskurven von Epoxy 1 im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab

**Diagramm 6.11 (u.l.) und 6.12 (u.r.):** Verschiebungskurven von Epoxy 2 im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Verschiebungscharakteristik

I. Die hier dargestellten Verschiebungskurven zeigen auf keinem Lastniveau eine Verschiebungscharakteristik entsprechend dem Ansatz von FINDLEY (Potenzfunktion). Dies widerspricht der Annahme des Extrapolationsverfahrens nach ETAG bzw. AC, wonach grundsätzlich von einem derartigen Verschiebungsverhalten während des gesamten Belastungszeitraums auszugehen ist.

II. Versuche, bei denen innerhalb der ersten ca. 1000 Versuchsstunden kein Versagen auftritt, weisen ab diesem Zeitpunkt eine sich deutlich verringernde Verschieberate auf (Ausnahme: Versuch e1\_base\_59,5-2). Dies wird als Stabilisierung des Verschiebungsverhaltens gewertet. Wegen kurzer Laufzeiten der Standzeitversuche mit Epoxy 1 ist dieser Effekt dort erst im Ansatz zu erkennen, während er sich in den Verschiebungskurven von Epoxy 2 deutlich abzeichnet.

b) Versagensverhalten

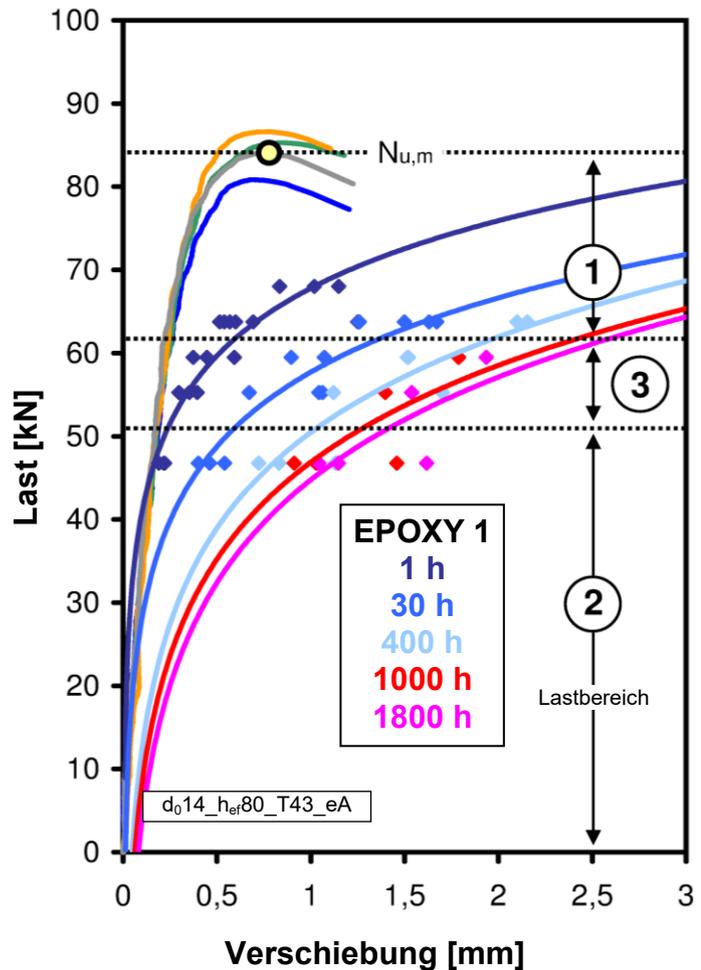
I. Das Versagen findet eindeutig zwischen Verbundmörtel und Beton statt.

II. Den Unterschieden im Versagensverhalten nach kann der Gesamtlastbereich beider Mörtel in drei Lastbereiche unterteilt werden (vgl. hierzu Diagramm 6.14 in Verbindung mit Diagramm 6.17). Ein oberer Lastbereich (im Folgenden: Lastbereich 1), dessen Lasten innerhalb einer Versuchsdauer von maximal ca. 1000 h immer zum Versagen führen, ein unterer Lastbereich (Lastbereich 2), für den in absehbarer Zeit kein Versagen zu erwarten ist sowie einen Übergangsbereich (Lastbereich 3), in dem beide Verhaltensweisen innerhalb der Versuche eines Lastniveaus auftreten. Innerhalb dieses Übergangsbereichs, dessen Lastintervall ca. 20% der mittleren Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  beträgt, steigen die Standzeiten sprunghaft um ein Vielfaches an. Das Versagensverhalten ist somit nicht stetig über den gesamten Lastbereich des Verbunddübelsystems zwischen 0 kN und  $N_{u,m}$ . Der Lastbereich 3 befindet sich bei beiden Mörteln etwa auf einem Niveau von  $0,5 N_{u,m}$ , zwischen 40 und 50 kN.

III. Der Übergang im Verhalten erfolgt auf demjenigen Lastniveau, auf dem im kurzzeitigen Referenzversuch der erste Steifigkeitsabfall auftritt. Dieser Steifigkeitsabfall deutet auf den Beginn einer fortschreitenden Systemschädigung hin, die schließlich zum Bruch führt. Diagramm 6.13 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Neben den L-V-Kurven der kurzzeitigen Referenzversuche sind die Verschiebungen der verschiedenen Lastniveaus zu bestimmten Versuchszeitpunkten der Dauerlastversuche aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass in Lastbereich 2 sämtliche Versuche einer Laststufe gegen eine Grenzverschiebung konvergieren. In Lastbereich 1 hingegen tritt keine Konvergenz auf, sämtliche Versuche versagen in relativ kurzer Zeit. Die Versuche auf Lastniveaus innerhalb des Lastbereichs 3 zeigen ein gemischtes Verhalten.

IV. Das Last-Verschiebungsverhalten der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche lässt dieses Ausmaß der Standzeitreduktion nicht erwarten. Der Steifigkeitsabfall innerhalb dieses betrachteten Lastintervalls ist zwar signifikant, erscheint jedoch stetig und deutet zunächst nicht auf eine gravierende Systembeeinträchtigung hin. Unter der Annahme, dass das Systemversagen tatsächlich bereits innerhalb des Lastbereichs 3 zum Zeitpunkt des ersten Steifigkeitsabfalls erfolgt ist, lässt sich dies dadurch erklären, dass der Versagensmechanismus eine gewisse „Trägheit“ aufweist. In kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen wäre die vorhandene Unstetigkeit im Versagensverhalten somit erst bei sehr viel geringeren Belastungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Nach dem Versagen, das in der Trennung der Mörtelschale vom Beton besteht, ist der Tragwiderstand im Anschluss auf Reibung so-

wie auf eine formschlüssige Tragwirkung reduziert, die durch Bohrlochunebenheiten (Welligkeit des Bohrlochs, etc.) verursacht ist. Aufgrund der vergleichsweise hohen lokalen Materialbeanspruchungen infolge hoher Pressungen an den Hinterschnitten der Bohrlochunebenheiten ist mit entsprechend großen zeitabhängigen Deformationen zu rechnen, die den Tragwiderstand des Formschlusses fortlaufend reduzieren, bis das System final versagt. Je höher nun die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto geringer ist diese zeitabhängige Reduzierung des Tragwiderstandes innerhalb des Belastungszeitraums und umso höhere Traglasten sind zu erwarten. Der in der Analyse der Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation festgestellte Umstand, dass die ermittelten Werte bei Epoxy 2 oberhalb der vermuteten Schädigungsschwelle deutlich größer sind als im zugehörigen kurzzeitigen Referenzversuch, stützt diese Vermutung. So ist anzunehmen, dass die „Trägheit“ des Versagensmechanismus mit zunehmender Temperatur abnimmt, weil der hierbei entsprechend weicher werdende Mörtel den Hinterschnitten der Bohrlochwellen einen zunehmend geringeren, zeitabhängigen Tragwiderstand entgegenzusetzen kann. Hierzu passt ebenso ins Bild, dass die ermittelten Standzeiten von Epoxy 2 gegenüber Epoxy 1 ausgesprochen gering sind. Die längste ermittelte Standzeit aller Serien, deren Versuche sämtlich versagt haben, beträgt für Epoxy 2 nur ca. 13 h unter einer Last von 51,4 kN. Zum Vergleich: Bei Epoxy 1 beträgt dieser Wert ca. 570 h.



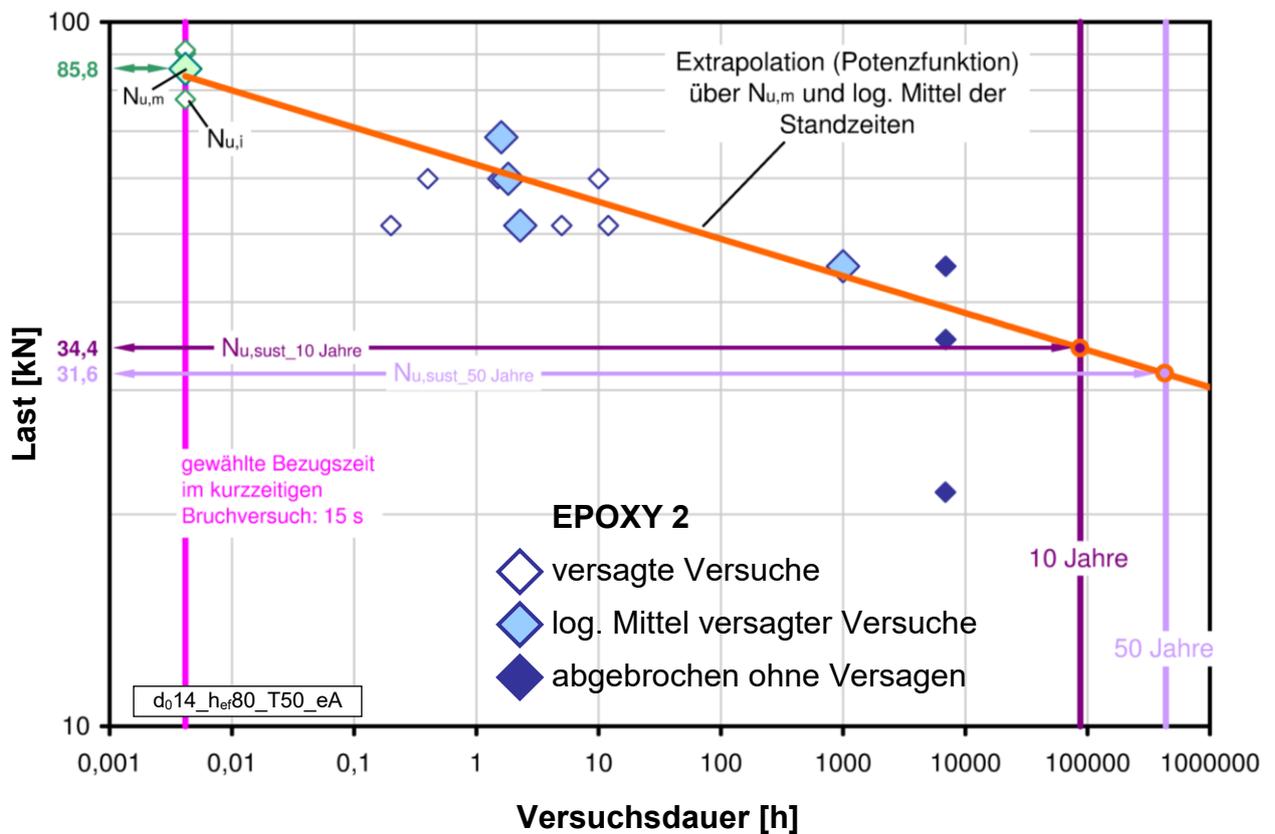
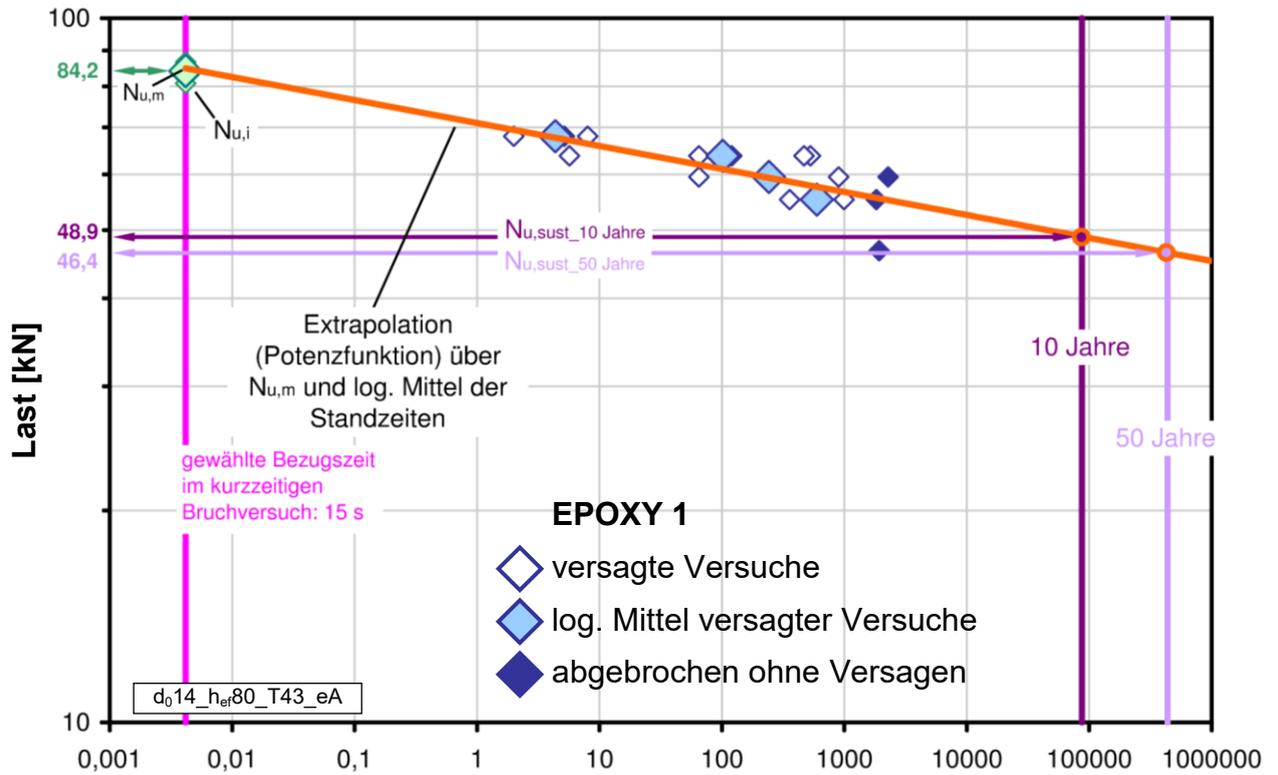
**Diagramm 6.13:** Verschiebungsfortschritte von Epoxy 1 in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (logarithmische Näherungen)

### 6.2.5.3 Standzeitkurven

(Baseline-Versuche mit Epoxy 1 und 2, Serienkennungen  $e1\_base$  und  $e2\_base$ )

Die nachfolgend dargestellten Standzeitkurven von Epoxy 1 und 2 basieren jeweils auf einer Regressionsanalyse mittels einer Potenzfunktion unter Verwendung der logarithmischen Mittel sämtlicher ermittelter Standzeiten einer Laststufe der Versuche  $e1\_base$  und  $e2\_base$  sowie der zugehörigen kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche  $e1\_base_{N_{u,m}}$  und  $e2\_base_{N_{u,m}}$ . Die Diagramme enthalten Extrapolationen auf 10 bzw. 50 Jahre unter ausschließlicher Verwendung tatsächlich versagter Versuche.

Die Diagramme 6.14 und 6.15 zeigen Standzeitkurven, die auf Basis einer Potenzfunktion unter Verwendung sämtlicher versagter Versuche ermittelt wurden.



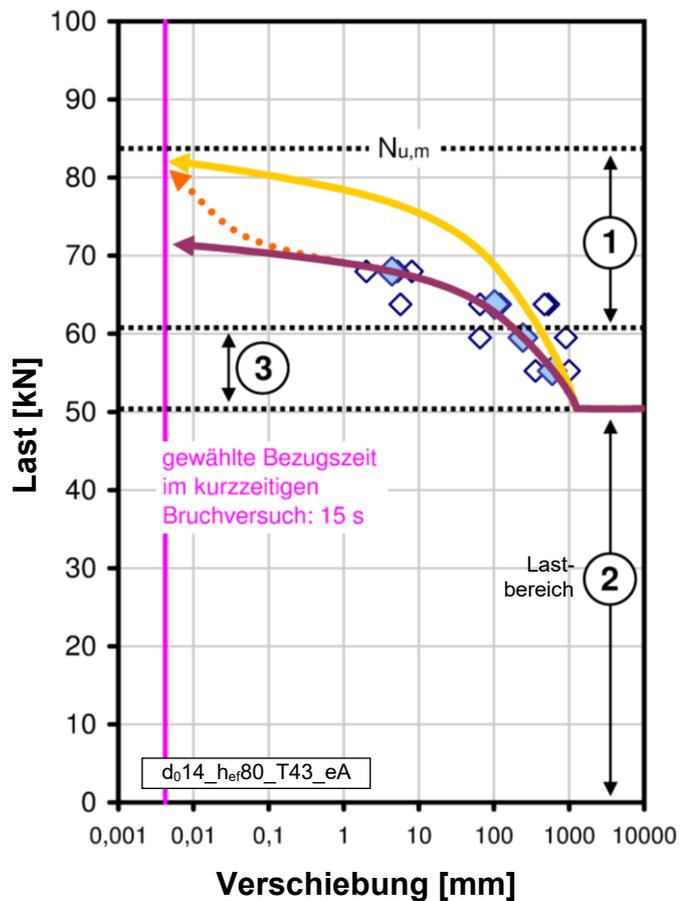
**Diagramm 6.14 (oben) und 6.15: Standzeitkurven von Epoxy 1 (oben) und Epoxy 2 unter Zugrundelegung einer Potenzfunktion**

Folgendes kann festgestellt werden:

a) Verlaufskarakteristik

I. Für Epoxy 1 stellt dieser Ansatz nur eine mäßig gute Näherung dar. Für Epoxy 2 ist dieser Ansatz offensichtlich ungeeignet.

II. Im vorangegangenen Kapitel wurde die Annahme getroffen, dass bereits in der Belastungsphase der Dauerlastversuche eine Vorschädigung auftritt, die umso ausgeprägter ist, je mehr sich das Prüflastniveau der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  nähert. Hieraus folgt zwingend, dass ein Standzeitverhalten in Form einer einzelnen sich über den Gesamtlastbereich erstreckenden Potenzfunktion praktisch ausgeschlossen werden kann. Gegenüber einem hypothetischen System, das nach der Belastungsphase im Dauerlastversuch auf sämtlichen Lastniveaus konstant ungeschädigt ist und dessen Dauerhaftigkeit somit rein durch die Laststeigerung bestimmt ist, muss bei einem realen System, durch die beschriebene Vorschädigung, von einem beschleunigten Versagensvorgang ausgegangen werden. Weil die Vorschädigung gegen 100% strebt, während die Prüflast gegen die Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  strebt, muss hierbei von einer Beschleunigung in vergleichbarem Maß ausgegangen werden. Diagramm 6.16 zeigt diesen Sachverhalt. Mit Annäherung an die Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ , muss die Standzeit folglich gegen Null streben, wobei sie sich bei der hier verwendeten logarithmischen Zeitskala dem Lastniveau der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  asymptotisch annähert (gelbe Kurve). Die demgegenüber wahrscheinlichere Standzeitkurve (lila dargestellt) scheint jedoch einem deutlich geringeren Lastniveau zuzustreben. Es ist somit anzunehmen, dass im Bereich kürzester Standzeiten eine Zunahme des zeitabhängigen Tragwiderstandes erfolgt (orange gepunktet dargestellt), was dafür spricht, dass der Versagensmechanismus im Bereich kürzester Standzeiten eine gewisse „Trägheit“ aufweist.



**Diagramm 6.16:** mögliche Verläufe der Standzeitkurve von Epoxy 1

Das Standzeitverhalten im Lastbereich 1 unterscheidet sich von demjenigen im Lastbereich 2. Der Übergang zwischen beiden Ausprägungen findet innerhalb des Übergangslastbereichs statt (Lastbereich 3) und erfolgt für Epoxy 1 und 2 nicht stetig, sondern quasi sprunghaft. Es wird angenommen, dass mit Auftreten einer Vorschädigung während der Belastungsphase, aufgrund des Überschreitens einer lokalen Festigkeit, ein Versagensmechanismus ausgelöst wird, der jedoch für die Dauerhaftigkeit des Systems auf Gebrauchslastniveaus keine Relevanz besitzt, so-

b) Stetigkeit

I. Das Standzeitverhalten im Lastbereich 1 unterscheidet sich von demjenigen im Lastbereich 2. Der Übergang zwischen beiden Ausprägungen findet innerhalb des Übergangslastbereichs statt (Lastbereich 3) und erfolgt für Epoxy 1 und 2 nicht stetig, sondern quasi sprunghaft. Es wird angenommen, dass mit Auftreten einer Vorschädigung während der Belastungsphase, aufgrund des Überschreitens einer lokalen Festigkeit, ein Versagensmechanismus ausgelöst wird, der jedoch für die Dauerhaftigkeit des Systems auf Gebrauchslastniveaus keine Relevanz besitzt, so-

lange diese lokale Festigkeit zu keinem Zeitpunkt überschritten wird. In Abhängigkeit davon, in welcher Form die Vorschädigung während des Belastungsvorgangs auftritt, ist der Übergang im Standzeitverhalten sprunghaft oder stetig. Der Übergang ist stetig, wenn der Grad der Vorschädigung auf einem bestimmten Lastniveau bei Null beginnt und mit kontinuierlich zunehmendem Lastniveau ebenso kontinuierlich zunimmt. Der Übergang ist sprunghaft, wenn auf einem bestimmten Lastniveau der Grad der Vorschädigung sofort von Null auf ein signifikantes Niveau springt.

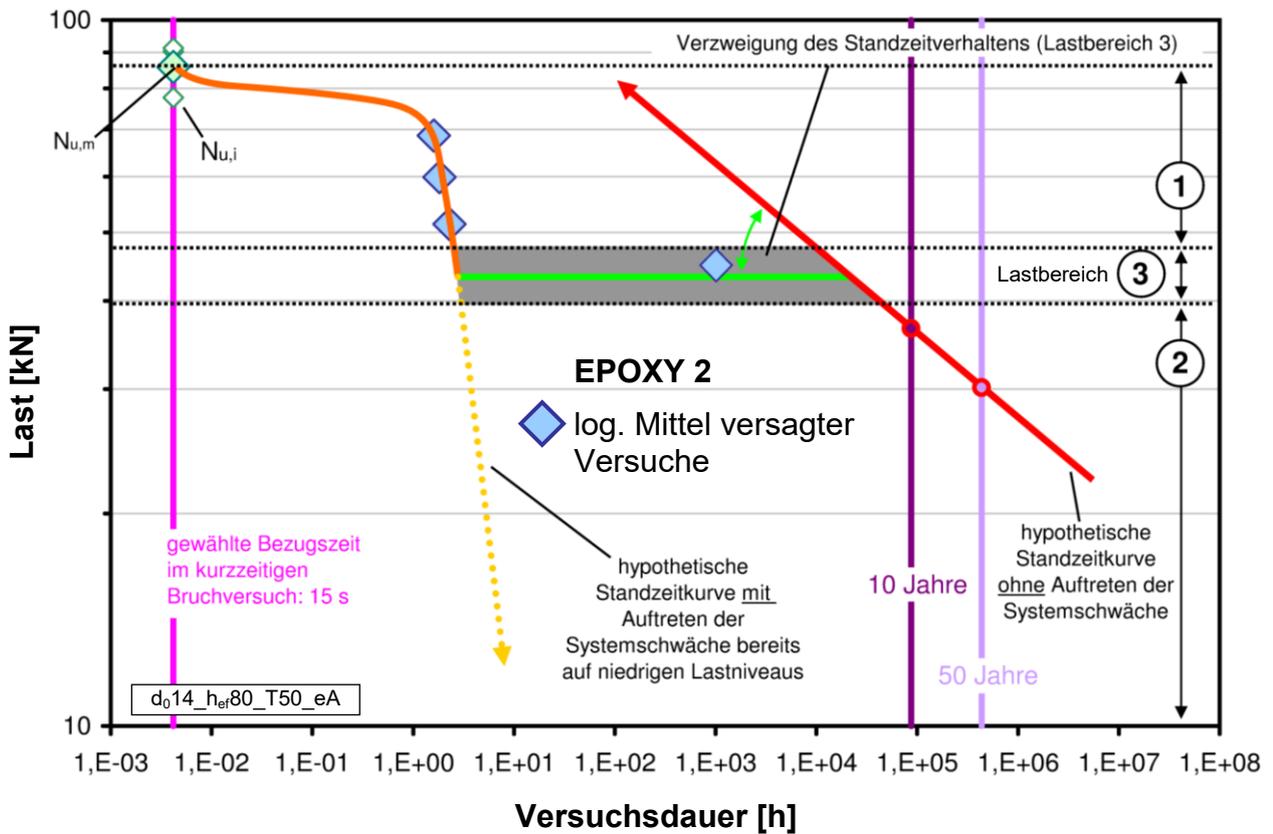
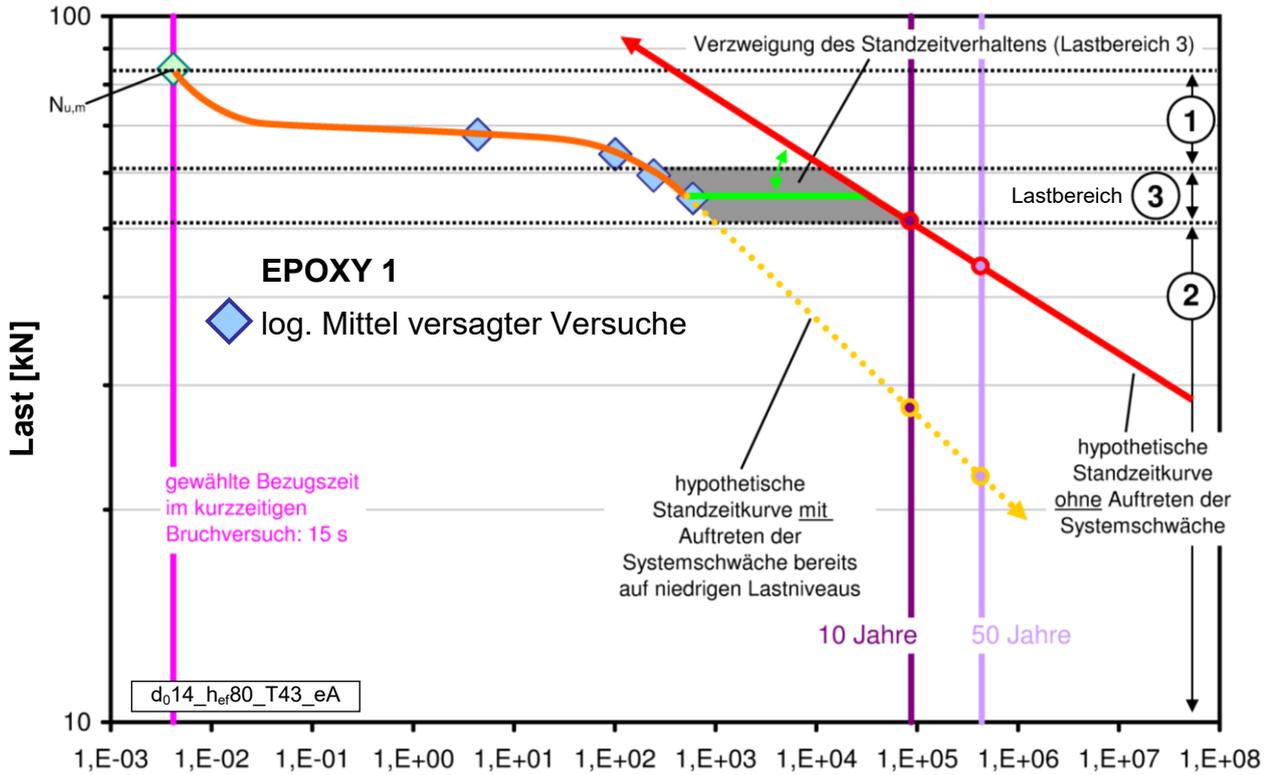
II. Sowohl für eine sprunghafte als auch eine stetige Änderung des Standzeitverhaltens gilt, dass der für die Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveaus tatsächlich relevante Versagensmechanismus nicht mehr beobachtet werden kann, sobald es in einem Versuch zu einer Auslösung einer Vorschädigung gekommen ist. Das Standzeitverfahren ist diesbezüglich sinnbildlich gesprochen „erblindet“, indem sich das Standzeitverhalten vom ungeschädigten Ast in den geschädigten Ast „verzweigt“ hat.

III. Bei sprunghafter Änderung ist selbst eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit unmöglich.

IV. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen folgt für Epoxy 1 bzw. 2 ein Standzeitverhalten entsprechend den Diagrammen 6.17 bzw. 6.18. Dargestellt ist eine mögliche Ausbildung der Verzweigung des Standzeitverhaltens. Hierbei wird unterstellt, dass auf einem bestimmten Lastniveau (Lastbereich 3) eine Schwächung des Dübelsystems auftritt, die zu einem deutlich beschleunigten Versagen führt. Aufgrund dieser grundlegenden Änderung des Systemverhaltens kann vom Standzeitverhalten in Lastbereich 1 nicht auf das tatsächliche Standzeitverhalten auf Gebrauchslastniveau (unterer Lastbereich 2) geschlossen werden. Eine Extrapolation über eine derartige Verhaltensgrenze hinweg ist nicht zulässig. Es besteht zwischen beiden Standzeitverhalten kein kausaler Zusammenhang.

c) Gültigkeitsbereich

Aus den vorangegangenen Ausführungen folgt, dass eine Beschreibung des Standzeitkurvenverlaufs im Lastbereich 2 nicht durch die Extrapolation des Standzeitkurvenverlaufs in Lastbereich 1 erfolgen kann und umgekehrt. Die Standzeitkurvennäherungen haben somit ausschließlich innerhalb ihres jeweiligen Lastbereiches Gültigkeit. Zur Bestimmung des Standzeitverhaltens auf Gebrauchslastniveau sind demnach zwingend Versuche auf Lastniveaus des zugehörigen Lastbereichs 2 erforderlich. Für Epoxy 1 und 2 ist dies jedoch nicht praktikabel, weil hier in absehbarer Zeit nicht mit einem Versagen zu rechnen ist. Es ist jedoch denkbar, dass bei anderen Mörtelsystemen der Übergangslastbereich auf einem derart hohen Lastniveau liegt, dass auf den obersten Lastniveaus von Lastbereich 2 mit Versagen innerhalb einer akzeptablen Prüfdauer zu rechnen ist.



**Diagramm 6.17 (oben) und 6.18: Verzweigung des Standzeitverhaltens von Epoxy 1 (oben) und Epoxy 2**

<b>EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 84,2</math> kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)</b>									
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]
1	e1_base_68,0	1	80	14	eng	43	0,81	8,0	4,4
		2						2,0	
		3						5,2	
2.1	e1_base_63,8	1					0,76	528	102
		2						5,7	
		3						468	
2.2		1					0,76	65	
		2						120	
		3						100	
3	e1_base_59,5	1					0,71	65	242
		2						900	
		3						> 2280	
4	e1_base_55,3	1					0,66	> 1824	595
		2						357	
		3						993	
5	e1_base_46,8	1	0,56	> 1922	-				
		2		> 1922					
		3		> 1922					

**Tabelle 6.7:** Standzeiten, Epoxy 1

<b>EPOXY 2 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 85,8</math> kN, siehe Abschnitt 6.2.5.1)</b>									
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]
1	e2_base_68,5	1	80	14	eng	50	0,80	< 0,033	-
		2						< 0,033	
		3						1,6	
2	e2_base_59,9	1					0,70	0,4	1,8
		2						1,5	
		3						10	
3	e2_base_51,4	1					0,60	0,2	2,3
		2						5,0	
		3						12	
4	e2_base_45,0	1					0,52	1000	-
		2						> 6887	
		3						> 6887	
5	e2_base_35,4	1					0,41	> 6887	-
		2						> 6887	
		3						> 6887	
6	e2_base_21,5	1					0,25	> 6887	-
		2						> 6887	
		3						> 6887	

**Tabelle 6.8:** Standzeiten, Epoxy 2

#### **6.2.5.4 Zusammenfassung**

Eine Zusammenfassung findet sich im Rahmen einer Gesamtzusammenfassung sämtlicher Standzeitversuche in Abschnitt 6.5.

## 6.3 Abstützungsversuche mit Epoxy 1

### 6.3.1 Zielsetzung

Die vorangegangenen Standzeituntersuchungen mit Epoxy 1 und Epoxy 2 erfolgten mit einer engen Abstützung wie sie in ETAG bzw. AC zur Durchführung von Dauerlastversuchen vorgeschrieben ist. Um den Einfluss dieser Methode zur Lasteinleitung auf das Standzeitverhalten zu bestimmen, wurden Vergleichsversuche mit einer weiten Abstützung durchgeführt.

### 6.3.2 Ansatz

Das Konzept der hier durchgeführten Standzeitversuche nach Kapitel 3 setzt voraus, dass Betonversagen unter dauerhafter Lasteinwirkung auf praxisrelevanten Lastniveaus keinen realistischen Versagensfall darstellt. Um über den gesamten möglichen Prüflastbereich zwischen 0 kN und  $N_{u,m}$  im Standzeitversuch ein konsistentes Versagensverhalten zu erzwingen, erfolgte die Prüfung auf hohen Lastniveaus unter Anwendung einer engen Abstützung. Im Gegensatz hierzu soll nachfolgend durch eine möglichst weite Abstützung der Abstützlaster der Versuchsstände eine möglichst praxisnahe Verankerungssituation überprüft werden, bei der ein Betonversagen nicht verhindert wird. Um den Mörtel hiermit auf vergleichbar hohen Lastniveaus belasten zu können, wie bei der Durchführung der Versuche mit enger Abstützung, wurde die Einbindetiefe  $h_{ef}$  von 80 mm auf 105 mm erhöht. Um einen direkten Vergleich zwischen enger und weiter bzw. hier semi-weiter Abstützung (vgl. Kapitel 5, Abschnitt 5.4.2) zu ermöglichen, wurden zusätzlich eng abgestützte Standzeitversuche mit identischer Einbindetiefe als Referenz durchgeführt.

### 6.3.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Bohrlochdurchmesser  $d_{nom} = 14$  mm (Bohrreckmaß entsprechend  $d_{cut,m}$ )
- b) Einbindetiefe:  $h_{ef} = 105$  mm, Dübel zentriert
- c) Prüftemperatur:  $T = 43^{\circ}\text{C}$

## 6.3.4 Programm

### 6.3.4.1 Kurzzeitversuche

Die kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche bis zum Bruch dienen der Ermittlung des ersten Stützpunktes der Standzeitfunktion. Bei der Interpretation der Ergebnisse als Standzeiten sind die Anmerkungen in Kapitel 3, Abschnitt 3.2.2.1 zu beachten. Die Versuche mit enger Abstützung wurden erst im Zuge der Durchführung der Feuchteversuche in Kapitel 7 nachträglich durchgeführt (Charge C5), da sonst nicht genügend Versuchskörper derselben Charge (C2) für die Durchführung sämtlicher Dauerlastversuche zur Verfügung gestanden hätten.

EPOXY 1 / Baseline-Versuche							
Serienkennung	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Anz.
e1_105_eng_ $N_{u,m}$ *	E 1	105	14	C20/25	eng	43	4
e1_105_weit_ $N_{u,m}$					weit		
* Durchführung erst im Nachgang, im Zuge der Durchführung der Feuchteversuche (Kapitel 7)							

**Tabelle 6.9:** Übersicht, Kurzzeitversuche

### 6.3.4.2 Langzeitversuche (Standzeitversuche)

Die Lastniveaus der Langzeitversuche können grundsätzlich beliebig gewählt werden. Für die Serien der Baseline-Versuche mit Epoxy 1 mit weiter Abstützung und den zugehörigen Vergleichsversuchen mit enger Abstützung wurden jeweils drei Versuche auf den nachfolgend aufgeführten Laststufen vorgesehen:

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit dem Wert für $N_{u,m}$ der weiten Abstützung)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	e1_105_eng_75,0	105	14	C20/25	eng	43	0,80	75,0	3
2	e1_105_eng_65,0						0,70	65,0	
3	e1_105_eng_55,0						0,59	55,0	
4	e1_105_eng_46,8						0,50	46,8	
5	e1_105_eng_30,0						0,32	30,0	

**Tabelle 6.10:** Übersicht, Langzeitversuche „eng“

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m}$ (weit) = 93,4 kN, siehe Abschnitt 6.3.5.1)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	e1_105_weit_55,0	105	14	C20/25	weit	43	0,70	55,0	3
2	e1_105_weit_50,0						0,59	50,0	
3	e1_105_weit_46,8						0,50	46,8	
4	e1_105_weit_30,0						0,32	30,0	

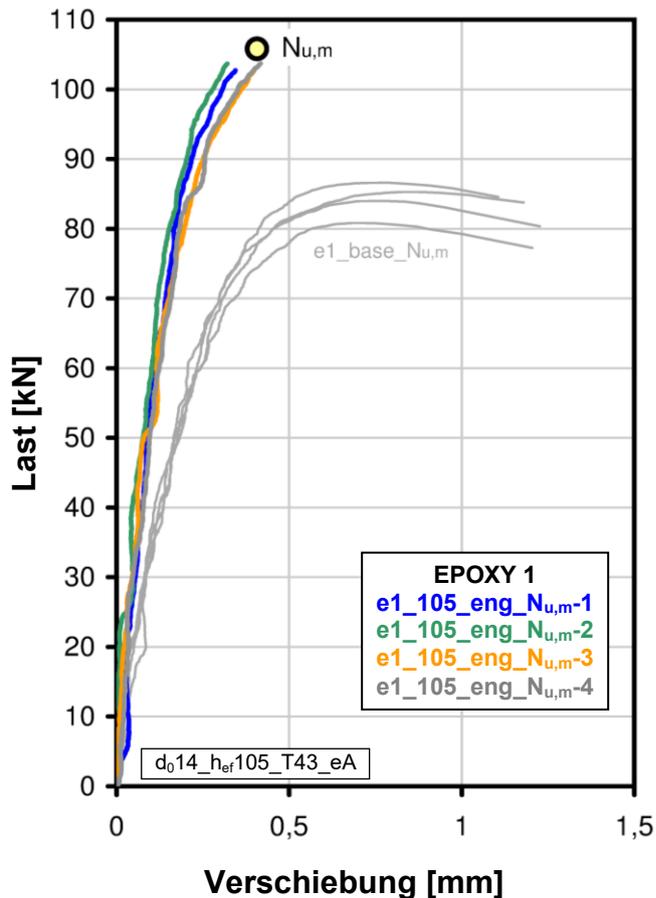
**Tabelle 6.11:** Übersicht, Langzeitversuche „weit“

## 6.3.5 Ergebnisse

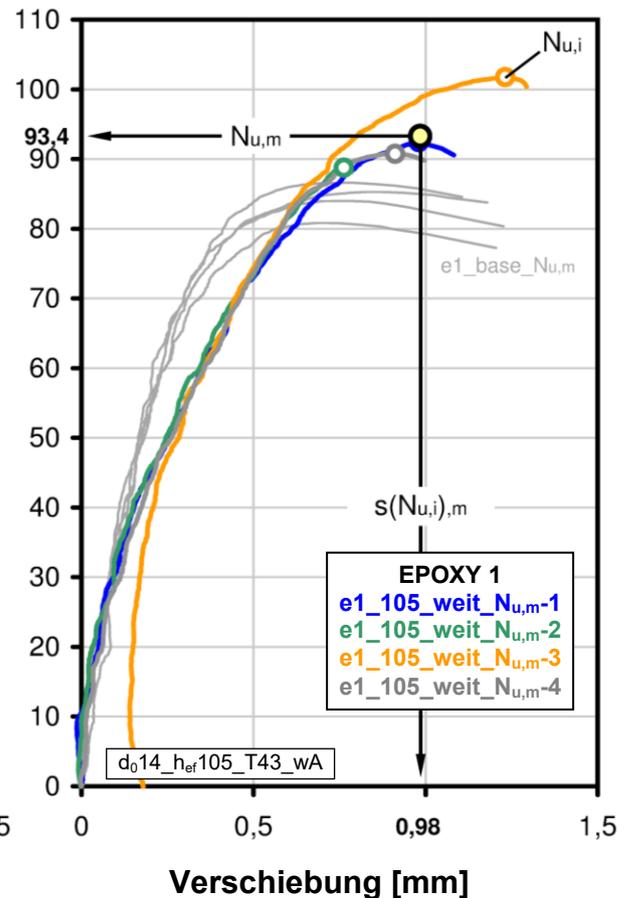
### 6.3.5.1 Analyse Kurzzeitversuche

(Abstützungsversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen  $e1_{105\_eng\_N_{u,m}}$  und  $e1_{105\_weit\_N_{u,m}}$ )

Die Diagramme 6.19 und 6.20 zeigen die Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche (Referenzversuche) beider Abstützarten zur Bestimmung der mittleren Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ . Zum Vergleich sind ebenfalls jeweils die Referenzversuche der Baseline-Versuche  $e1\_base$  mit einer Einbindetiefe von  $h_{ef} = 80$  mm abgebildet.



**Diagramm 6.19:**  
Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit Epoxy 1, enge Abstützung



**Diagramm 6.20:**  
Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit Epoxy 1, weite Abstützung

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Das Versagen der Versuche mit weite Abstützung erfolgte durch einen teilweisen Betonausbruch. Die Tiefe der Ausbruchkegel entsprach im Mittel ca.  $0,5 h_{ef}$ . Sämtliche Versuche mit enger Abstützung versagten durch Stahlbruch.
- b) Verschiebungscharakteristik
  - I. Die Last-Verschiebungskurven beider Serien zeigen, jeweils untereinander verglichen, eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung der Kurve des Versuches  $e1_{105\_weit\_N_{u,m}-3}$  ist auf einen Setupfehler des Wegaufnehmers zurückzuführen.
  - II. Bei den Versuchen mit enger Abstützung ist der Verlauf von Beginn an linear bis zu einer Last von ca. 60 kN. Oberhalb dieser Grenze erfolgt ein geringer aber

stetig fortschreitender Steifigkeitsabfall, der ab ca. 90 kN durch das Versagenverhalten der Gewindestange selbst bestimmt und für das Standzeitverhalten des Mörtels nicht relevant ist (vgl. auch Diagramm 6.21).

Bei den Versuchen mit weiter Abstützung ist der Verlauf von Beginn an linear bis zu einer Last von ca. 30 kN. Hier tritt ein signifikanter Steifigkeitsabfall auf (vgl. auch Diagramm 6.22). Es wird angenommen, dass dieser durch die Ausbildung des Bruchkegels verursacht wird. Im weiteren Verlauf verringert sich die Steifigkeit zunächst gering, oberhalb von ca. 75 kN zunehmend schneller, bis schließlich der Bruch eintritt. Unter der Voraussetzung, dass ein Steifigkeitsabfall grundsätzlich eine Systemschädigung anzeigt, muss hier in Standzeitversuchen mit weiter Abstützung bereits ab ca. 30 kN mit einer Vorschädigung gerechnet werden, die zu einer Verringerung der Tragfähigkeit unter Dauerlast führt. Bei enger Abstützung ist dies hier, wie oben beschrieben, erst ab ca. der doppelten Last von 60 kN der Fall.

EPOXY 1 / Baseline-Versuche												
Serienkennung	V [Nr.]	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	$N_{u,i}$ [kN]	$N_{u,m}$ [kN]	v [%]		
e1_105_eng_ $N_{u,m}$	1	E 1	105	14	C20/25	eng	43	-	-	-		
	2							-				
	3							-				
	4							-				
e1_105_weit_ $N_{u,m}$	1					weit		92,2			93,4	6,10
	2							88,9				
	3							101,7				
	4							90,8				

**Tabelle 6.12:** Einzelfestigkeiten

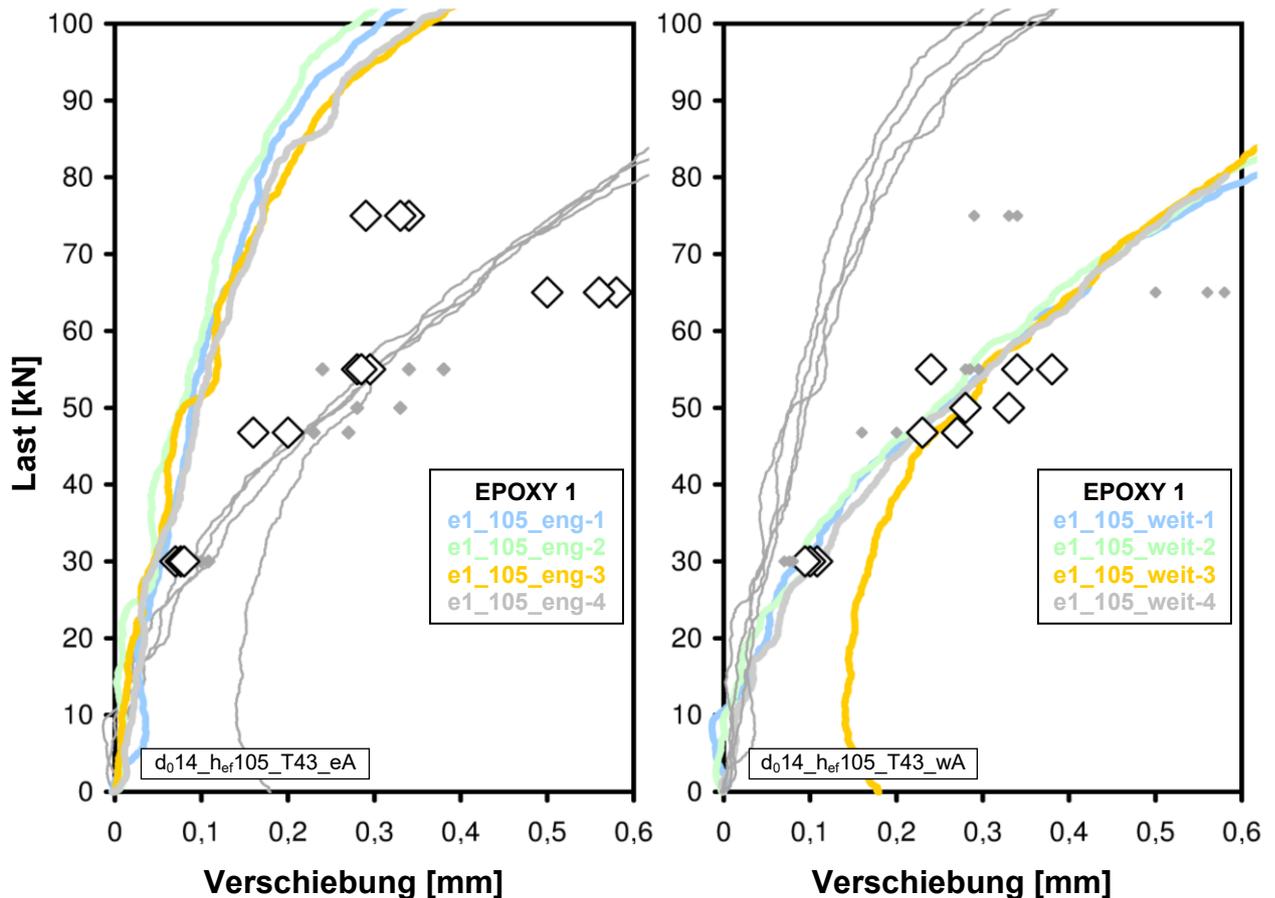
### 6.3.5.2 Analyse Langzeitversuche

(Abstützungsversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_105\_eng und e1\_105\_weit)

#### 6.3.5.2.1 Anfangsverschiebungen

Die Diagramme 6.21 und 6.22 zeigen die Anfangsverschiebungen der Versuche mit weiter und mit enger Abstützung im direkten Vergleich. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5.

Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.



**Diagramm 6.21:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Epoxy 1 mit enger Abstützung

**Diagramm 6.22:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Epoxy 1 mit weiter Abstützung

Es ist zu erkennen, dass die rückwärts extrapolierten Anfangsverschiebungen der Versuche mit weiter Abstützung eine gute Übereinstimmung mit den Verschiebungswerten im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch zeigen. Im Gegensatz hierzu zeigen die Anfangsverschiebungen der Versuche mit enger Abstützung keine entsprechende Übereinstimmung.

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 93,4$ kN der weiten Abstützung)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]												
1	e1_105_eng_75,0	1	105	14	eng	43	0,80	0,34	0,32												
		2						0,29													
		3						0,33													
2	e1_105_eng_65,0	1					105	14	eng	43	0,70	0,50	0,55								
		2										0,58									
		3										0,56									
3	e1_105_eng_55,0	1									105	14	eng	43	0,59	0,30	0,29				
		2														0,28					
		3														0,29					
4	e1_105_eng_46,8	1													105	14	eng	43	0,50	0,16	0,17
		2																		0,20	
		3																		0,16	
5	e1_105_eng_30,0	1					105	14	eng	43									0,32	0,07	0,08
		2																		0,08	
		3																		0,08	

**Tabelle 6.13:** Anfangsverschiebungen, „enge Abstützung“

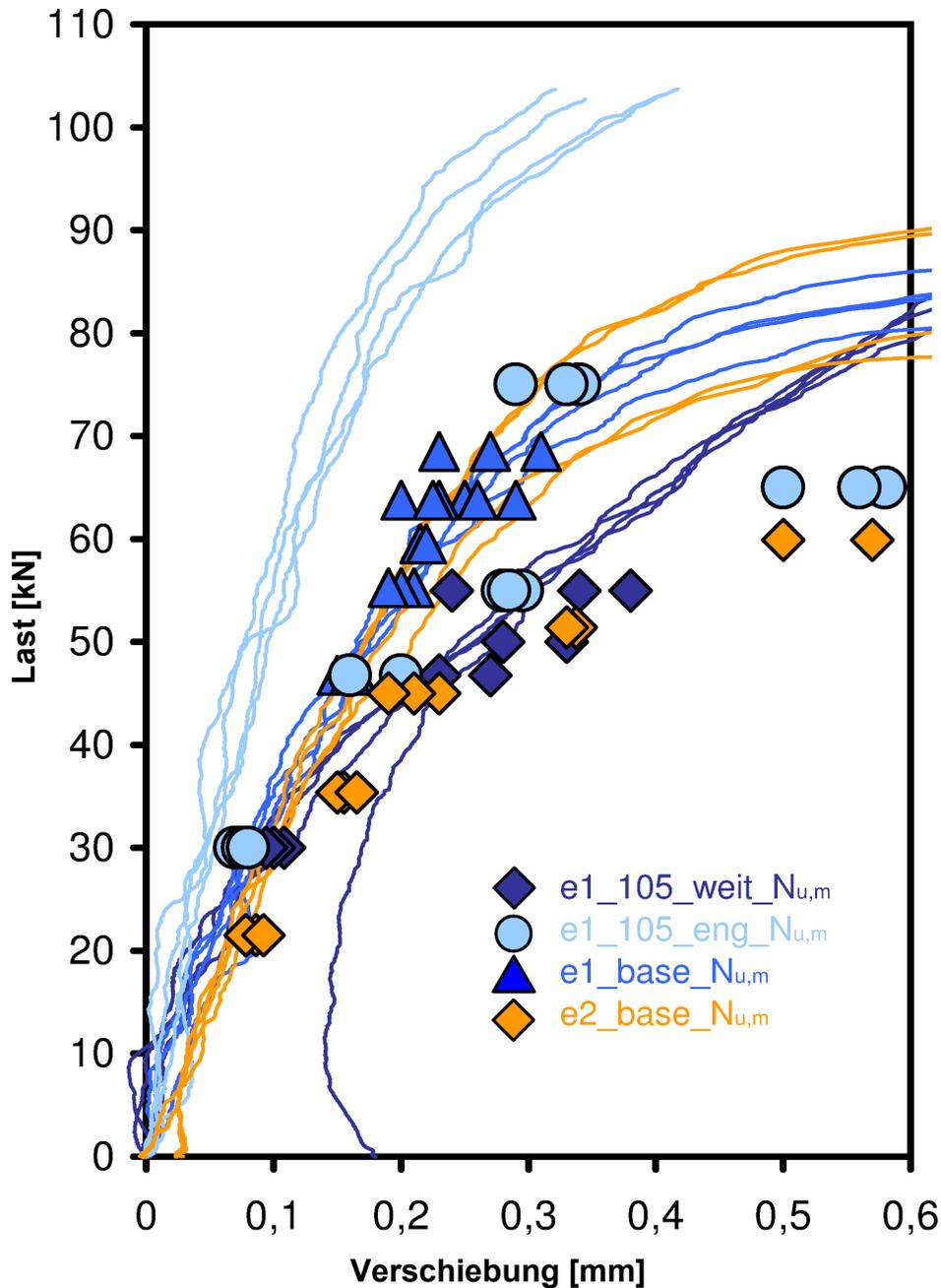
EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m}$ (weit) = 93,4 kN, siehe Abschnitt 6.3.5.1)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]												
1	e1_105_weit_55,0	1	105	14	weit	43	0,59	0,24	0,32												
		2						0,38													
		3						0,34													
2	e1_105_weit_50,0	1					105	14	weit	43	0,54	0,33	0,31								
		2										0,33									
		3										0,28									
3	e1_105_weit_46,8	1									105	14	weit	43	0,50	0,27	0,26				
		2														0,23					
		3														0,27					
4	e1_105_weit_30,0	1													105	14	weit	43	0,32	0,11	0,10
		2																		0,10	
		3																		0,09	

**Tabelle 6.14:** Anfangsverschiebungen, „weite Abstützung“

In Diagramm 6.23 sind die Anfangsverschiebungen der zugehörigen Baseline-Versuche ergänzt. Es ist leicht zu erkennen, dass die Anfangsverschiebungen der eng abgestützten Versuche e1\_105\_eng mindestens ab einer Belastung von ca. 45 kN erheblich größer sind als diejenigen der identisch abgestützten Baseline-Versuche mit der geringeren Einbindetiefe von  $h_{ef} = 80$  mm. Dies entspricht keinesfalls den Erwartungen, da aufgrund der größeren Einbindetiefe und der damit verbundenen reduzierten Schubspannungen in jedem Fall mit geringeren Verschiebungen zu rechnen ist.

Bedenkt man den Umstand, dass die Kurzzeitversuche e1\_105\_eng\_ $N_{u,m}$ , im Gegensatz zu den übrigen im Diagramm dargestellten Versuchen, in nahezu vollständig ausgetrockneten Versuchskörpern durchgeführt wurden, so liefern die Ergebnisse der im An-

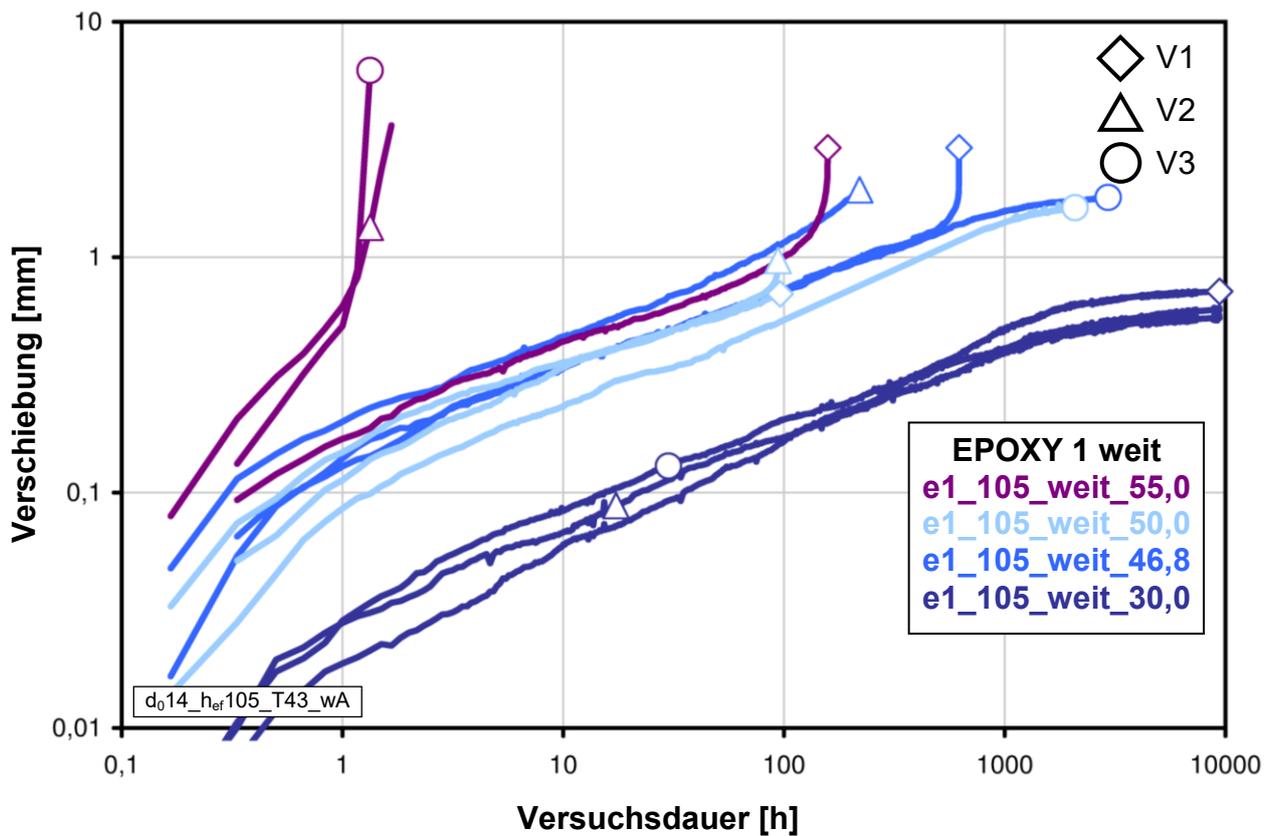
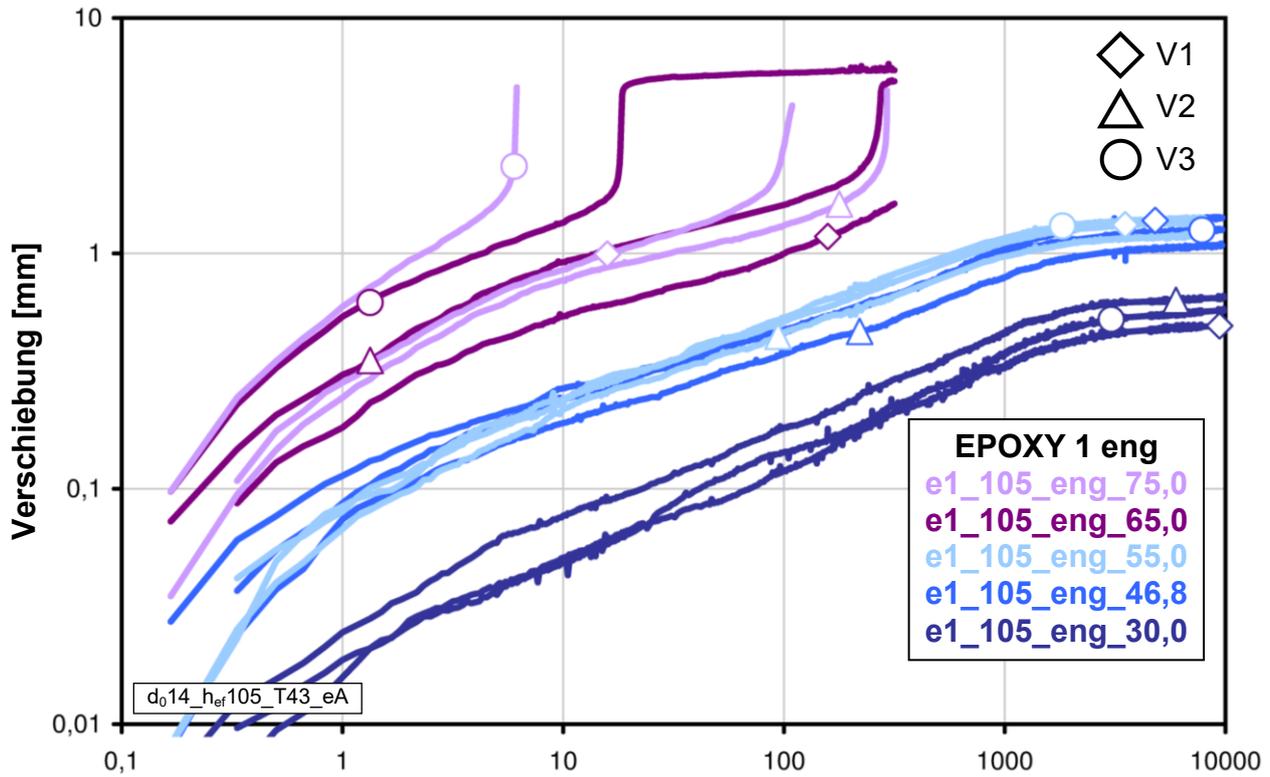
schluss an die Standzeituntersuchungen durchgeführten Dauerlastversuche mit Epoxy 1 zum Einfluss der Feuchte auf die Verbundausbildung (siehe Kapitel 7, Abschnitt 7.7.7, Punkt b)) eine plausible Erklärung für dieses Verhalten. Hinweise auf eine hieraus resultierende Abhängigkeit der Kurzzeitfestigkeit epoxidharzbasierter Verbunddübelsysteme von der Restfeuchte des Betonkörpers finden sich in [38].



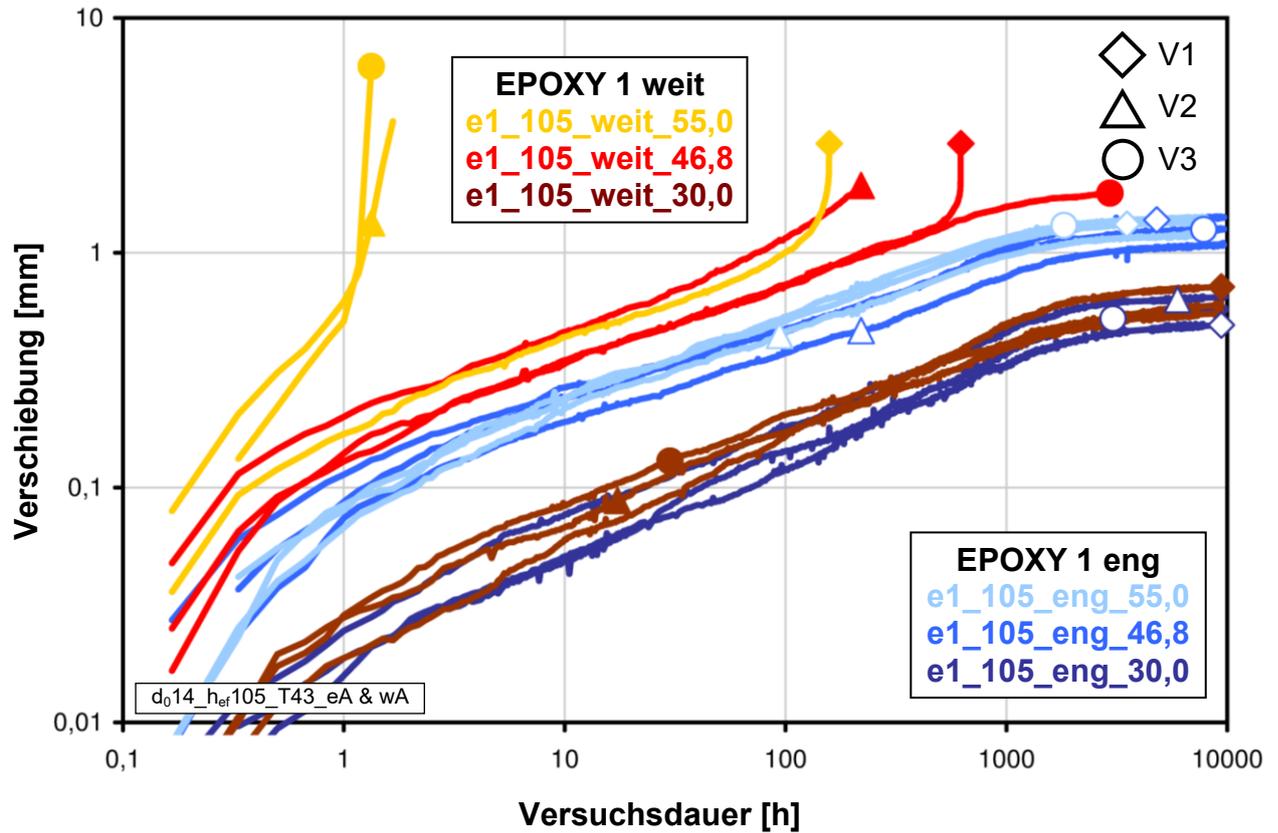
**Diagramm 6.23:** Gegenüberstellung von Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation

### 6.3.5.2.2 Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten

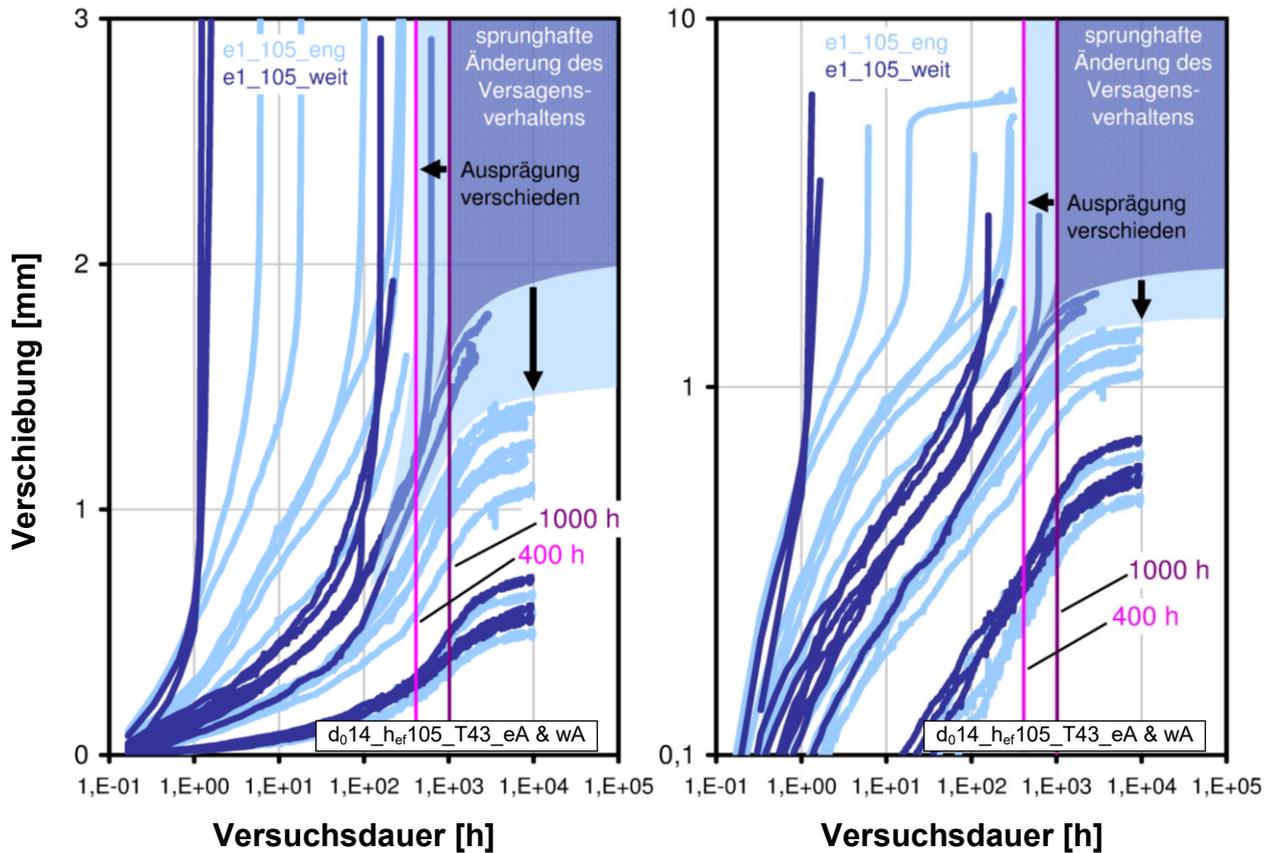
Die Diagramme 6.24 und 6.25 zeigen sämtliche Verschiebungskurven der Versuchsreihen e1\_105\_eng und e1\_105\_weit. Das Diagramm 6.26 zeigt diese im direkten Vergleich. Die Diagramme 6.27 und 6.28 zeigen eine Gegenüberstellung sämtlicher Verschiebungskurven, sowohl im doppelt-logarithmischen als auch im einfach-logarithmischen Maßstab.



**Diagramm 6.24 (oben) und 6.25:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit enger (oben) und weiter Abstützung unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung auf verschieden hohen Lastniveaus



**Diagramm 6.26:** Gegenüberstellung der Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit enger (blau) und weiter Abstützung (rot) unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung auf den drei niedrigsten Lastniveaus



**Diagramm 6.27 (links) und 6.28:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab

In der Verschiebungscharakteristik und dem Versagensverhalten der Versuche e1\_105\_eng und e1\_105\_weit finden sich die wesentlichen Merkmale der Baseline-Versuche e1\_base und e2\_base entsprechend wieder. Diese sind nachfolgend in nur verkürzter Form nochmals aufgeführt und beschränken sich meist auf die Aussage. Erläuterungen finden sich an entsprechender Stelle bei den Baseline-Versuchen in Abschnitt 6.2.5.2.2. Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Verschiebungscharakteristik

- I. Es kann generell keine Verschiebungscharakteristik nach FINDLEY festgestellt werden.
- II. Bei Versuchen ohne Versagen kann ein Stabilisierungsverhalten beobachtet werden.

b) Versagensverhalten

- I. Bei weiter Abstützung fand das Versagen des Dübelabschnitts unterhalb des Ausbruchkegels zwischen Verbundmörtel und Beton statt, wie zuvor bei den Baseline-Versuchen.
- II. Die Unterteilung des Standzeitverhaltens in drei Lastbereiche gilt entsprechend.
- III. Der Übergangsbereich im Versagensverhalten (Lastbereich 3) befindet sich auf dem Lastniveau des ersten Steifigkeitsabfalls im kurzzeitigen Referenzversuch.
- IV. Das Last-Verschiebungsverhalten der kurzzeitigen Referenzversuche lässt dieses Ausmaß der Standzeitreduktion nicht erwarten.

c) Abstützungsspezifische Besonderheiten

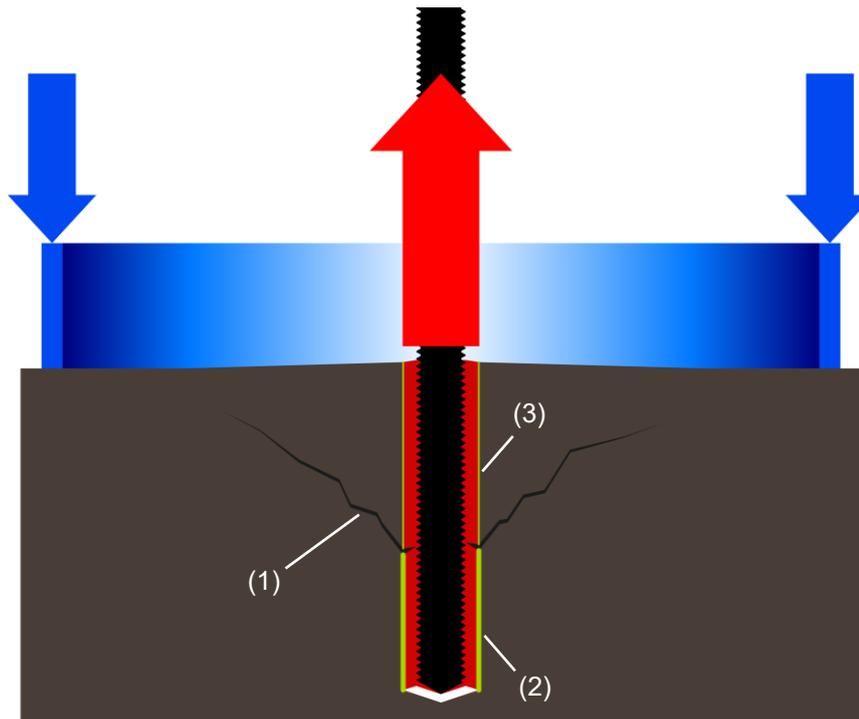
I. Die Kurvenverläufe der Versuche e1\_105\_eng\_30 und e1\_105\_weit\_30 unterscheiden sich nur in sehr geringem Maß. Die geringfügig größeren Verschiebungen bei weiter Abstützung werden auf die Dehnung des Betons zurückgeführt. Bei enger Abstützung sind diese im Messweg nicht enthalten. Aus den geringen Unterschieden kann geschlossen werden, dass die Tragmechanismen beider Setups auf diesem Lastniveau noch identisch sind und sich noch kein Einfluss des Betons zeigt, beispielsweise in Form von Rissbildung.

II. Oberhalb einer Dauerlast von 30 kN zeigen Versuche mit weiter Abstützung, im Vergleich zu Versuchen mit enger Abstützung bei gleicher Last, eine erheblich verringerte Dauerhaftigkeit. Das Versagen dieser Versuche erfolgt generell unter Bildung eines Betonausbruchkegels (Abbildung 6.1, (1)) mit einer Tiefe von ca.  $0,5 h_{ef}$ . Das Versagen des Verankerungsbereichs unterhalb der Ausbruchkegel (2) erfolgte grundsätzlich zwischen Mörtel und Beton. Aufgrund der vergleichsweise sehr geringen Standzeiten ist davon auszugehen, dass der Tragwiderstand während des Dauerlastversuchs vorrangig durch diesen unteren Abschnitt der Einbindetiefe gebildet wird.

Umfangreiche numerische Untersuchungen von APPL zeigten auf, dass bei Verbunddübeln bereits bei Lasten von  $0,5 N_{u,m}$  mit der Bildung eines breiten Sammelrisses in dieser Tiefe zu rechnen ist [8]. Durch den Steifigkeitsabfall der Bettung in Dübellängsrichtung zwischen Riss und Betonoberfläche nimmt dort der Verformungswiderstand ab. Aufgrund des jetzt vergleichsweise höheren Verformungswiderstandes des Dübelabschnitts unterhalb des Risses (steiferes Verhalten) muss dieser nun den überwiegenden Anteil der Last tragen („Steifigkeit zieht Kräfte an“). Die Dauerhaftigkeit des Systems wird somit nicht mehr durch den gesamten Dübel gewährleistet, sondern vorwiegend von demjenigen Abschnitt, der sich unterhalb des Risses befindet. Geht man davon aus, dass der Traganteil des Kegels ab einem bestimmten Lastniveau bereits während der Belastungsphase soweit reduziert ist, dass er keinen positiven Einfluss mehr auf die Dauerhaftigkeit des Systems aufweist, so ist diese ausschließlich durch das Standzeitverhalten des Dübelabschnitts unterhalb des Risses bestimmt. Die Lasten müssen dann schon zu Beginn des Versuchs allein von dem verbleibenden Dübelabschnitt unterhalb des Kegels aufgenommen werden, mit entsprechend verringerter Dauerhaftigkeit. Es ist zu erwarten, dass diese denjenigen Versuchen mit enger Abstützung gleicht, deren Einbindetiefe der verbliebenen Resteinbindetiefe entspricht.

Mehr noch als bei Versuchen mit enger Abstützung wird bei Versuchen mit weiter Abstützung ein komplexes Systemverhalten geprüft und nicht nur ein reines Materialverhalten wie z.B. bei der Dauerhaftigkeitsprüfung von mit Innendruck beaufschlagten Kunststoffrohren. Grund ist, dass durch die weite Abstützung zusätzlich diejenigen mechanischen Eigenschaften des umgebenden Betons das Systemverhalten bestimmen können, die bei Anwendung einer engen Abstützung unterdrückt sind.

III. Die Untersuchung des Dübelverhaltens unter Dauerlast bei Anwendung einer engen Abstützung liefert fragwürdige Ergebnisse, da zumindest im Fall des hier getesteten Epoxy 1 der maßgebliche Versagensfall durch die enge Abstützung unterdrückt und die tatsächliche Dauerhaftigkeit hierbei deutlich überschätzt wird.



(1) Rissbildung, (2) Bereich hoher Lastaufnahme,  
(3) Bereich geringer Lastaufnahme

**Abbildung 6.1:** schematische Darstellung des Lastabtrags mit weiter Abstützung bei Rissbildung im Beton

### 6.3.5.3 Standzeitkurven

(Abstützungsversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_105\_eng und e1\_105\_weit)

Die nachfolgend dargestellten Standzeitkurven basieren jeweils auf einer Regressionsanalyse mittels einer Potenzfunktion unter Verwendung der logarithmischen Mittel sämtlicher ermittelter Standzeiten einer Laststufe der Versuche e1\_105\_weit und e1\_105\_eng sowie der zugehörigen kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche e1\_105\_weit\_N<sub>u,m</sub> und e1\_105\_eng\_weit\_N<sub>u,m</sub>. Die Diagramme enthalten Extrapolationen auf 10 bzw. 50 Jahre unter ausschließlicher Verwendung tatsächlich versagter Versuche.

Die Diagramme 6.29 und 6.30 zeigen Standzeitkurven, die auf Basis einer Potenzfunktion unter Verwendung sämtlicher versagter Versuche ermittelt wurden. Im Standzeitverhalten der Versuche e1\_105\_eng und e1\_105\_weit finden sich die wesentlichen Merkmale des Standzeitverhaltens der Baseline-Versuche e1\_base und e2\_base wieder. Diese sind nachfolgend in nur verkürzter Form nochmals aufgeführt und beschränken sich meist auf die Aussage. Erläuterungen finden sich an entsprechender Stelle bei den Baseline-Versuchen in Abschnitt 6.2.5.3. Folgendes kann festgestellt werden:

#### a) Verlaufscharakteristik

I. Aufgrund des Umstands, dass bereits während der Belastungsphase von einer Vorschädigung auszugehen ist, kann auch für die Versuche e1\_105\_eng und e2\_105\_weit ein Standzeitkurvenverlauf mit der Charakteristik einer Potenzfunktion praktisch ausgeschlossen werden.

II. Die Standzeitkurve der eng abgestützten Versuche bestätigt die oben gemachte Aussage. Der Ansatz einer Potenzfunktion ist offensichtlich ungeeignet. Für die Versuche mit weiter Abstützung scheint dieser jedoch zunächst eine gute Näherung darzustellen. Da bei den Versuchen mit weiter Abstützung sogar von einer besonders ausgeprägten Vorschädigung während der Belastungsphase ausgegangen werden muss (kegelartige Rissbildung im Beton), ist zu erwarten, dass die tatsächliche Standzeitkurve sich bei der hier verwendeten logarithmischen Zeitskala dem Lastniveau der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  entsprechend asymptotisch annähert (vgl. Diagramm 6.16). Die vermeintlich gute Näherung ist hier auf die Wahl sehr eng beieinanderliegender Lastniveaus zurückzuführen, durch die der Übergang von Lastbereich 1 zu Lastbereich 3 nicht differenziert genug abgebildet wird.

b) Stetigkeit

I. Für beide Abstützarten gilt, dass sich das Standzeitverhalten im Lastbereich 1 von demjenigen im Lastbereich 2 unterscheidet (vgl. Abschnitt 6.2.5.2.2 / b) / II.). Der Übergang zwischen beiden Ausprägungen findet innerhalb des Übergangslastbereichs (Lastbereich 3) statt und erfolgt sprunghaft. Der Grad der hierfür ursächlichen Vorschädigung muss deshalb bereits während der Belastungsphase von Null auf ein signifikantes Niveau gesprungen sein.

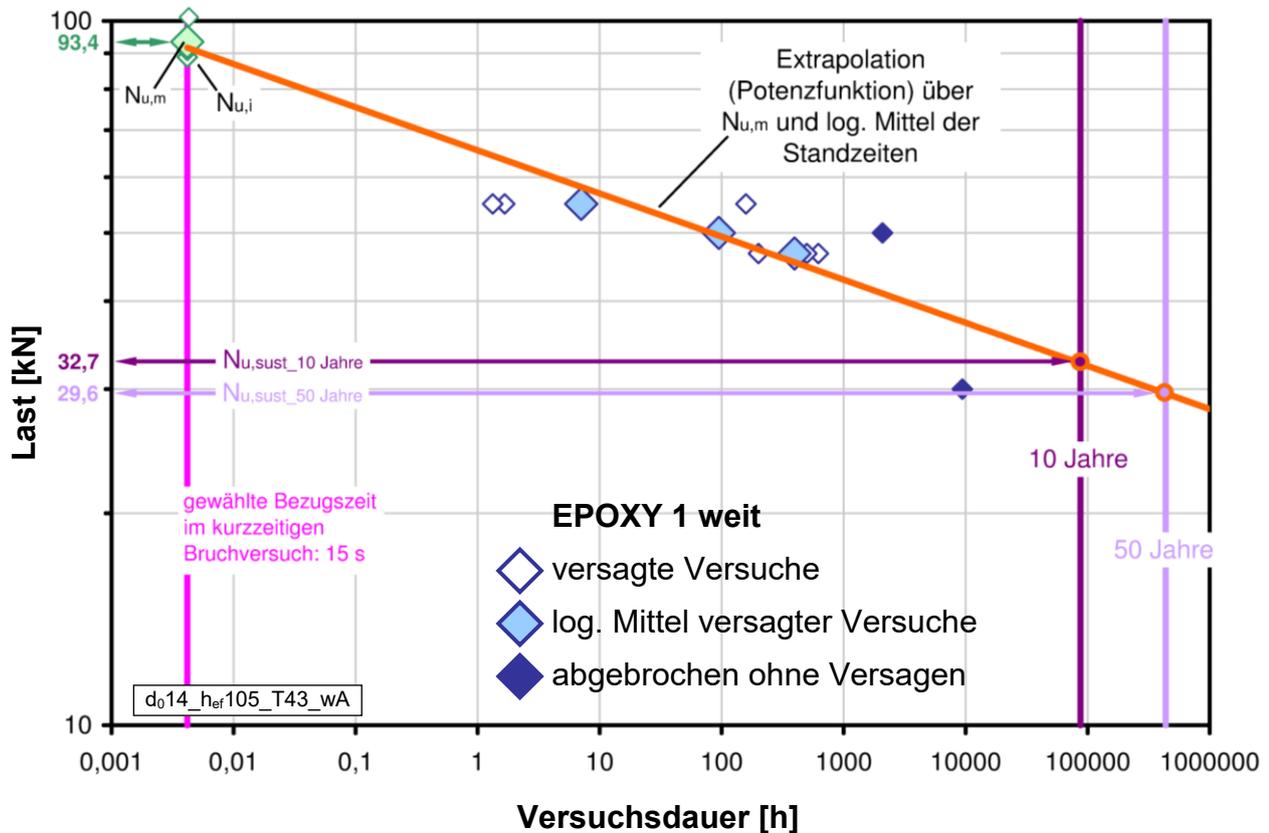
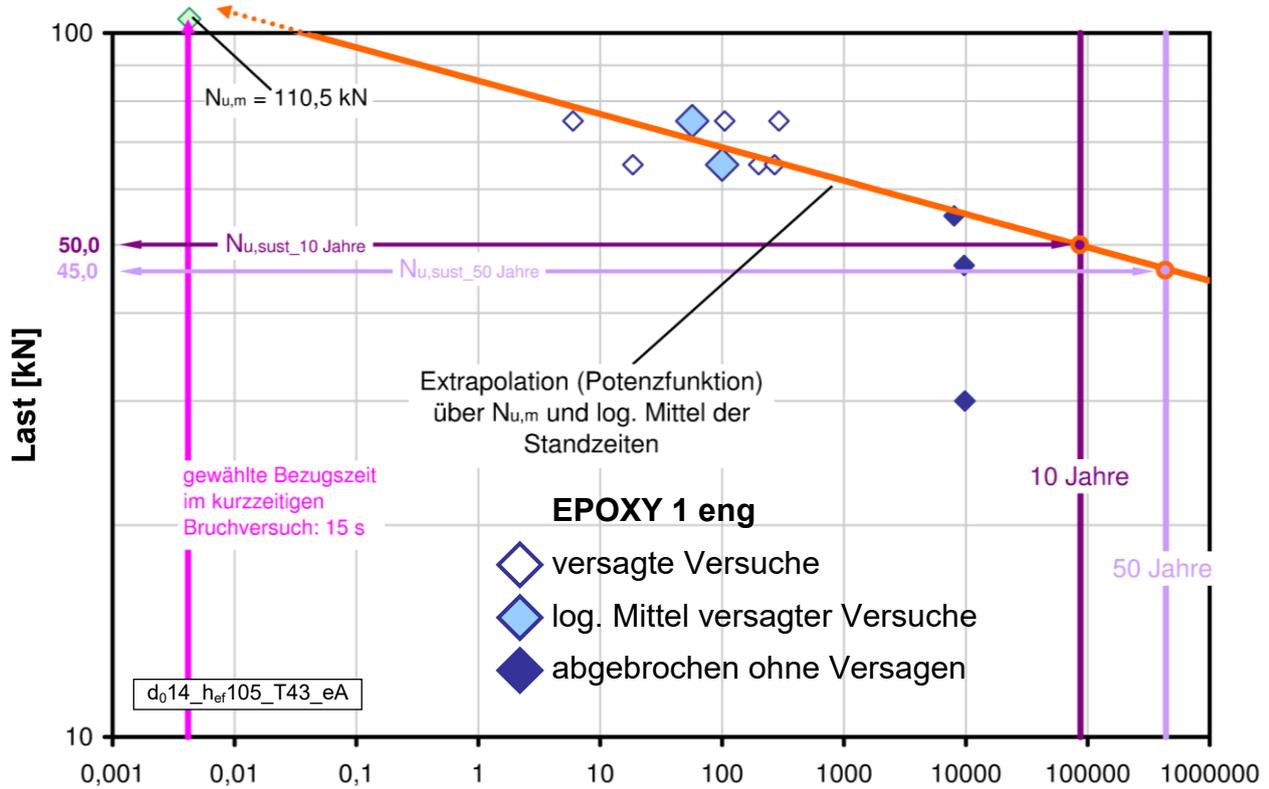
II. Aufgrund des Verzweigens des Standzeitverhaltens kann bei Versuchen, die eine Vorschädigung erlitten haben (Versuche im Lastbereich 1 und teilweise in Lastbereich 3), der für die Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveaus tatsächlich relevante Versagensmechanismus nicht mehr beobachtet werden.

III. Da die Änderung im Standzeitverhalten sprunghaft erfolgt, ist selbst eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveau nicht möglich.

IV. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen sowie der Erläuterungen zu Diagramm 6.16 folgt für beide Abstützarten ein Standzeitverhalten entsprechend den Diagrammen 6.31 bzw. 6.32 (Erläuterung, siehe Abschnitt 6.2.5.3 / b) / III.).

c) Gültigkeitsbereich

Die Standzeitkurvennäherungen haben ausschließlich innerhalb ihres jeweiligen Lastbereichs (Lastbereich 1 oder 2) Gültigkeit. Eine Extrapolation über Bereichsgrenzen hinweg ist nicht zulässig.



**Diagramm 6.29 (oben) und 6.30:** Standzeitkurven von Epoxy 1 mit enger Abstützung (oben) und weiter Abstützung unter Zugrundelegung einer Potenzfunktion

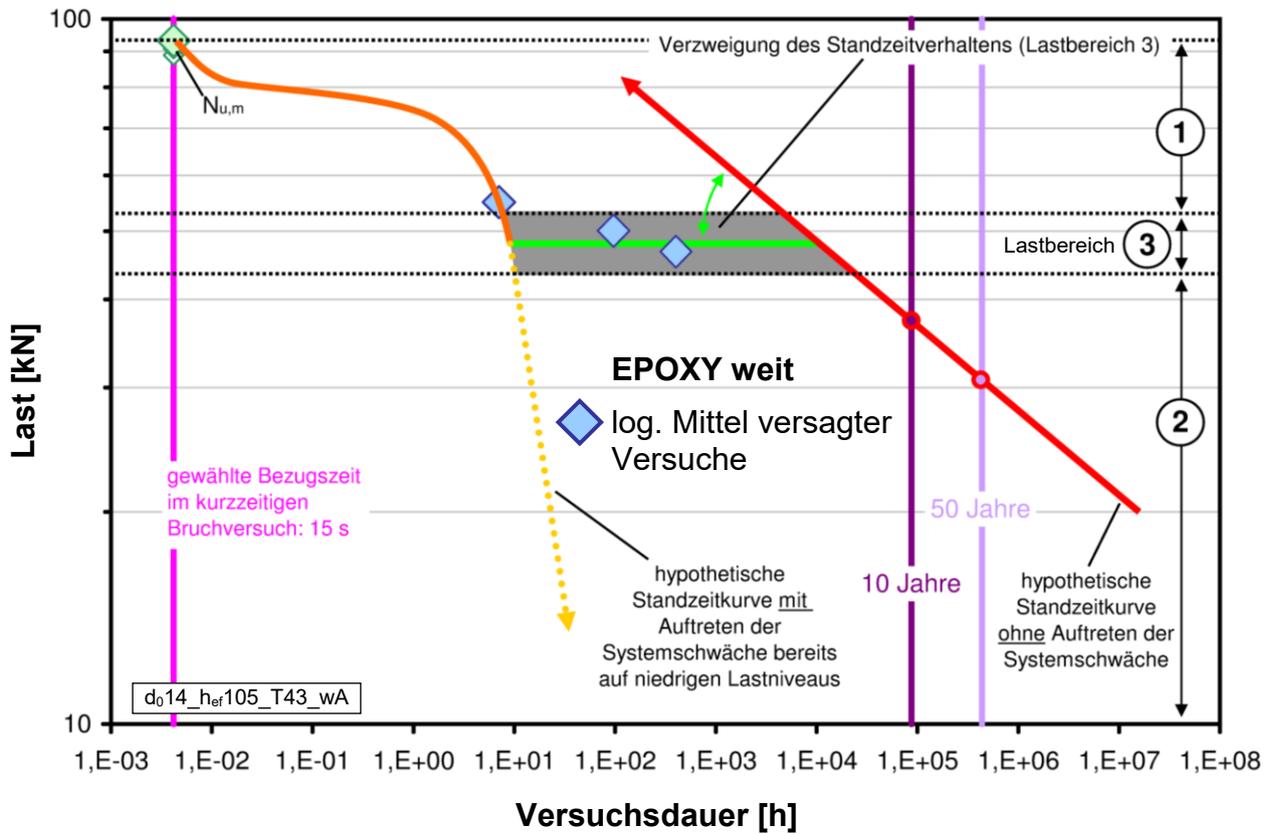
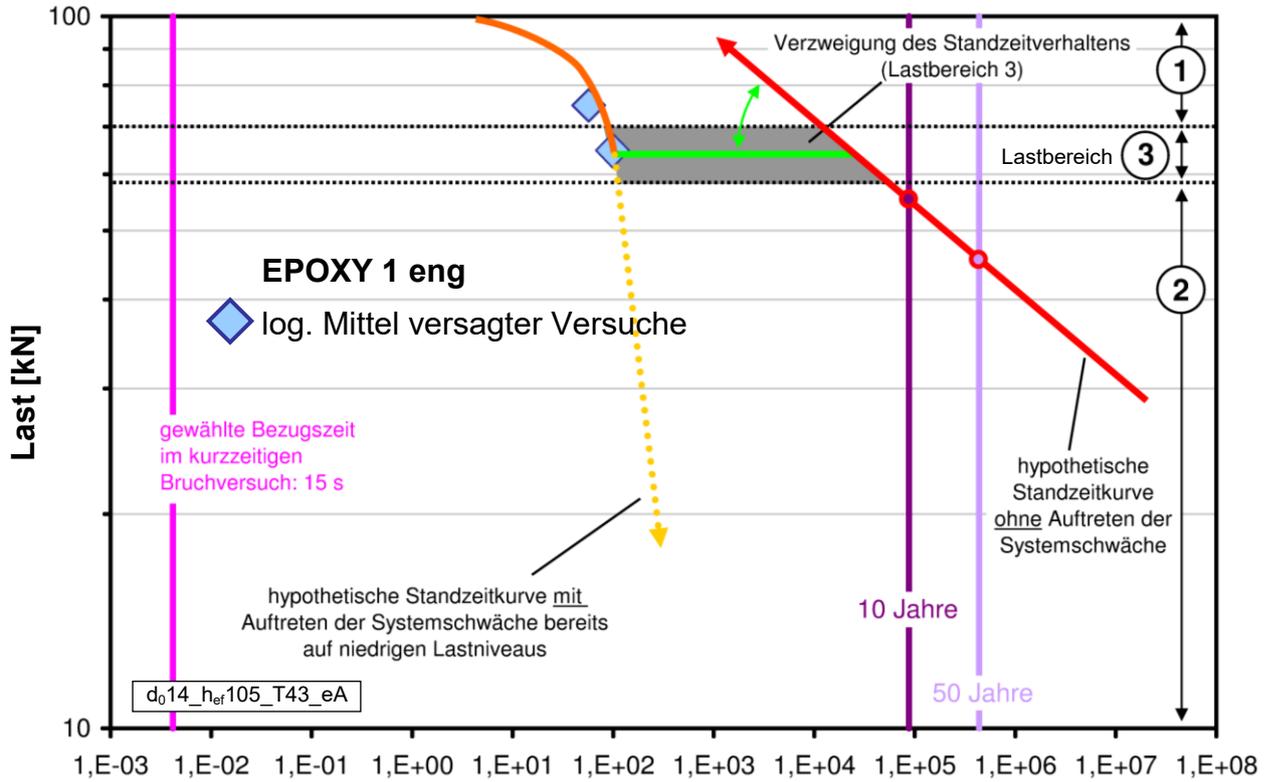


Diagramm 6.31 (oben) und 6.32: Verzweigung des Standzeitverhaltens von Epoxy 1 mit enger Abstützung (oben) und weiter Abstützung

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 93,4$ kN der weiten Abstützung)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]												
1	e1_105_eng_75,0	1	105	14	eng	43	0,80	105	56,9												
		2						293													
		3						6,0													
2	e1_105_eng_65,0	1					105	14	eng	43	0,70	200	100								
		2										270									
		3										18,5									
3	e1_105_eng_55,0	1									105	14	eng	43	0,59	> 8020	-				
		2														> 8020					
		3														> 8020					
4	e1_105_eng_46,8	1													105	14	eng	43	0,50	> 9660	-
		2																		> 9660	
		3																		> 9660	
5	e1_105_eng_30,0	1					105	14	eng	43									0,32	> 9810	-
		2																		> 9810	
		3																		> 9810	

**Tabelle 6.15:** Standzeiten, „enge Abstützung“

EPOXY 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 93,4$ kN der weiten Abstützung)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]												
1	e1_105_weit_55,0	1	105	14	weit	43	0,59	158	7,1												
		2						1,67													
		3						1,33													
2	e1_105_weit_50,0	1					105	14	weit	43	0,54	96	95								
		2										94									
		3										> 2087									
3	e1_105_weit_46,8	1									105	14	weit	43	0,50	620	396				
		2														200					
		3														500					
4	e1_105_weit_30,0	1													105	14	weit	43	0,32	> 9399	-
		2																		> 9399	
		3																		> 9399	

**Tabelle 6.16:** Standzeiten, „weite Abstützung“

#### 6.3.5.4 Zusammenfassung der Abstützungsversuche mit Epoxy 1

Eine Zusammenfassung findet sich im Rahmen einer Gesamtzusammenfassung sämtlicher Standzeitversuche in Abschnitt 6.5.

## 6.4 Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2

### 6.4.1 Zielsetzung

Die Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2 dienen dem Ziel, eine Vergleichsreferenz für weiterführende Untersuchungen (z.B. Parameterstudien) auf Basis dieser Mörtel zu schaffen sowie die grundsätzliche Tauglichkeit der Standzeitmethode für die Prognose der Dauerhaftigkeit von Verbunddübeln zu überprüfen.

### 6.4.2 Ansatz

Es wurde das Standardsetup mit enger Abstützung nach Kapitel 5 verwendet. Die Einbindetiefe wurde so gewählt, dass eine gute Vergleichbarkeit mit einer Großzahl der Dauerlastversuche gegeben ist, die im Rahmen früherer Zulassungsversuche am IWB durchgeführt wurden.

### 6.4.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Bohrlochdurchmesser:  $d_{\text{nom}} = 14 \text{ mm}$  (Bohrereckmaß entsprechend  $d_{\text{cut,m}}$ )
- b) Einbindetiefe:  $h_{\text{ef}} = 80 \text{ mm}$ , Dübel zentriert
- c) Prüftemperatur:  $T = 43^\circ\text{C}$

## 6.4.4 Programm

### 6.4.4.1 Kurzzeitversuche

Die kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche bis zum Bruch dienen der Ermittlung des ersten Stützpunktes der Standzeitfunktion. Bei der Interpretation der Ergebnisse als Standzeiten sind die Anmerkungen in Kapitel 3, Abschnitt 3.2.2.1 zu beachten.

VINYL 1 & 2 / Baseline-Versuche							
Serienkennung	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Anz.
v1_base_ $N_{u,m}$	V 1	80	14	C20/25	eng	43	4
v2_base_ $N_{u,m}$	V 2						

**Tabelle 6.17:** Übersicht, Kurzzeitversuche

### 6.4.4.2 Langzeitversuche (Standzeitversuche)

Die Lastniveaus der Langzeitversuche können grundsätzlich beliebig gewählt werden. Für die Serien der Baseline-Versuche von Vinyl 1 und 2 wurden je drei Versuche auf folgenden Laststufen vorgesehen:

VINYL 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 66,6$ kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	v1_base_33,0	80	14	C20/25	eng	43	0,50	33,0	3
2	v1_base_30,0						0,45	30,0	
3	v1_base_27,2						0,41	27,2	
4	v1_base_15,0						0,23	15,0	

**Tabelle 6.18:** Übersicht, Langzeitversuche mit Vinyl 1

VINYL 2 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 56,8$ kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	Last [kN]	Anz.
1	v2_base_42,6	80	14	C20/25	eng	43	0,75	42,6	3
2	v2_base_39,7						0,70	39,7	
3	v2_base_36,9						0,65	36,9	
4	v2_base_23,4						0,41	23,4	

**Tabelle 6.19:** Übersicht, Langzeitversuche mit Vinyl 2

## 6.4.5 Ergebnisse

### 6.4.5.1 Analyse Kurzzeitversuche

(Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2, Serienkennungen  $v1\_base\_N_{u,m}$  und  $v2\_Base\_N_{u,m}$ )

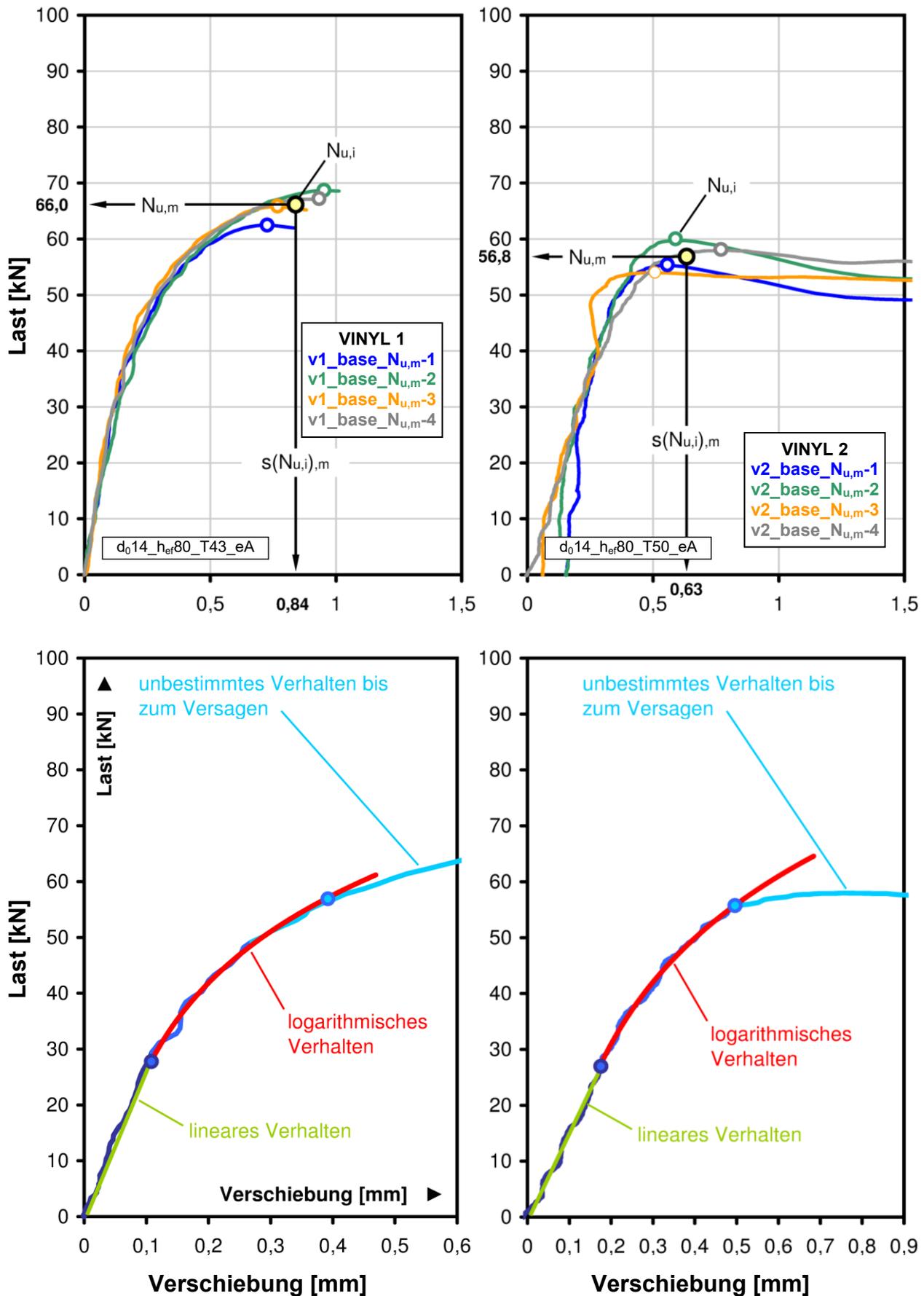
Die Diagramme 6.33 und 6.34 zeigen die Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche (Referenzversuche) zur Bestimmung der mittleren Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ .

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Das Versagen erfolgte grundsätzlich zwischen Gewindestange und Mörtel (Versagensmodus „P“ nach ETAG).
- b) Verschiebungscharakteristik
  - I. Die Diagramme 6.35 und 6.36 zeigen exemplarisch je eine Verschiebungskurve von Vinyl 1 und 2. Die Feststellungen zur Verschiebungscharakteristik der Versuche mit Epoxy 1 und 2 gelten analog (siehe Abschnitt 6.2.5.1 / b)).
  - II. Die unterschiedlichen Versagensmodi „P“ (Vinyl) und „P<sub>M</sub>“ (Epoxy) weisen eine signifikante Ähnlichkeit im Versagensverhalten auf.

VINYL 1 & 2 / Baseline-Versuche										
Serienkennung	V [Nr.]	Mört.	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	$N_{u,i}$ [kN]	$N_{u,m}$ [kN]	$v$ [%]
$v1\_base\_N_{u,m}$	1	V 1	80	14	C20/25	eng	43	62,5	66,0	3,98
	2							68,7		
	3							65,9		
	4							67,1		
$v2\_base\_N_{u,m}$	1	V 2	80	14	C20/25	eng	43	55,3	56,8	4,61
	2							59,8		
	3							54,0		
	4							58,0		

**Tabelle 6.20:** Einzelfestigkeiten



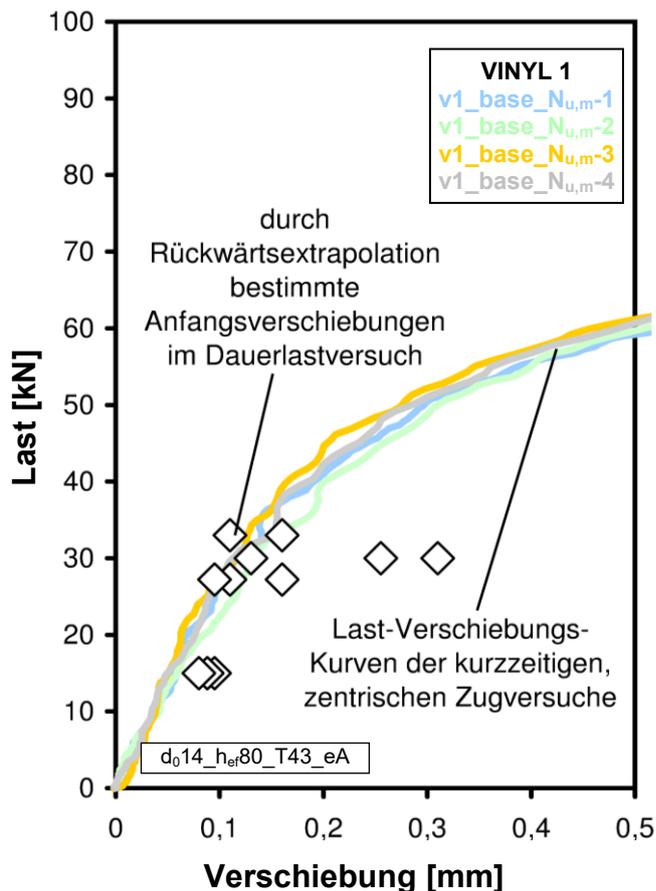
**Diagramm 6.33 (o.l.) und 6.34 (o.r.):** Last-Verschiebungs-Kurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit Vinyl 1 (links) und Vinyl 2  
**Diagramm 6.35 (u.l.) und 6.36 (u.r.):** Verschiebungscharakteristik von Versuch  $v1\_base\_N_{u,m}-4$  (links) und  $v2\_base\_N_{u,m}-4$

### 6.4.5.2 Analyse Langzeitversuche

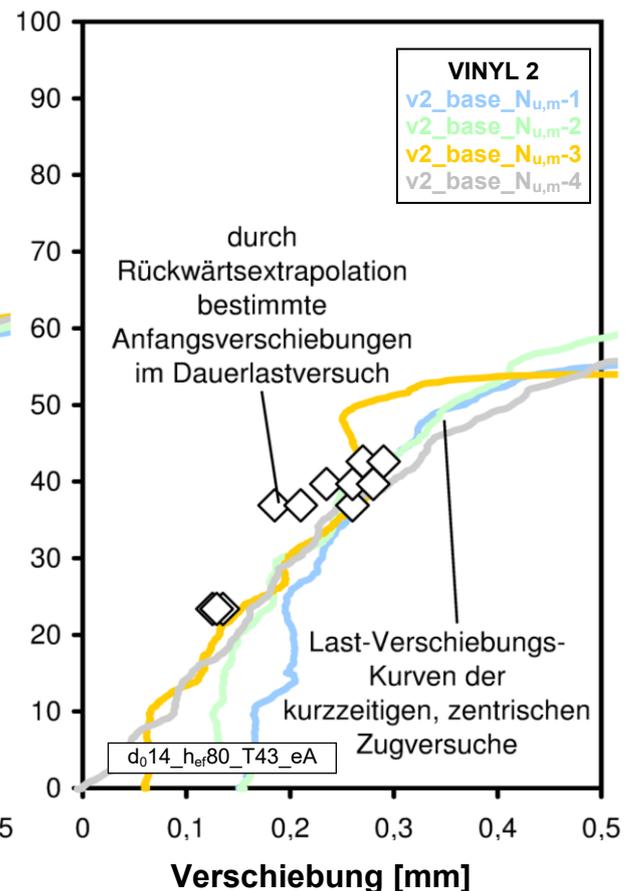
(Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2, Serienkennungen v1\_base und v2\_base)

#### 6.4.5.2.1 Anfangsverschiebungen

Die Diagramme 6.37 und 6.38 zeigen die Anfangsverschiebungen der Versuche v1\_base bzw. v2\_base. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.



**Diagramm 6.37:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Vinyl 1



**Diagramm 6.38:** Anfangsverschiebungen aus Rückwärtsextrapolation für Vinyl 2

Es ist zu erkennen, dass sowohl die rückwärts extrapolierten Anfangsverschiebungen von Vinyl 1 als auch von Vinyl 2 eine gute Übereinstimmung mit den Verschiebungswerten im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch zeigen. Eine Ausnahme hiervon bilden die Versuche v1\_base\_30,0-1 und -2, deren Anfangsverschiebungen erheblich abwichen. Auch ihre Standzeiten waren vergleichsweise gering. Da der Versagensmodus „P“ keinen signifikanten Einfluss der Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Beton erwarten lässt, sind hier Durchmischungsfehler oder Luftblasen als Gründe denkbar.

In Kapitel 6, Abschnitt 6.3.5.2.1, wird unterschiedliche Restfeuchte im Beton als möglicher Grund aufgeführt. Die Lagerungsbedingungen der Versuchskörper waren jedoch identisch, sodass kein Unterschied hinsichtlich des Austrocknungszustands anzunehmen ist. Außerdem deutet der Versagensmodus „P“ nicht auf einen signifikanten Einfluss der Verbundqualität hin.

<b>VINYL 1 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 66,6</math> kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)</b>																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]												
1	v1_base_33,0	1	80	14	eng	43	0,50	0,11	0,13												
		2						0,16													
		3						0,11													
2	v1_base_30,0	1					80	14	eng	43	0,45	0,13	0,23								
		2										0,26									
		3										0,31									
3	v1_base_27,2	1									80	14	eng	43	0,41	0,11	0,12				
		2														0,10					
		3														0,16					
4	v1_base_15,0	1													80	14	eng	43	0,23	0,10	0,09
		2																		0,09	
		3																		0,08	

**Tabelle 6.21:** Anfangsverschiebungen, Vinyl 1

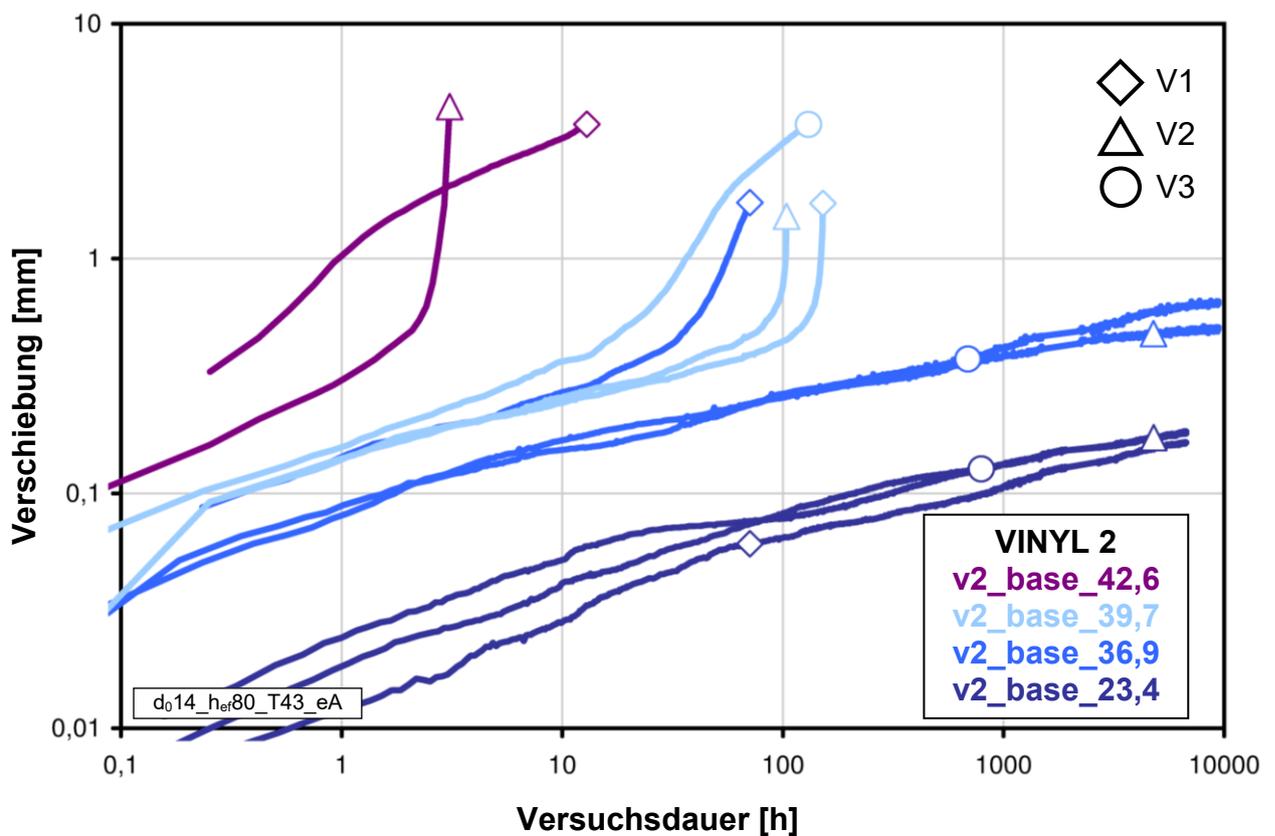
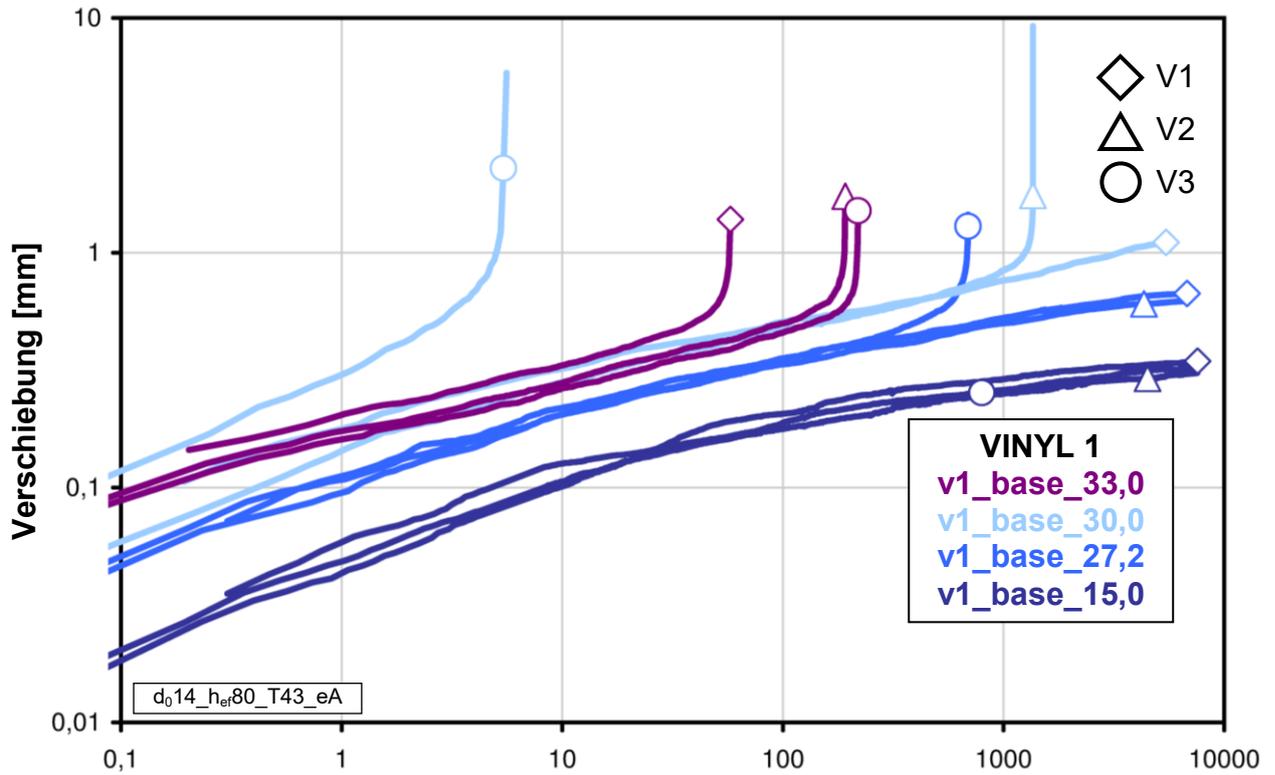
<b>VINYL 2 / Baseline-Versuche (mit <math>N_{u,m} = 56,8</math> kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)</b>																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]												
1	v2_base_42,6	1	80	14	eng	43	0,75	0,27	-												
		2						0,29													
		3						-*													
2	v2_base_39,7	1					80	14	eng	43	0,70	0,24	0,26								
		2										0,26									
		3										0,28									
3	v2_base_36,9	1									80	14	eng	43	0,65	0,26	0,22				
		2														0,19					
		3														0,21					
4	v2_base_23,4	1													80	14	eng	43	0,41	0,14	0,13
		2																		0,13	
		3																		0,13	

\* Ausfall während der ersten zwei Versuchsminuten

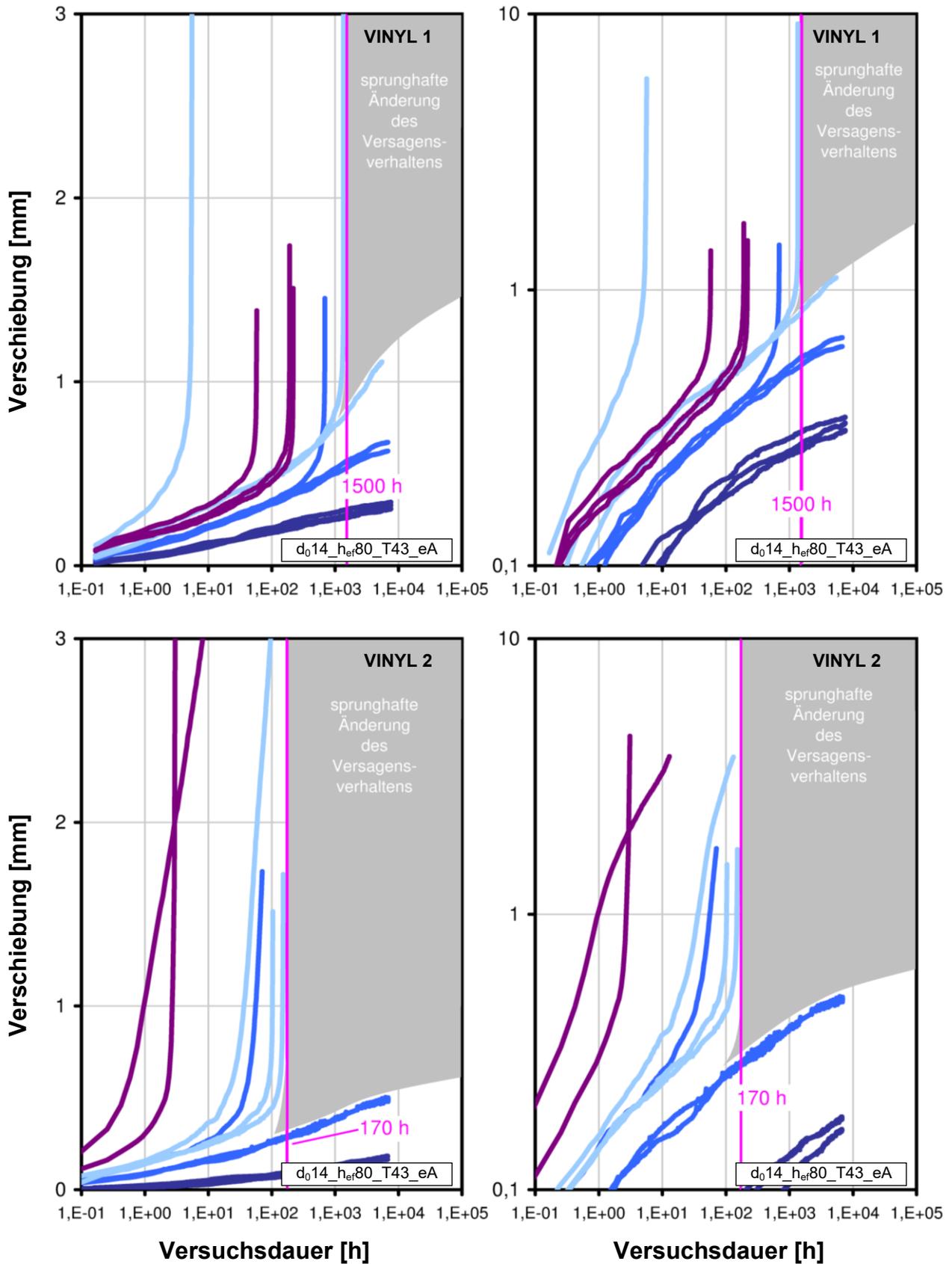
**Tabelle 6.22:** Anfangsverschiebungen, Vinyl 2

#### 6.4.5.2.2 Verschiebungscharakteristik und Versagensverhalten

Die Diagramme 6.39 und 6.40 zeigen sämtliche Verschiebungskurven der Versuchsreihen v1\_base und v2\_base. Die Diagramme 6.41 und 6.42 (für Vinyl 1) bzw. 6.43 und 6.44 (für Vinyl 2) zeigen eine Gegenüberstellung sämtlicher Verschiebungskurven, sowohl im doppelt-logarithmischen als auch im einfach-logarithmischen Maßstab.

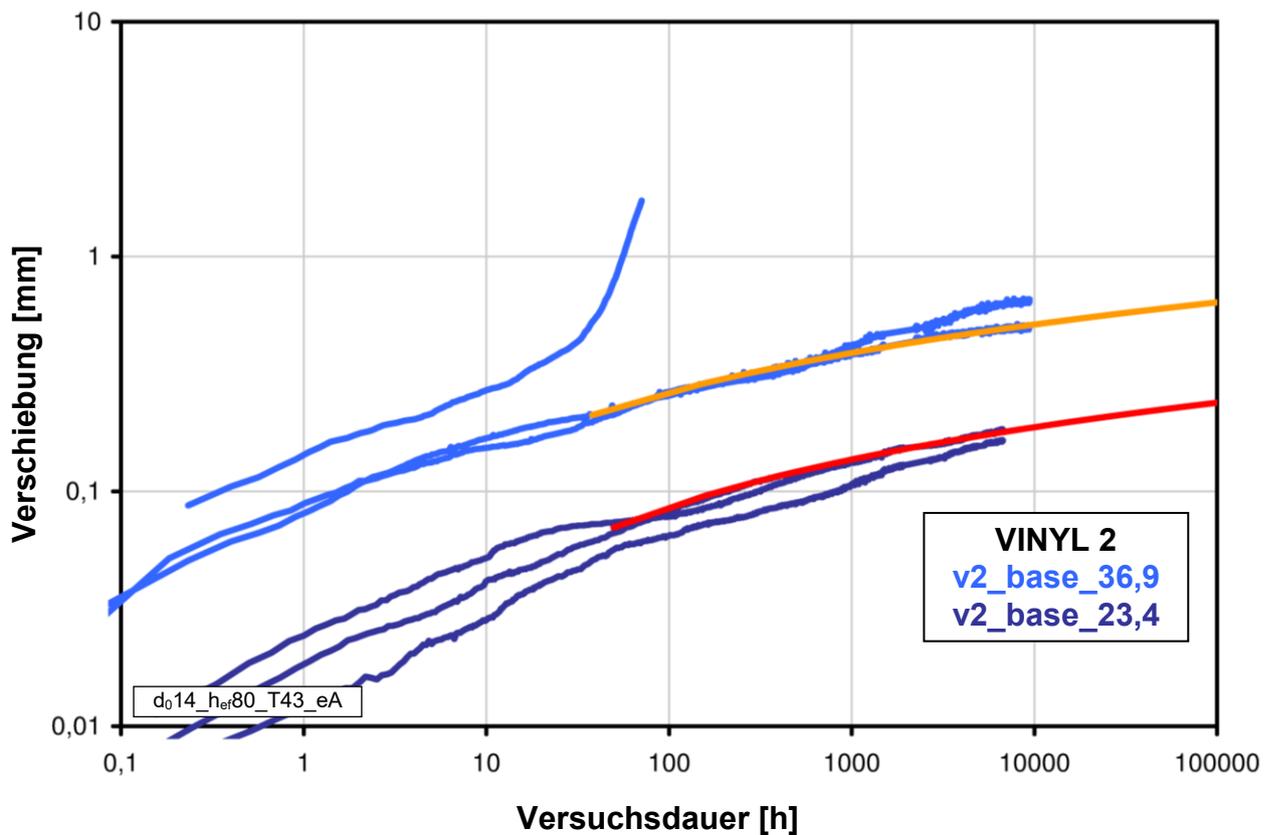
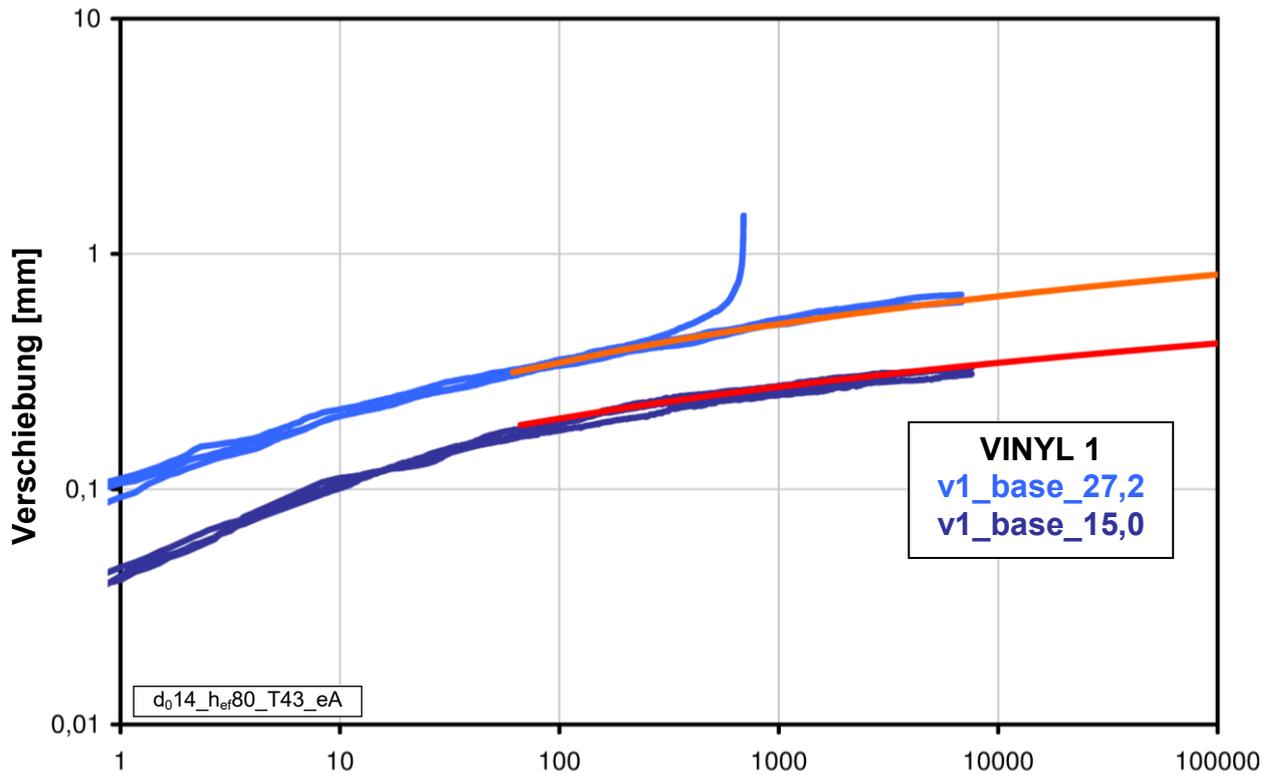


**Diagramm 6.39 (oben) und 6.40:** Verschiebungskurven von Vinyl 1 (oben) und Vinyl 2 unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung auf verschieden hohen Lastniveaus



**Diagramm 6.41 (o.l.) und 6.42 (o.r.):** Verschiebungskurven von Vinyl 1 im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab

**Diagramm 6.43 (u.l.) und 6.44 (u.r.):** Verschiebungskurven von Vinyl 2 im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab



**Diagramm 6.45 (oben) und 6.46:** logarithmische Näherung der Verschiebungskurven von Vinyl 1 (oben) und Vinyl 2 unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung auf zwei verschiedenen hohen Lastniveaus

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Verschiebungscharakteristik

I. Wie bei Epoxy 1 und 2 entsprechen die Verschiebungsverhalten von Vinyl 1 und 2 nicht dem Ansatz nach FINDLEY (vgl. Abschnitt 6.2.5.2.2).

Für Vinyl 1 zeigen die Versuche v1\_base\_15 in sehr guter Näherung ein logarithmisches Verhalten über die gesamte Versuchsdauer (vgl. Diagramm 6.45). Auf den beiden nächst höheren Lastniveaus, bei 27,2 und 30,0 kN, gilt dies nur noch zeitlich begrenzt, bevor demgegenüber eine übermäßige Zunahme der Verschiebungen einsetzt. Die jeweils erreichten Verschiebungen zum Zeitpunkt der Abweichung liegen auf einem ähnlich hohen Niveau. Auf dem Lastniveau 33,0 kN ist dies nicht mehr eindeutig erkennbar. Letzteres gilt aus technischen Gründen generell für Vinyl 2. Aufgrund der sehr geringen Verschiebungen im Vergleich zu Vinyl 1 sind die tatsächlichen Verschiebungsverläufe infolge von Nichtlinearitäten der Wegaufnehmer übermäßig verzerrt (vgl. Diagramm 6.46).

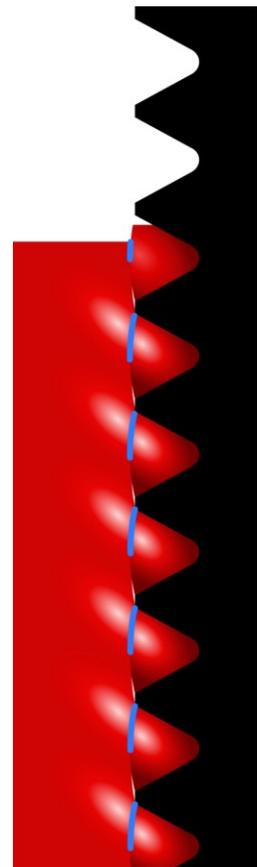
II. Aufgrund der kurzen Versuchsdauern ist an den Verschiebungskurven noch nicht eindeutig zu erkennen, ob bei Versuchen ohne Versagen ein vergleichbar ausgeprägtes Stabilisierungsverhalten auftritt, wie dies bei Epoxy 1 und 2 zu beobachten ist (vgl. Abschnitt 6.2.5.2.2 / a) / II.).

b) Versagensverhalten

I. Das Versagen findet eindeutig zwischen Gewindestange und Verbundmörtel statt.

II. Für das Versagensverhalten kann die von epoxidharzbasierten Mörteln bekannte Einteilung in Lastbereiche vorgenommen werden (siehe hierzu Abschnitt 6.2.5.2.2 / b) / II.).

III. Der Übergangsbereich im Standzeitverhalten (Lastbereich 3) befindet sich auf dem Lastniveau des ersten Steifigkeitsabfalls im kurzzeitigen Referenzversuch. Dies entspricht dem Verhalten von Epoxy 1 und 2. Analog den Erläuterungen dort (siehe Abschnitt 6.2.5.2.2 / b) / III.) kann die noch erhebliche Tragwirkung auf Lastniveaus oberhalb von Lastbereich 3 sowohl auf Reibung zurückgeführt werden als auch darauf, dass die Rissbildung beim Abscheren nicht völlig planparallel entlang der Umhüllenden der Gewindestange verläuft. Somit verbleibt ein geringer aber noch wirksamer Hinterschnitt, wie in Abbildung 6.2 skizzenhaft dargestellt. Aufgrund der sehr flachen Ausbildung des Hinterschnitts muss hier mit sehr hohen Pressungen (blau, (1)) und Druckspannungen (im Bild hell dargestellte Bereiche des Mörtels, (2)) gerechnet werden. Hierdurch ist unter dauerhafter Lasteinwirkung eine nur geringe Dauerhaftigkeit dieses Tragmechanismus zu erwarten, da die Ausprägung der Hinterschnitte aufgrund dieser Pressungen infolge von Kriechen rasch abnehmen wird.



**Abbildung 6.2:**  
hinterschnittartige  
Tragwirkung

### 6.4.5.3 Standzeitkurve

(Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2, Serienkennungen v1\_base und v2\_base)

Die nachfolgend dargestellten Standzeitkurven von Vinyl 1 und 2 basieren jeweils auf einer Regressionsanalyse mittels einer Potenzfunktion unter Verwendung der logarithmischen Mittel sämtlicher ermittelter Standzeiten einer Laststufe der Versuche v1\_base

und  $v2\_base$  sowie der zugehörigen kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche  $v1\_base_{N_{u,m}}$  und  $v2\_base_{N_{u,m}}$ . Die Diagramme enthalten Extrapolationen auf 10 bzw. 50 Jahre unter ausschließlicher Verwendung tatsächlich versagter Versuche.

Im Standzeitverhalten der Versuche  $v1\_base$  und  $v2\_base$  finden sich die wesentlichen Merkmale des Standzeitverhaltens der Baseline-Versuche  $e1\_base$  und  $e2\_base$  wieder. Diese sind nachfolgend in nur verkürzter Form nochmals aufgeführt und beschränken sich meist auf die Aussage. Erläuterungen finden sich an entsprechender Stelle bei den Baseline-Versuchen in Abschnitt 6.2.5.3.

Folgendes kann festgestellt werden:

a) Verlaufskarakteristik

I. Aufgrund des Umstands, dass bereits während der Belastungsphase von einer Vorschädigung auszugehen ist, kann auch für die Versuche  $v1\_base$  und  $v2\_base$  ein Standzeitkurvenverlauf mit der Charakteristik einer Potenzfunktion praktisch ausgeschlossen werden.

II. Die Diagramme 6.47 und 6.48 zeigen Standzeitkurven, die auf Basis einer Potenzfunktion unter Verwendung sämtlicher versagter Versuche ermittelt wurden. Für beide Mörtel erscheint der Ansatz einer Potenzfunktion zur Beschreibung des Standzeitverhaltens nicht ausgeschlossen. Die Abweichung der Datenpunkte von der jeweiligen Regressionsgerade kann darin begründet sein, dass die noch nicht versagten Versuche bei deren Ermittlung nicht berücksichtigt sind.

III. Da die Verschiebungsverhalten sowohl von Vinyl 1 und 2 als auch von Epoxy 1 und 2 im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch ähnliche Charakteristika aufweisen und damit ein ebenso unstetiges Standzeitverhalten angenommen werden muss, ist zu erwarten, dass sich die tatsächlichen Standzeitkurven bei der hier verwendeten logarithmischen Zeitskala dem Lastniveau der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  entsprechend asymptotisch annähern (vgl. Diagramm 6.16).

b) Stetigkeit

I. Das Standzeitverhalten im Lastbereich 1 unterscheidet sich von demjenigen im Lastbereich 2 (vgl. Abschnitt 6.2.5.2.2 / b) / II.). Der Übergang zwischen beiden Ausprägungen findet innerhalb des Übergangslastbereichs (Lastbereich 3) statt und erfolgt für Vinyl 1 und 2 nicht stetig, sondern quasi sprungartig.

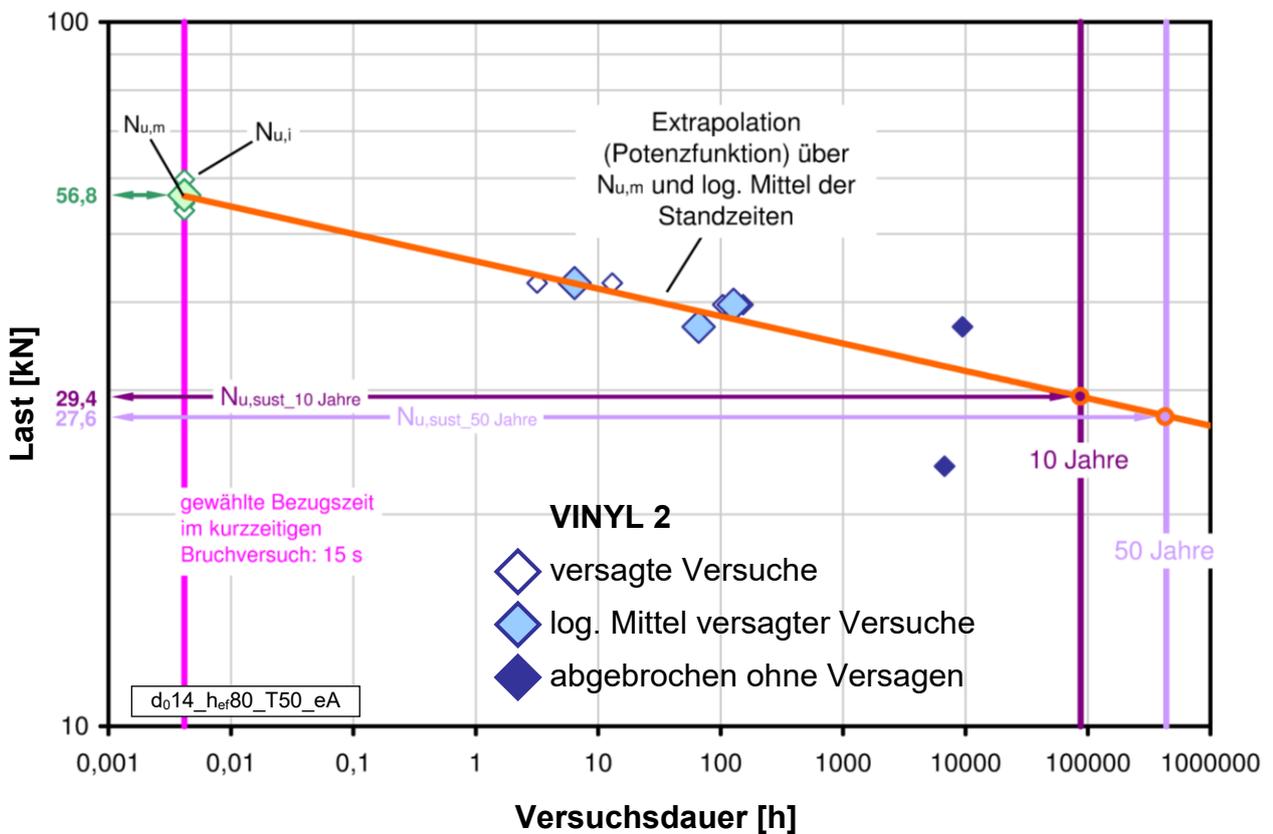
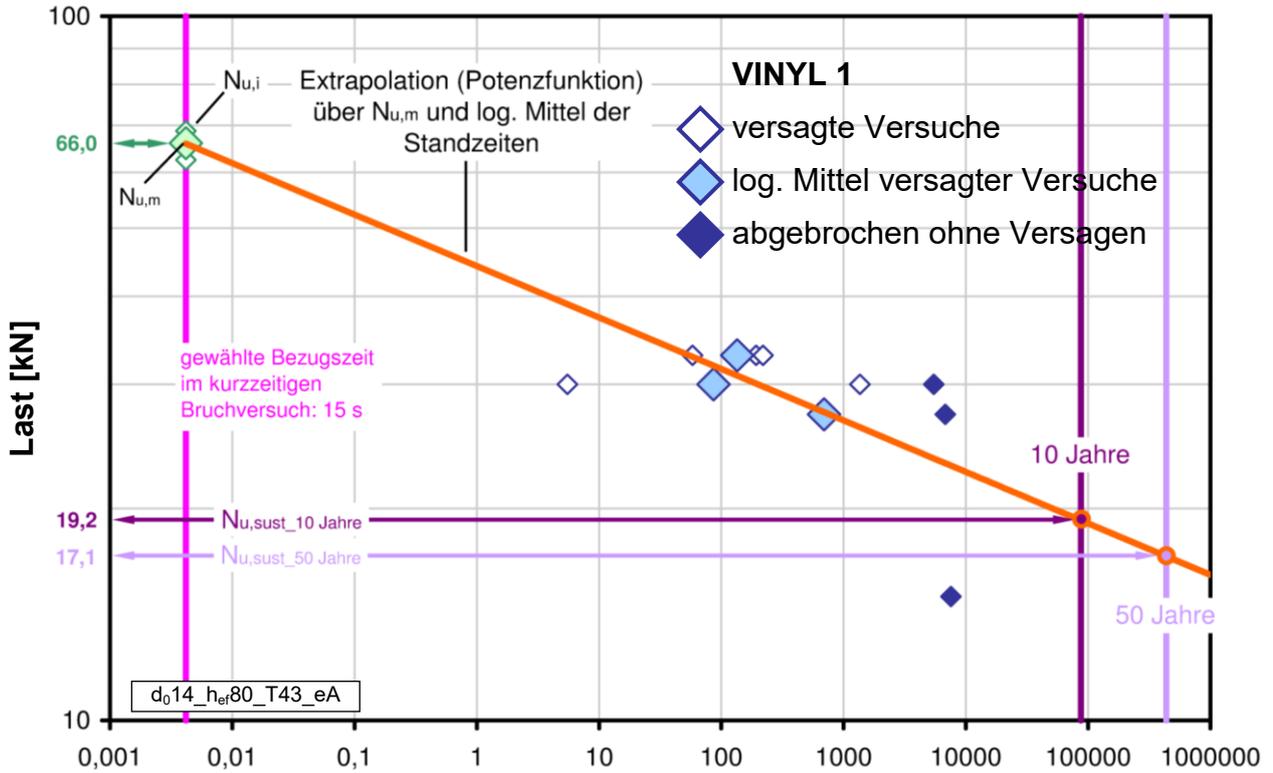
II. Aufgrund des Verzweigens des Standzeitverhaltens kann bei Versuchen, die eine Vorschädigung erlitten haben (Versuche im Lastbereich 1 und teilweise in Lastbereich 3), der für die Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveaus tatsächlich relevante Versagensmechanismus nicht mehr beobachtet werden.

III. Da die Änderung im Standzeitverhalten sprungartig erfolgt, ist selbst eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveau nicht möglich.

IV. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen sowie der Erläuterungen zu Diagramm 6.16 folgt für beide Abstützarten ein Standzeitverhalten entsprechend den Diagrammen 6.49 bzw. 6.50 (Erläuterung, siehe Abschnitt 6.2.5.3 / b) / IV.).

c) Gültigkeitsbereich

Die Standzeitkurvennäherungen haben ausschließlich innerhalb ihres jeweiligen Lastbereichs (Lastbereich 1 oder 2) Gültigkeit. Eine Extrapolation über Bereichsgrenzen hinweg ist nicht zulässig.



**Diagramm 6.47 (oben) und 6.48:** Standzeitkurven von Vinyl 1 (oben) und Vinyl 2 unter Zugrundelegung einer Potenzfunktion

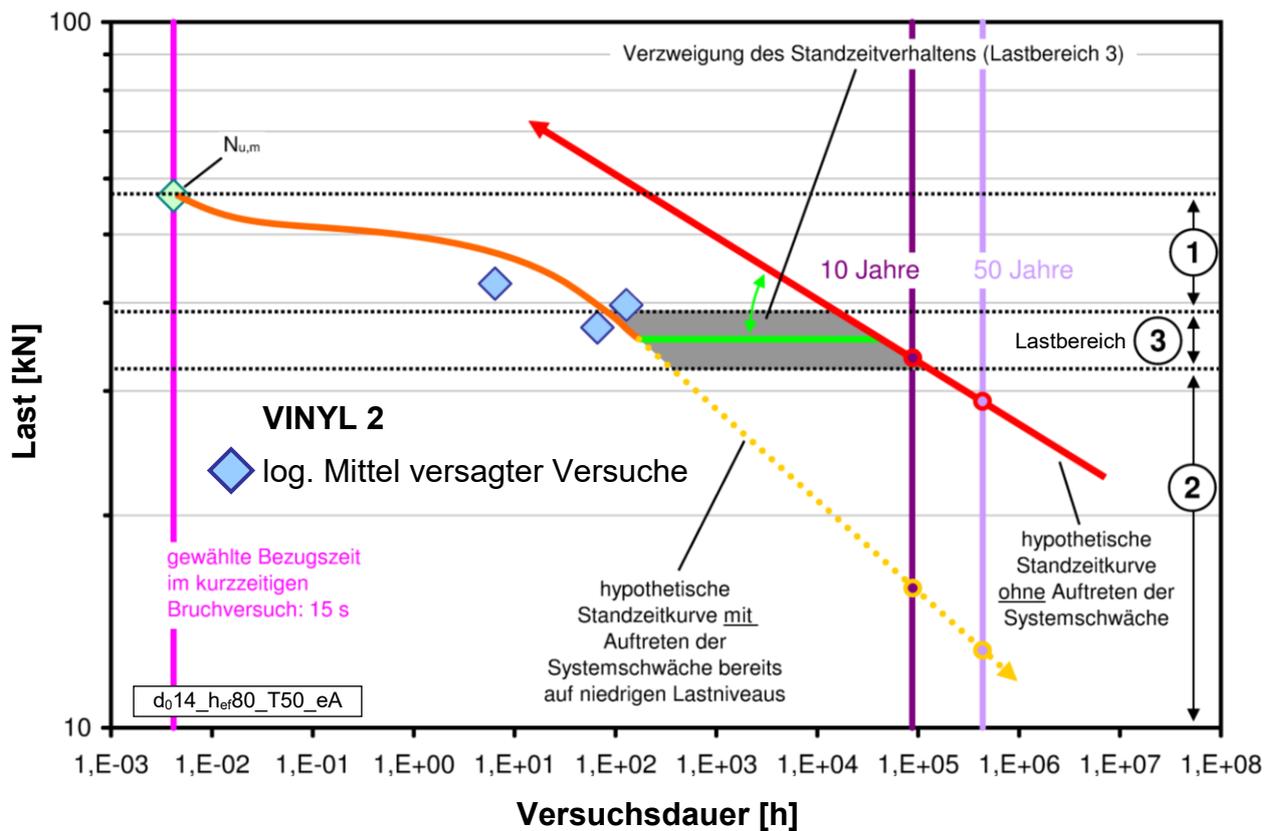
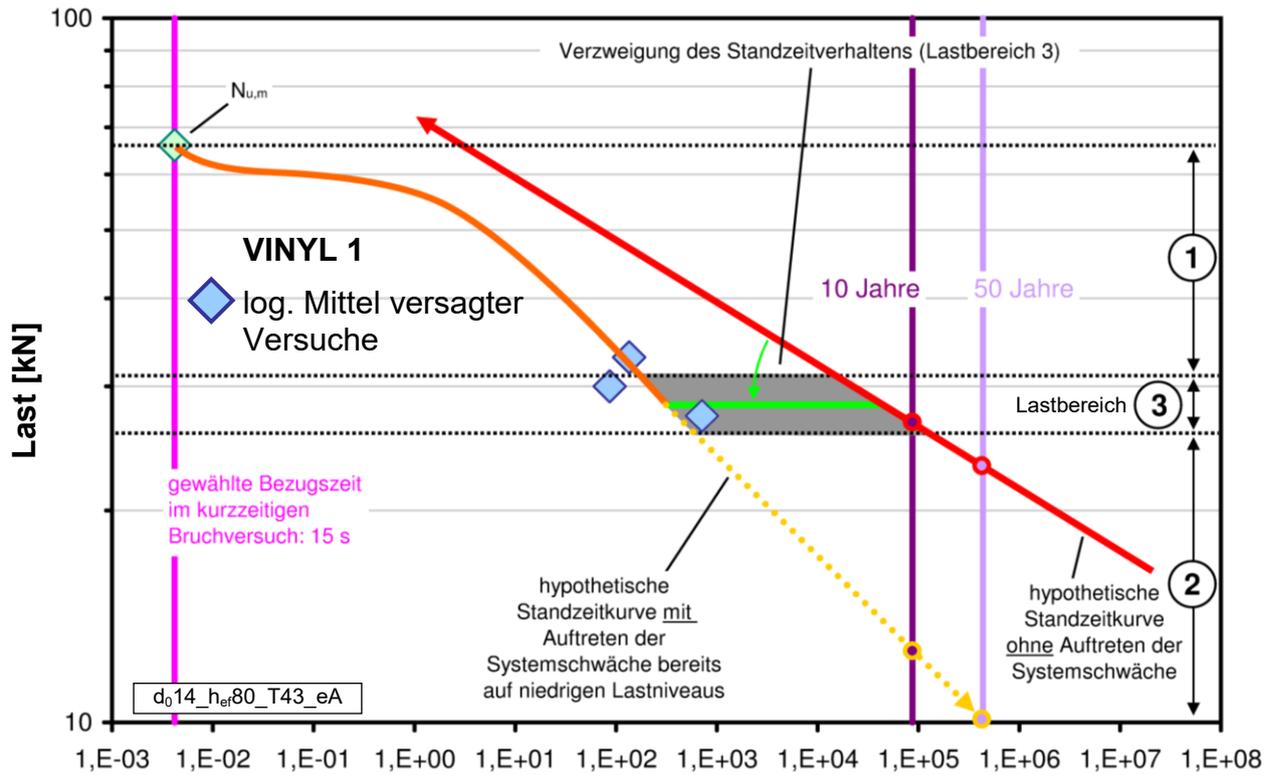


Diagramm 6.49 (oben) und 6.50: Verzweigung des Standzeitverhaltens von Vinyl 1 (oben) und Vinyl 2

VINYL 1 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 66,6$ kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]												
1	v1_base_33,0	1	80	14	eng	43	0,50	58	134												
		2						192													
		3						219													
2	v1_base_30,0	1					80	14	eng	43	0,45	> 5451	86								
		2										1359									
		3										5,5									
3	v1_base_27,2	1									80	14	eng	43	0,41	> 6789	-				
		2														> 6789					
		3														691					
4	v1_base_15,0	1													80	14	eng	43	0,23	> 7561	-
		2																		> 7561	
		3																		> 7561	

**Tabelle 6.23:** Standzeiten, Vinyl 1

VINYL 2 / Baseline-Versuche (mit $N_{u,m} = 56,8$ kN, siehe Abschnitt 6.4.5.1)																					
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Abst.	T [°C]	Last [ $N_{u,m}$ ]	$t_{u,sust,i}$ [h]	$t_{u,sust,m(log)}$ [h]												
1	v2_base_42,6	1	80	14	eng	43	0,75	13	< 1,1												
		2						3,2													
		3						< 0,033													
2	v2_base_39,7	1					80	14	eng	43	0,70	152	127								
		2										104									
		3										131									
3	v2_base_36,9	1									80	14	eng	43	0,65	66	-				
		2														> 9431					
		3														> 9431					
4	v2_base_23,4	1													80	14	eng	43	0,41	> 6730	-
		2																		> 6730	
		3																		> 6730	

**Tabelle 6.24:** Standzeiten, Vinyl 2

#### 6.4.5.4 Zusammenfassung der Baseline-Versuche mit Vinyl 1 und 2

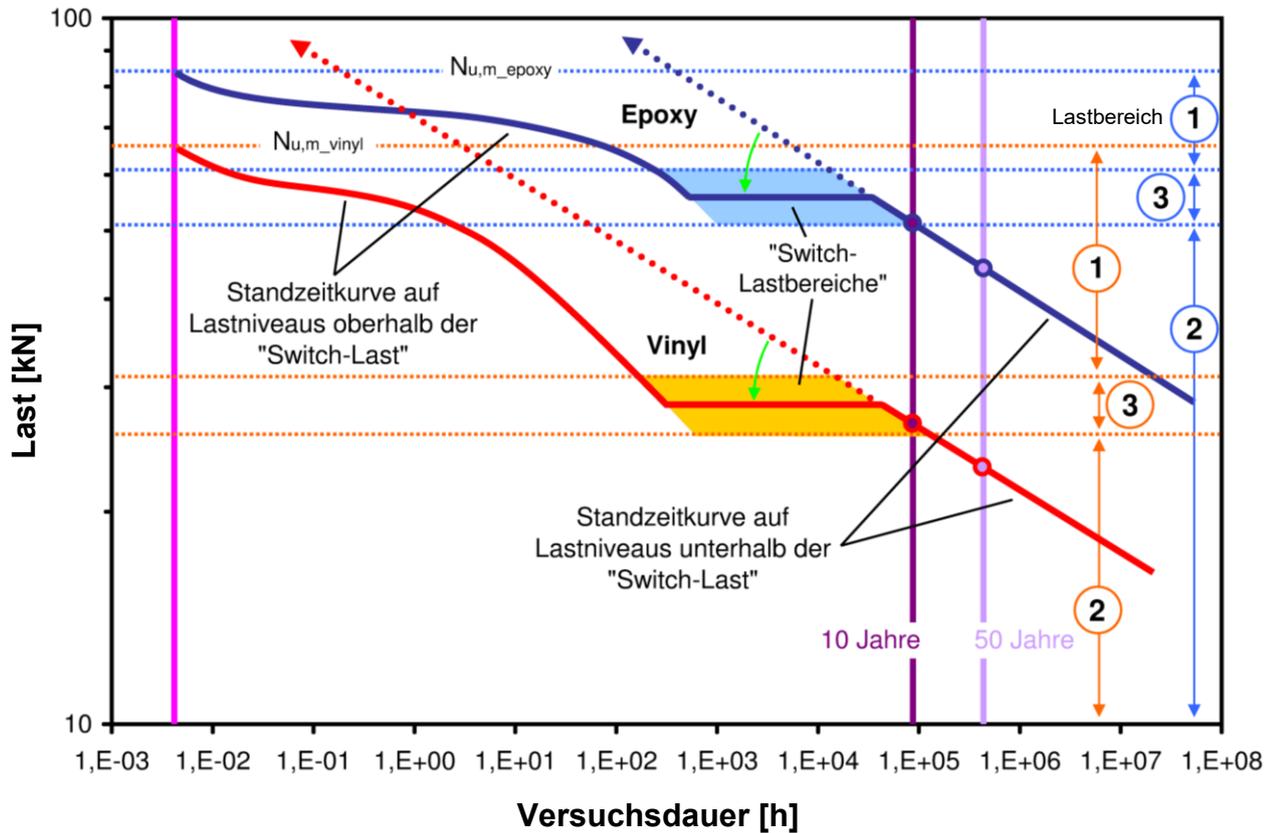
Eine Zusammenfassung findet sich im Rahmen einer Gesamtzusammenfassung sämtlicher Standzeitversuche in Abschnitt 6.5.

## 6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Standzeitverhalten

Es folgt eine Gesamtzusammenfassung der maßgeblichen Erkenntnisse aus der Durchführung von Standzeitversuchen mit epoxidharz- und vinylesterbasierten Verbunddübel-systemen:

- a) Es existiert kein signifikanter Unterschied im Standzeitverhalten von epoxidharz- und vinylesterbasierten Verbunddübeln, obwohl sich die Versagensmodi voneinander grundlegend unterscheiden (Epoxy: Versagen zwischen Mörtel und Beton; Vinyl: Versagen zwischen Gewindestange und Mörtel).
- b) Keines der Standzeitverhalten von Epoxy 1, Epoxy 2, Vinyl 1 und Vinyl 2 kann durch eine einfache mathematische Funktion (z.B. Potenzfunktion) angenähert werden. Grund ist, dass es sich hierbei nicht um ein isoliertes Materialverhalten handelt, sondern um ein vergleichsweise komplexes Systemverhalten, das in verschiedenen Lastbereichen unterschiedliche Ausprägungen aufweist.
- c) Das Standzeitverhalten kann seiner Ausprägung nach in drei Lastbereiche unterteilt werden (vgl. Diagramm 6.51). Das Standzeitverhalten in Lastbereich 1 ist dadurch gekennzeichnet, dass sämtliche Versuche einer Serie in relativ kurzer Zeit versagen (in der Regel  $< 1000$  h). In Lastbereich 2 (einschließlich dem Gebrauchslastniveau) ist es dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb der Versuchsdauer (vereinzelt bis zu  $15000$  h) kein Versagen aufgetreten ist und dass anhand des Verlaufs der Verschiebungskurven in absehbarer Zeit auch kein Versagen zu erwarten ist. Lastbereich 3 bildet den Übergangsbereich, auf dessen Lastniveaus innerhalb einer Versuchsserie beide Verhalten auftreten. Die Ausprägung des Standzeitverhaltens ändert sich im Lastbereich 3 quasi sprunghaft und ist somit nicht stetig. Das Standzeitverhalten scheint hierbei zwischen den Ausprägungen von Lastbereich 1 und 2 „umschalten“. Dieser Effekt wird daher im Folgenden als „Switch-Effekt“ bezeichnet. Der zugehörige Lastbereich 3 stellt entsprechend den „Switch-Lastbereich“ dar. Aufgrund des Umstands, dass der „Switch-Lastbereich“ verhältnismäßig klein ist (ca. ein Lastintervall der Ausdehnung  $0,2 N_{u,m}$ ), wird hierfür vereinfachend der Begriff „Switch-Last“ verwendet.

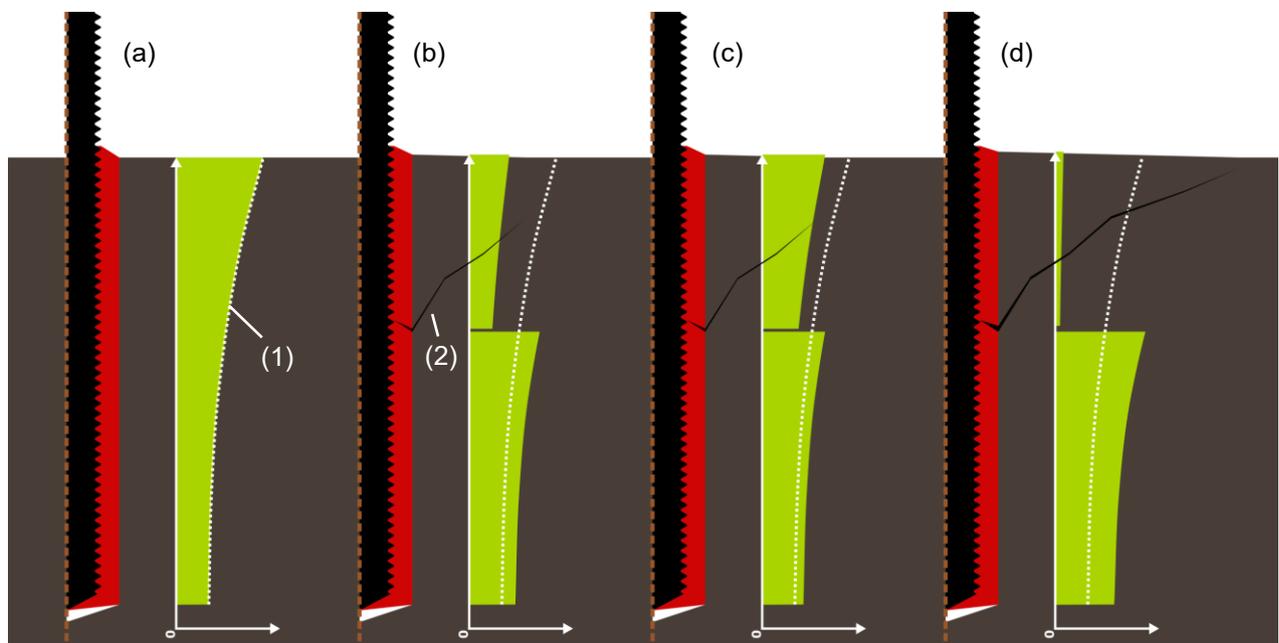
Aus der Unstetigkeit folgt, dass Prognosen des Standzeitverhaltens auf Gebrauchslastniveau nur mittels Standzeitversuchen sinnvoll erfolgen können, die denselben Versagensmodus wie dort aufweisen. Die obere Lastgrenze ist demnach so zu wählen, dass keine signifikante Zustandsänderung bzw. Strukturänderung (z.B. Schädigung) des Systems gegenüber dem Gebrauchslastniveau eintritt, andernfalls könnte durch eine solche Strukturänderung ein Versagensmechanismus ausgelöst werden, der nicht notwendigerweise für die Dauerhaftigkeit auf Gebrauchslastniveau maßgeblich ist. Eine Extrapolation dieses Verhaltens über derartige Zustandsgrenzen hinweg ist unsinnig. Für die hier getesteten Mörtel ist jedoch für Lasten unterhalb dieser Lastgrenze (innerhalb des Lastbereichs 2) in akzeptabler Prüfzeit kein Versagen zu erwarten.



**Diagramm 6.51:** sinnbildliche Darstellung der Verzweigung des Standzeitverhaltens von Epoxy und Vinyl

- d) Bei den untersuchten Systemen befindet sich die „Switch-Last“ annähernd auf demjenigen Lastniveau, das im zugehörigen kurzzeitigen Referenzversuch die Lastobergrenze des linear-elastischen Verschiebungsverhaltens kennzeichnet. Bezogen auf die Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  beträgt die „Switch-Last“ in den durchgeführten Versuchen zwischen ca.  $0,4 N_{u,m}$  (Vinyl) und ca.  $0,6 N_{u,m}$  (Epoxy). Ein sicheres Versagen der Dübelssysteme unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung findet demnach bereits auf einem Lastniveau statt, das nur ca. der Hälfte der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  entspricht.
- Aufgrund des erheblichen Ausmaßes der Verringerung der Standzeiten beim Überschreiten der „Switch-Last“ müssen die geprüften Verbunddübelssysteme unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit ab diesem Lastniveau bereits als versagt gelten. Die Resttragfähigkeit ist nach Überschreiten der „Switch-Last“ beschränkt auf Reibung sowie hinterschnittartige Tragwirkung infolge von Unebenheiten entlang der Scherflächen. Obwohl unter kurzzeitiger Belastung gegenüber der „Switch-Last“ eine signifikante Laststeigerung bis  $N_{u,m}$  möglich ist, ist unter Dauerbelastung zu beobachten, dass dieser Tragmechanismus, vermutlich infolge fortschreitender Kriechverformungen des Mörtels infolge der Hinterschnittpressungen, rasch geschwächt wird und dies zu einem sehr frühen Versagen führt.
- e) Wie an Epoxy 1 durch Versuche mit weiter Abstützung aufgezeigt, kann die Anwendung einer engen Abstützung den maßgeblichen Versagensfall unterdrücken und somit unter dem Sicherheitsaspekt unzulässig sein. Die enge Abstützung verhindert hier die Ausbildung einer kegelartigen Rissbildung im Betonkörper, die unter dauerhafter Lasteinwirkung, im Vergleich zu Versuchen mit enger Abstützung, zu einem signifikant früheren Versagen geführt haben.

- f) Bei Versuchen mit weiter Abstützung zeigt sich selbst auf Dauerlastniveaus deutlich unterhalb von  $0,5 N_{u,m}$  ein sehr frühes Versagen des Dübels unter Ausbildung eines teilweisen Betonausbruchs mit einer Tiefe von hier ca.  $4-5 d$  ( $d$  = Dübeldurchmesser). Die in [8] beschriebenen numerischen Untersuchungen mit weiter Abstützung zeigen zudem, dass bereits auf Lastniveaus von  $0,25 N_{u,m}$  entlang der Einbindetiefe des Dübels mit Rissbildung im Beton zu rechnen ist. Bei einem Rissfortschritt unter dauerhafter Lasteinwirkung kommt es zwangsläufig zu einer fortschreitenden Verringerung des Tragwiderstandes des Dübelabschnitts oberhalb der Rissfläche, wodurch sich im selben Zuge die Steifigkeit dieses Systemteils in Längsrichtung der Dübelachse kontinuierlich verringert. Hieraus resultiert eine fortlaufende Lastumlagerung in die vergleichsweise steifen Systemteile unterhalb der Rissfläche. Durch diese kontinuierliche Zunahme der Belastung auf diesen Dübelabschnitt werden die zeitabhängigen Schädigungsvorgänge dort zunehmend beschleunigt, woraus die sehr kurzen Standzeiten resultieren, verglichen mit den Versuchen mit enger Abstützung. Der Vorgang ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die vier Teilbilder zeigen sinnbildlich den Vorgang der Lastumlagerung infolge einer kegelförmigen Rissbildung im Beton. Dargestellt ist jeweils ein vereinfacht angenommener Verlauf der Verbundspannungen (1) längs der Bohrlochoberfläche. Bild (a) zeigt das belastete Dübelssystem unmittelbar vor der Bildung des ersten Risses. Mit dem lokalen Überschreiten der Betonzugfestigkeiten entlang der Einbindetiefe (b) bildet sich ein Anriss aus (2). Entsprechend der neuen Steifigkeitsverteilung findet sofort eine Lastumlagerung in die unterhalb des Risses liegenden Abschnitte der Einbindetiefe statt. Infolge des Kriechens des Verbundmörtels tritt im Anschluss eine gegenläufige, kontinuierliche Lastumlagerung zum Betonkegel auf (c), bis dort eine Last erreicht ist, welche einen Rissfortschritt bewirkt (d). Dieses Wechselspiel führt schließlich zu einem vollständigen Betonkegelausbruch unter Dauerlast und damit zum Ausfall eines großen Teils des Befestigungssystems.

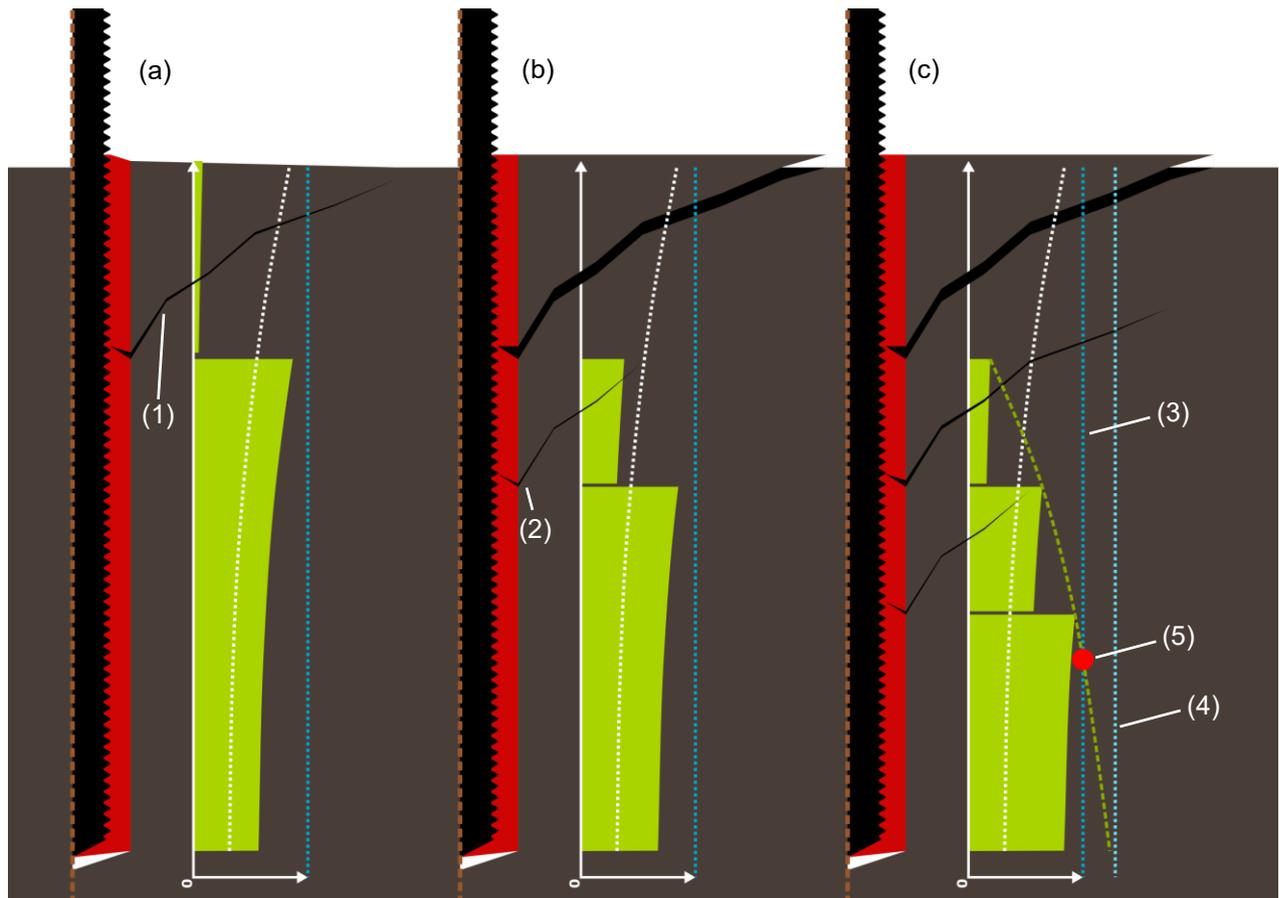


(1) vereinfacht angenommene Schubspannungsverteilung, (2) Rissbildung

**Abbildung 6.3:** von (a) nach (d) ablaufende, zeitabhängige Umlagerung der Last in tiefer gelegene Abschnitte der Einbindetiefe infolge von Rissbildung und der damit verbundenen Steifigkeitsänderungen innerhalb des Systems (zunehmender Ausfall des Traganteils oberhalb des Risses)

Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der zeitabhängigen Nachgiebigkeit des verwendeten Verbundmörtels zu. Je größer die zeitabhängige Nachgiebigkeit des Mörtels ist, desto progressiver verläuft der Rissfortschritt und umso geringere Standzeiten sind zu erwarten. Es wird daher angenommen, dass insbesondere epoxidharzbasierte Systeme diesbezüglich kritisch reagieren, da diese eine besonders ausgeprägte zeitabhängige Nachgiebigkeit aufweisen können.

- g) Nach Ausbildung eines vollständigen Kegels (der Riss erreicht die Oberfläche) ist die effektive Einbindetiefe vollständig reduziert auf den Dübelabschnitt unterhalb des Risses. Die numerischen Untersuchungen in [8] haben aufgezeigt, dass im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuch, bei großer Einbindetiefe und hoher Last, mehrere parallele, kegelartige Anrisse entlang der gesamten Einbindetiefe auftreten können. Wie ausgeführt muss davon ausgegangen werden, dass die Risse unter dauerhafter Lasteinwirkung, infolge der zeitabhängigen Nachgiebigkeit des Verbundmörtels, einem ständigen Wachstum unterliegen. Die lokalen Steifigkeiten in Dübellängsrichtung und damit die Spannungsverteilung entlang der Einbindetiefe sind vom Fortschritt dieser Risse abhängig und damit ebenso zeitlich veränderlich. Infolge des ständig ablaufenden Umlagerungsprozesses von Lasten in tiefer liegende Abschnitte des Dübels verstärkt sich dort entsprechend der Fortschritt ggf. vorhandener Risse. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Prozess fortsetzt, bis er entweder einem stabilen Endzustand zugestrebt ist oder infolge fortschreitender Lastumlagerungen die Adhäsionsfestigkeit des Resttragsystems überschritten wird, wodurch ein plötzliches Versagen des Gesamtsystems eintritt. Abbildung 6.4 zeigt sinnbildlich den gleichen Vorgang der Lastumlagerung infolge Rissbildung wie zuvor Abbildung 6.3. Im Gegensatz dazu ist die Einbindetiefe hier jedoch derart groß gewählt, dass dort nach der vollständigen Ausbildung des ersten kegelförmigen Ausbruchs (1) und den damit verbundenen Lastumlagerungen in tiefere Bereiche (a) erneut die Betonzugfestigkeit überschritten werden kann (b) und ein zweiter Anriss entsteht (2). Es ist anzunehmen, dass sich dieser Prozess fortsetzt (c), bis infolge der Lastumlagerung und einer damit verbundenen Erhöhung der Verbundspannung die Verbundfestigkeit (niedrig angenommen, dunkelblau, (3)) entweder überschritten wird (roter Punkt, (5)) und damit ein Versagen eintritt oder sich ein stabiler Zustand einstellt, weil die Verbundfestigkeit derart hoch ist (hellblau, (4)), dass diese im Zuge des Umlagerungsprozesses der Lasten nicht erreicht wird. Die Dauerhaftigkeit eines Verbunddübel systems ist demnach unter realitätsnahen Abstützbedingungen von einem komplexen Zusammenspiel zahlreicher Systemparameter bestimmt wie beispielsweise die Betonzugfestigkeit, die zeitabhängige Nachgiebigkeit des Mörtels oder die Adhäsionsfestigkeit. Entsprechend sollte in diesem Fall der Fokus weiterer Forschungsbemühungen zur Dauerhaftigkeit von Verbunddübeln auf die Erforschung dieses Sachverhaltes gerichtet werden.



(1) erster vollständig ausgebildeter Ausbruchkegel, (2) Folgeriss, (3) niedrig und (4) hoch angenommene Verbundfestigkeit, (5) Punkt des Verbundversagens

**Abbildung 6.4:** von (a) nach (c) ablaufende, zeitabhängige Umlagerung der Last in tiefer gelegene Abschnitte der Einbindetiefe infolge einer sich in die Tiefe ausweitenden Rissbildung und der damit verbundenen Steifigkeitsänderungen innerhalb des Systems (zunehmender Ausfall der Traganteile oberhalb der Risse mit zunehmendem Rissfortschritt)

## 6.6 Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen auf, dass die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der getesteten Verbunddübelssysteme unter Anwendung der in Kapitel 3 dargelegten Standzeitmethode praktisch nicht möglich ist. Bei keiner der Versuchsreihen konnte aus den gemessenen Standzeiten ein Standzeitverhalten abgeleitet werden, mit dem eine zuverlässige Bestimmung der Dauerlastfestigkeit möglich erscheint. Die Ergebnisse zeigen weiter auf, dass die Definition des Versagens von Verbunddübeln neu zu bewerten ist. So sollte als Versagen nicht allein der vollständige Verlust der Tragfähigkeit unter kurzzeitiger Lasteinwirkung gewertet werden, sondern vielmehr auch der Verlust der Eigenschaft zur dauerhaften Aufnahme einer Last („Switch-Effekt“) als Versagensmodus Berücksichtigung finden.

Für die Standzeitmethode bedeutet dies, dass das Standzeitverhalten auf Lastniveaus oberhalb der „Switch-Last“ quasi ein Nachbruchverhalten beschreibt und keine Relevanz für die Beurteilung des Standzeitverhaltens auf Gebrauchslastniveau hat. Für diese Beurteilung müssen die Prüflastniveaus folglich zwingend unterhalb der „Switch-Last“ liegen (Lastbereich 2). Ob die Standzeitmethode dann praktikabel ist hängt davon ab, ob auf mindestens zwei Lastniveaus dieses Lastbereichs, innerhalb einer akzeptablen Prüf-

dauer, tatsächlich Standzeiten ermittelt werden können. Bei den hier getesteten Verbundmörteln war dies nicht der Fall. Die „Switch-Last“ ist offensichtlich die maßgebliche Größe für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübeln. Sofern sie bei einem Dübelssystem existiert, bildet sie die obere Grenzlast der Dauerhaftigkeit. Für eine verlässliche Beurteilung der Zuverlässigkeit von Verbunddübelssystemen unter Dauerlast ist somit die Kenntnis darüber unabdingbar, welche mechanischen Vorgänge diese auslösen und welche Parameter diese beeinflussen. Aus diesem Grund folgten im Anschluss an die zuvor beschriebenen Standzeitversuche weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens von Verbunddübelssystemen unter Dauerlast. Aufgrund der begrenzten Versuchskapazitäten wurde beschlossen, in erster Linie das Verhalten epoxidharzbasierter Systeme weiter zu untersuchen, da bezüglich deren Verschiebungsverhalten unter Dauerlast, gegenüber den vinylesterbasierten Systemen, vorrangig Klärungsbedarf bestand. Eine umfassende Beschreibung hierzu findet sich im nachfolgenden Teil der Arbeit.

## **7 Dauerlastversuche mit Epoxy 1 zur Bestimmung des Versagensverhaltens unter zentrischer Zuglasteinwirkung**

### **7.1 Allgemeine Zielsetzung**

Die in Kapitel 6 behandelten Standzeitversuche an epoxidharz- und vinylesterbasierten Verbunddübelssystemen zeigen ein unerwartetes, unstetiges Versagensverhalten („Switch“-Effekt). Der Grund hierfür ist bislang unbekannt. Die Unstetigkeit verhindert die erfolgreiche Anwendung eines Extrapolationsverfahrens zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit der Dübelssysteme mittels der Standzeitmethode nach Kapitel 3. Die nachfolgend beschriebenen Versuche sollen der Klärung des mechanischen Verhaltens von epoxidharzbasierten Verbunddübeln unter dauerhafter, zentrischer Zuglast dienen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen eine abschließende Beurteilung ermöglichen, ob dieses Verhalten einer sinnvollen Anwendung der Standzeitmethode grundsätzlich entgegensteht. Zu diesem Zeitpunkt muss davon ausgegangen werden, dass das Standzeitverfahren innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne zu keinen Ergebnissen führt, da die zulässigen Prüflastniveaus zu keinem Versagen führen und somit keine Beiträge zu einer Standzeitkurve aus konkret ermittelten Standzeiten leisten.

### **7.2 Ausgangssituation nach Standzeitversuchen mit Epoxy 1 und 2**

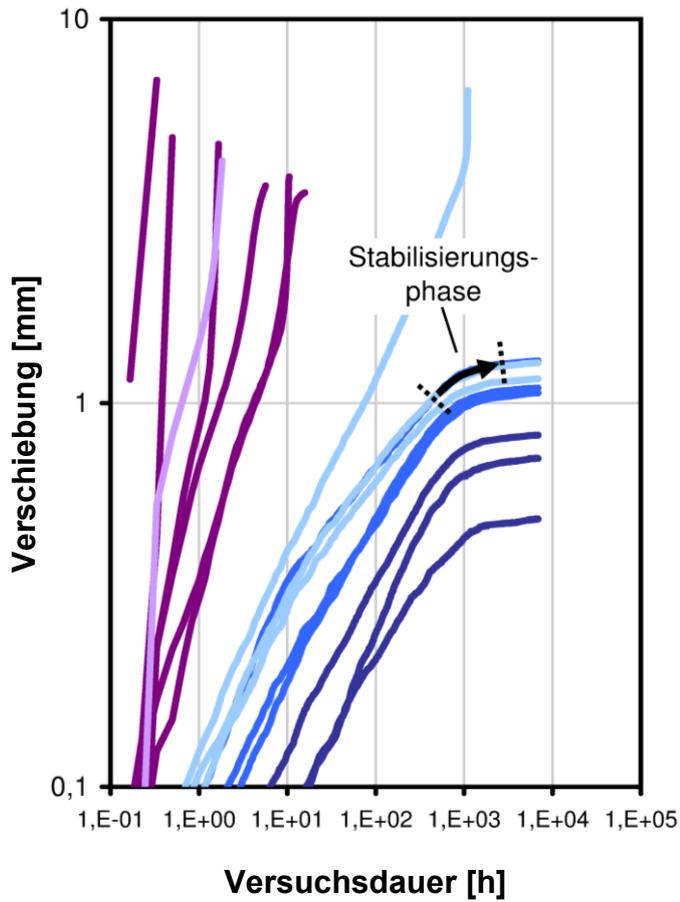
Bei keinem der durchgeführten Standzeitversuche konnte ein stetiges Verschiebungsverhalten entsprechend dem Ansatz nach FINDLEY (Potenzfunktion) festgestellt werden, wie es die aktuell gültigen Prüfvorschriften ETAG 001 bzw. AC 308 derzeit zur Extrapolation der Verschiebungskurven zentrischer Zugversuche unter dauerhafter Lasteinleitung vorsehen. Zudem weisen beide Systeme innerhalb einer Versuchsdauer zwischen ca. 1000 - 2000 Stunden eine signifikante Abnahme der Verschieberaten auf (siehe Diagramm 7.1), deren Ursache unbekannt ist. Dieser Vorgang wird im Folgenden als „Endstabilisierung“ bezeichnet. Die Verschieberaten nach Abschluss der Endstabilisierungsphase sind derart gering, dass ab diesem Zeitpunkt eine Extrapolation solcher Verschiebungskurven mit der vorhandenen messtechnischen Genauigkeit nicht sinnvoll möglich ist. Bei diesen Versuchen entfällt somit offensichtlich auch die Möglichkeit ggf. ein Verschiebungskriterium als Versagenskriterium anzuwenden.

Wie bereits beschrieben tritt der Wechsel im Standzeitverhalten zwischen hohen und niedrigen Lastniveaus sprunghaft auf, d.h. innerhalb einer geringen Lastspanne „schaltet“ das Verhalten zwischen beiden Ausprägungen um („Switch-Effekt“, vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.5). Es wird davon ausgegangen, dass dieses Verschiebungsverhalten nicht durch eine Kriecheigenschaft des Werkstoffs bestimmt ist, die isoliert betrachtet werden kann, sondern durch ein komplexeres bruchmechanisches Systemverhalten (Dübel + Mörtel + Beton). Da dieser „Switch-Effekt“ offensichtlich maßgeblich für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit ist, soll hierauf in den nachfolgenden Untersuchungen der Fokus liegen.

### **7.3 Allgemeiner Ansatz**

Die beiden getesteten epoxidharzbasierten Verbunddübelssysteme Epoxy 1 und Epoxy 2 verhielten sich im Rahmen der Standzeituntersuchungen ähnlich. Sämtliche maßgeblichen Effekte konnten bei beiden Systemen gleichermaßen beobachtet werden. Aus Kapazitätsgründen wurde daher für die weiteren Versuche der Verbundmörtel Epoxy 1 gewählt, stellvertretend für beide Systeme, da hiermit bis zu diesem Zeitpunkt die überwiegende Zahl der Langzeitversuche durchgeführt wurden und die Vergleichsdatenbasis somit am größten ist. Für sämtliche Versuche wurde die Dauerlast auf 50 kN (ca.  $0,6 N_{u,m}$ ) festgelegt. Diese entspricht im vorliegenden Fall annähernd der Lastobergrenze für das beobachtete sich stabilisierende Systemverhalten und ist damit nahe der

„Switch-Last“ anzunehmen. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss verschiedener Parameter auf den Stabilisierungseffekt im Bereich eines indifferenten Systemverhaltens nahe der „Switch-Last“ am deutlichsten zu Tage tritt.



**Diagramm 7.1: Stabilisierungsphase**

## 7.4 V1 - Ringspaltversuche mit Epoxy 1

### 7.4.1 Zielsetzung

Ausgehend von der Annahme, dass das System bereits beim Belastungsvorgang spröde vorgeschädigt wird (Standzeitversuche auf Lastniveaus im nicht-linearen Last-Verschiebungsbereich der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche), soll untersucht werden, ob eine steifere bzw. eine weniger steife Auslegung des Dübel-systems das Verschiebungsverhalten unter Dauerlast beschleunigt bzw. verlangsamt, indem über die Systemsteifigkeit Einfluss auf die mögliche spröde Vorschädigung genommen wird. Der Grundgedanke hierbei ist, dass die spröde Vorschädigung beim Belastungsvorgang umso ausgeprägter ist, je steifer das System ausgebildet ist. Es kann beispielsweise angenommen werden, dass es während des Belastungsvorgangs, aufgrund des unterschiedlichen Dehnungszustandes der Gewindestange entlang ihrer Einbindetiefe, zu einer Spannungskonzentration am Bohrlochrand kommt, die umso ausgeprägter ist, je steifer die Bettung der Gewindestange ausgeführt wurde. Entsprechend sollte eine Vorschädigung in diesem Bereich auf umso niedrigeren Lastniveaus auftreten, je steifer das System ist. Die Steifigkeit der Bettung ist dabei umso höher zu erwarten, je dünner die weiche Mörtelschicht gewählt ist. Es ist folglich anzunehmen, dass das Verhalten unter dauerhafter Lasteinwirkung, in Abhängigkeit vom Ringspaltmaß, unterschiedlich ausgeprägt ist, weil davon auszugehen ist, dass die Systeme nach Abschluss des Belastungsvorganges unterschiedliche Grade der Vorschädigung aufweisen.

### 7.4.2 Ansatz

Durch Variation des Ringspaltmaßes sollen unterschiedliche Steifigkeiten der Mörtelschicht realisiert und deren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit untersucht werden.

### 7.4.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Bohrlochdurchmesser  $d_0$ : variiert gemäß Versuchsprogramm (Bohrreackmaß entsprechend  $d_{cut,m}$ )
- b) Einbindetiefe:  $h_{ef} = 80$  mm, Dübel zentriert
- c) Prüftemperatur:  $T = 43^\circ\text{C}$

### 7.4.4 Programm

#### 7.4.4.1 Vorversuche

Für die Ringspaltversuche standen nur wenige restliche Versuchskörper der Betoncharge der Standzeitversuche e1\_base zur Verfügung, sodass zu Testzwecken zunächst Vorversuche (VV) in Versuchskörpern einer jüngeren Charge der gleichen Festigkeitsklasse durchgeführt wurden.

EPOXY 1 / Ringspaltversuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [kN]	Anz.
1	e1_RS18_VV	80	18	3,0	C20/25	eng	43	50,0	3

**Tabelle 7.1:** Übersicht, Vorversuche

### 7.4.4.2 Hauptversuche

Die Hauptversuche e1\_RS13, e1\_RS14 und e1\_RS18 wurden in den restlichen Versuchskörpern der Betoncharge der Standzeitversuche e1\_base durchgeführt (C1). Die Durchführung der Serie e1\_RS24 erfolgte in Charge C5.

EPOXY 1 / Ringspaltversuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [kN]	Anz.
2	e1_RS13	80	13	0,5	C20/25	eng	43	50,0	3
3	e1_RS14		14	1,0					
4	e1_RS18		18	3,0					
5	e1_RS24		24	6,0					

**Tabelle 7.2:** Übersicht, Hauptversuche

### 7.4.5 Ergebnisse

#### 7.4.5.1 Analyse Anfangsverschiebungen

(Ringspaltversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_RS18\_VV, e1\_RS13, e1\_RS14, e1\_RS18, e1\_RS24)

Das Diagramm 7.2 zeigt die Anfangsverschiebungen sämtlicher Ringspaltversuche. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.

EPOXY 1 / Ringspaltversuche													
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	Abst.	T [°C]	Last [kN]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]			
1	e1_RS18_VV	1	80	18	3,0	eng	43	50	0,22	0,22			
		2							0,22				
		3							0,22				
2	e1_RS13	1		13	0,5				0,19	0,21	0,25	0,21	
		2											0,21
		3											0,25
3	e1_RS14	1		14	1,0				0,23	0,18	0,20	0,20	
		2											0,18
		3											0,20
4	e1_RS18	1		18	3,0				0,17	0,16	0,14	0,16	
		2											0,16
		3											0,14
5	e1_RS24	1	24	6,0	0,16	0,20	0,16	0,17					
		2							0,20				
		3							0,16				

**Tabelle 7.3:** Anfangsverschiebungen, Ringspaltversuche

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Streuung

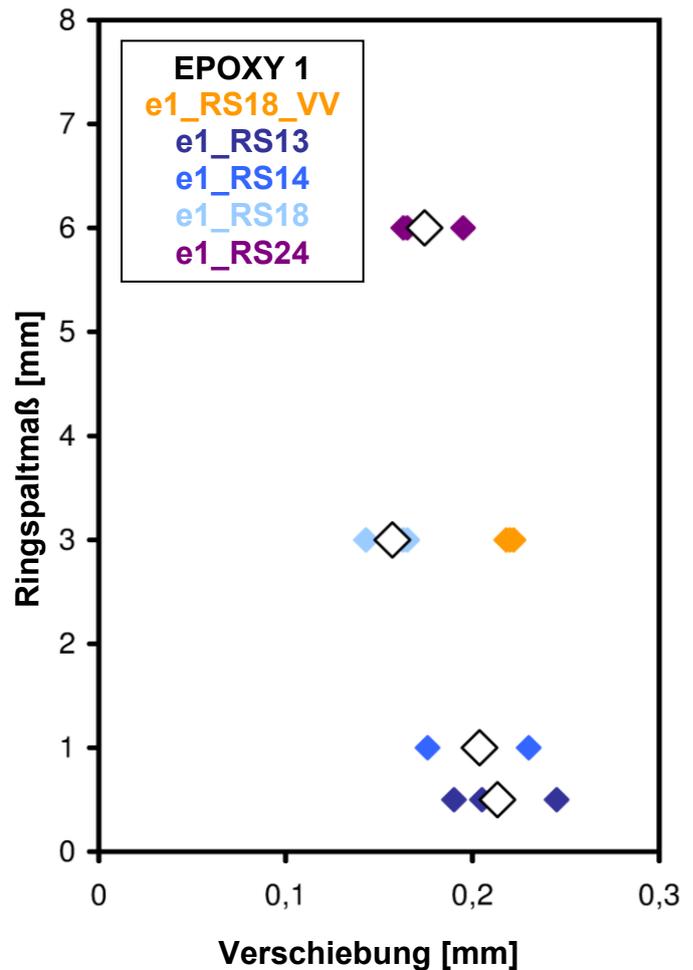
I. Die Streuung der Anfangsverschiebungen der Vorversuche e1\_RS18\_VV sind offensichtlich ausgesprochen gering im Vergleich zu den Streuungen der übrigen Serien, insbesondere der Serie e1\_RS18, die ebenfalls ein Ringspaltmaß von 3 mm aufweist. Trotz identischen Ringspaltmaßes ist hierbei eine getrennte Betrachtung der Streuungen beider Serien gerechtfertigt, da sich die Charakteristiken der Verschiebungskurven beider Serien deutlich voneinander unterscheiden. Es muss entsprechend von verschiedenen Verschiebungsmechanismen ausgegangen werden, für welche es sinnvoll ist, die Streuung separat zu ermitteln.

II. Der Streubereich breitet sich mit abnehmendem Ringspaltmaß, bezogen auf die Absolutverschiebung, überproportional aus. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass mit einer Zunahme der Spannungsspitzen zu rechnen ist, wenn das Ringspaltmaß verringert wird (vgl. nachfolgende Erläuterung zu Abbildung 7.1). Es ist anzunehmen, dass die Streuungen dann zunehmend von der Häufigkeit, Verteilung und Ausprägung der Bohrlochimperfectionen bestimmt ist.

b) Verschiebungsbeträge

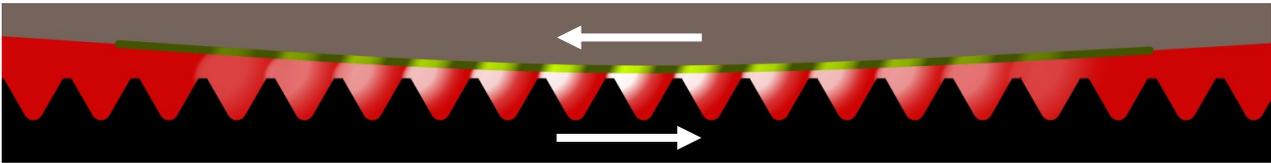
I. Die Anfangsverschiebungen sind nicht proportional zum Ringspaltmaß. Eine solche Proportionalität wäre jedoch zu erwarten, wenn die Anfangsverschiebungen allein auf eine rein elastische Schubverformung der Mörtelschale zurückzuführen wären (unter Vernachlässigung von Stahl- und Betondehnungen). In diesem hypothetischen Fall müssten die Anfangsverschiebungen entlang einer Gerade liegen, zwischen den Versuchen e1\_RS24, für die hier ein rein elastisches Verhalten angenommen wird, und dem Grenzfall eines Ringspalts mit einem Maß von 0 mm. Tatsächlich weisen die Versuche mit dem kleinsten Ringspaltmaß die größten Anfangsverschiebungen auf.

II. Aus der fehlenden Proportionalität ist zu folgern, dass bei den Verbunddübelsystemen der Serien e1\_RS13, e1\_RS14, e1\_RS18 und e1\_RS18\_VV schon in der Belastungsphase einer Vorschädigung eingetreten ist, deren Grad von der Mörtelschichtdicke abhängt und die umso größer ist, je dünner (steifer) die Mörtelschale ausgebildet ist.



**Diagramm 7.2:** Anfangsverschiebungen der Ringspaltversuche

III. Der Grund für diese Abhängigkeit ist, dass mit zunehmender Steifigkeit bzw. abnehmender Mörtelschichtdicke damit zu rechnen ist, dass die Spannungsspitzen im System ebenso zunehmen. Diese sind vor allem auf Bohrlochimperfektionen (z.B. wellige Bohrlochoberflächen) zurückzuführen, die zu ungleichförmigen Schubsteifigkeitsverteilungen innerhalb der Mörtelschale führen, da hierdurch die Mörtelschichtdicke variiert. Je dünner die Mörtelschale ist, desto größer sind, relativ betrachtet, die Bohrlochimperfektionen und damit deren Einfluss auf die Schubspannungen. Abbildung 7.1 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dargestellt ist ein Extremfall, in dem die Gewindestange annähernd am Bohrlochrand anliegt. Hier darf nicht mehr angenommen werden, dass es innerhalb der Mörtelschale zu einer Vergleichmäßigung möglicher Spannungsspitzen kommt, die beispielsweise in der Nähe der Zahnspitzen der Gewindestange zu erwarten sind. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass der Verbund zwischen Mörtel und Beton hierdurch lokal weitaus höher belastet ist und entsprechend früher geschädigt wird.



**Abbildung 7.1:** bei geringer werdender Mörtelschichtdicke zunehmende Spannungsspitzen im Mörtel nahe den Zähnen der Gewindestange

### 7.4.5.2 Analyse Kurvenverläufe

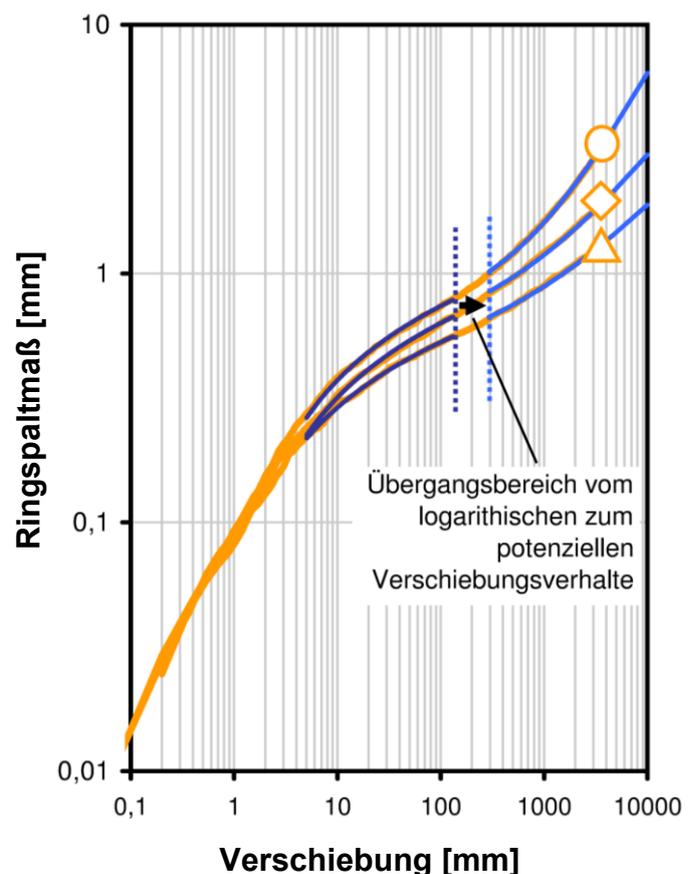
Die Verschiebungskurven der Vorversuche zeigen zwei klar definierte, aufeinanderfolgende Verschiebungscharakteristika (siehe Diagramm 7.3).

Die Diagramme 7.4 bis 7.8 zeigen sämtliche Verschiebungskurven der Vor- und Hauptversuche im direkten Vergleich. Die Vorversuche e1\_RS18\_VV weichen hinsichtlich der Verschiebungscharakteristik deutlich von den übrigen Versuchen ab, insbesondere auch von den Versuchen e1\_RS18 mit identischem Ringspaltmaß. Sie werden daher zu Beginn separat beschrieben. Es ist klar zu erkennen, dass die Vorversuche ein deutlich progressiveres Verschiebungsverhalten aufweisen als sämtliche Hauptversuche. Dies ist an dieser Stelle nicht erklärbar, zumal die Hauptversuche e1\_RS18 identische geometrische Verhältnisse aufweisen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass für die Vorversuche Versuchskörper einer deutlich jüngeren Betoncharge verwendet wurden. Die vorhandenen Festigkeitsunterschiede waren hierbei gering. Es wird angenommen, dass diese, aufgrund der Anwendung einer engen Abstützung, vernachlässigt werden können. Bezüglich der Kurvenverläufe kann Folgendes festgestellt werden:

#### a) Vorversuche / Verschiebungscharakteristik

I. Aus Diagramm 7.4 ist ersichtlich, dass die Verschiebewege der Vorversuche e1\_RS18\_VV unter dauerhafter Lasteinwirkung betragsmäßig signifikant größer sind als diejenigen sämtlicher Hauptversuche. Eine Ausnahme unter den Hauptversuchen bildet hier der Versuch e1\_RS14-3, der eine vergleichbar hohe Verschieberate innerhalb der ersten 2-3 h aufweist (vgl. Diagramm 7.6). Die Verschieberaten der Versuche e1\_RS18 sind in diesem Zeitraum deutlich geringer als diejenigen aller restlichen Hauptversuche und weitaus geringer als diejenigen der Versuche e1\_RS18\_VV, die geometrisch identisch sind. Im anfänglichen Verschiebungsverhalten zeigt sich keine Proportionalität zum Ringspaltmaß, wie dies annähernd zu erwarten wäre, wenn es sich bei dem Verschiebungsverhalten um ein reines Schubkriechen handeln würde.

II. Die Kurven der Vorversuche e1\_RS18\_VV können jeweils mittels zweier verschiedener Verschiebungscharakteristika angenähert werden. Der Sachverhalt ist in Diagramm 7.3 dargestellt. Innerhalb der ersten ca. 130 Versuchsstunden kann das Verschiebungsverhalten in guter Näherung durch einen logarithmischen Ansatz beschrieben werden. Nach einem Übergangsbereich kann der Rest der Verschiebungskurve in gleicher Qualität ab ca. der 300. Versuchsstunde mittels einer Potenzfunktion beschrieben werden



**Diagramm 7.3:** Übergang zwischen den Verschiebungscharakteristiken

(FINDLEY-Ansatz). Es wird angenommen, dass das logarithmische Verhalten zu Beginn eine besonders ausgeprägte Form der nachfolgend beschriebenen Teilverschiebungscharakteristik der Hauptversuche darstellt.

b) Hauptversuche /

Teilverschiebungscharakteristik am Beispiel der Versuche e1\_RS14

I. In den Diagrammen 7.6, 7.13 und 7.14 sind die Verschiebungskurven der Ringspaltversuche e1\_RS14 unter dauerhafter Lasteinwirkung mit dem Standardringspaltmaß von nominell 1 mm dargestellt. Das Verhalten des Versuchs e1\_RS14-3 unterscheidet sich von dem der Versuche e1\_RS14-1 und -2 deutlich. Ersteres weist zwischen der 3. und ca. 110. Versuchsstunde ein ungestörtes, klar identifizierbares, logarithmisches Verschiebungsverhalten auf. Bei den Versuchen e1\_RS14-1 und -2 kann ebenfalls ein logarithmisches Verschiebungsverhalten beobachtet werden, jedoch mehrmals hintereinander und in sehr viel kürzeren Zeitintervallen (siehe Diagramm 7.13). So beginnt z.B. bei Versuch e1\_RS14-2 das erste Intervall mit ca. der 2. Versuchsstunde und endet nach der 15. Versuchsstunde. Das zweite Intervall beginnt unmittelbar im Anschluss und erstreckt sich bis zur ca. 35. Versuchsstunde. Die Gesamtverschiebungskurven sind demnach zusammengesetzt aus einem oder mehreren Teilverschiebungsabschnitten.

II. Die Teilverschiebungsabschnitte gehen meist unmittelbar ineinander über, indem eine sprunghafte Zunahme des Verschiebungsfortschritts erfolgt. Dies deutet darauf hin, dass mit dieser Zunahme ein Verlust von Tragwiderstand innerhalb des Systems einhergeht.

III. Der erste identifizierbare logarithmische Teilverschiebungsabschnitt bei dem Versuch e1\_RS14-3 weist einen auffällig langanhaltenden, kontinuierlichen Verlauf auf, wie er bei sämtlichen drei Vorversuchen e1\_RS18\_VV zu erkennen ist. Unter der Annahme, dass innerhalb eines Teilverschiebungsabschnitts keine signifikante Weiterschädigung auftritt, sondern erst mit dem Übergang zum nächsten Teilverschiebungsabschnitt, weisen diese Versuche anfänglich eine vergleichsweise langanhaltende, stabile Verschiebungsphase auf, ohne einen offensichtlichen Schädigungsfortschritt.

IV. Wenn es zutrifft, dass die vergleichsweise sprunghafte Verschiebungszunahme beim Übergang zwischen den Teilverschiebungsabschnitten auf ein sprunghaftes „Erweichen“ des Verbunddübelsystems zurückzuführen ist und somit als Indikator für einen ebenso sprunghaft auftretenden Schädigungsfortschritt des Systems betrachtet werden kann, dann folgt hieraus, dass die Gesamtverschiebungscharakteristik des Versuchs das Resultat eines ständigen Wechsels von logarithmischen Verschiebungsphasen und fortschreitenden, sprunghaften Systemschwächungen ist. Dabei beschleunigt sich der Verschiebungsfortschritt mit jedem weiteren Schädigungsfortschritt, was auf eine Lasterhöhung für die noch „gesunden“ Abschnitte der Mörtelschale hindeutet.

c) Hauptversuche /

Gesamtverschiebungscharakteristik am Beispiel der Versuch e1\_RS14

I. Die Gesamtverschiebungscharakteristik ist ein Resultat der Änderung der Verschiebungscharakteristik der Teilverschiebungsabschnitte. Sie ist somit im Verlauf des Versuchs bestimmt durch die Dauer der Teilverschiebungsphasen und den Grad der Zunahme des Verschiebungsfortschritts beim Übergang zwischen zwei Teilverschiebungsabschnitten.

II. Die sich aus den Teilverschiebungsabschnitten ergebende Gesamtverschiebungscharakteristik kann in guter Näherung mittels einer Potenzfunktion beschrieben werden. Dies ist in Diagrammen 7.14 dargestellt. Während die einzelnen Ver-

schiebungsstufen unter dauerhafter Lasteinwirkung gut durch einen logarithmischen Ansatz angenähert werden können, lässt sich die Aneinanderreihung der einzelnen logarithmischen Verschiebungsfortschritte und damit der vermuteten stufenartigen Schädigungsfortschritte, spätestens ab der ca. 20. Versuchsstunde und mindestens bis zur ca. 1000. Versuchsstunde, gut durch eine Potenzfunktion beschreiben (entspricht dem Verschiebungsansatz nach FINDLEY). Hierauf folgt die für Epoxy 1 und 2 typische Endstabilisierungsphase.

d) Hauptversuche /

Endstabilisierung am Beispiel der Versuche e1\_RS14

I. Aus der Annahme, dass die Gesamtverschiebungscharakteristik auf eine kontinuierliche, stufenweise Schädigung des Systems zurückzuführen ist, kann weiter geschlossen werden, dass die Endstabilisierung durch eine zunehmende Verlangsamung des Schädigungsfortschritts verursacht ist. Mit ihrem Einsetzen beginnt die Gesamtverschiebungscharakteristik von der Gesetzmäßigkeit einer Potenzfunktion abzuweichen.

II. Die Endstabilisierung beruht auf einer Änderung des Verhältnisses zwischen der Dauer eines Teilverschiebungsabschnitts und dem dabei erreichten Verschiebungsfortschritt während dieser einzelnen logarithmischen Verschiebungsphase.

III. Ein Grund für diesen verlangsamten Schädigungsfortschritt ist nicht erkennbar. Es sind zwei Szenarien naheliegend. Zum einen könnte mit jeder Schädigungsstufe im geschädigten Bereich eine Resttragfähigkeit verbleiben, beispielsweise in Form von Haftreibung zwischen Rissen, durch die der Schädigungsantrieb kontinuierlich verringert wird und die erforderliche Einwirkung durch Lastumlagerung auf die gesunden Restbereiche für den nächsten Schädigungsfortschritt nicht mehr erreicht wird, wodurch dieser zum Stillstand kommt. Zum anderen ist denkbar, dass mit der kontinuierlich fortschreitenden Schädigung lediglich ein Übergang zu einem anderen per se stabilen Tragmechanismus erfolgt (vielleicht gedanklich vergleichbar dem Übergang von Beton von Zustand I in Zustand II im Moment der Rissbildung) und mit Abschluss dieses Übergangs keine weitere Mörtelschädigung gleicher Art mehr stattfindet, weshalb die zeitabhängige Verschiebung unter dauerhafter Lasteinwirkung nur noch in dem beobachteten geringen Maße fortschreitet.

e) Übertragbarkeit der Beobachtungen auf die übrigen Hauptversuche mit abweichenden Ringspaltmaßen

I. Teilverschiebungscharakteristik

Die Diagramme 7.11, 7.15, und 7.17 zeigen die Anwendung der logarithmischen Teilverschiebungscharakteristik gemäß den Versuchen e1\_RS14 auf die Versuche e1\_RS13, e1\_RS18 und e1\_RS24. Es kann festgestellt werden, dass auch bei den übrigen getesteten Ringspaltmaßen eine solche Teilverschiebungscharakteristik anzunehmen ist, wenn auch in zum Teil unterschiedlich starker Ausprägung. Diese Charakteristik setzt annähernd direkt nach dem Ende des Belastungsvorgangs ein, sodass davon auszugehen ist, dass das System beim Belasten oder unmittelbar danach keiner erkennbaren Systemschädigung ausgesetzt war. Unabhängig vom Ringspaltmaß kann somit unter dauerhafter Lasteinwirkung eine stufenartige Schädigung des Verbundmörtels angenommen werden.

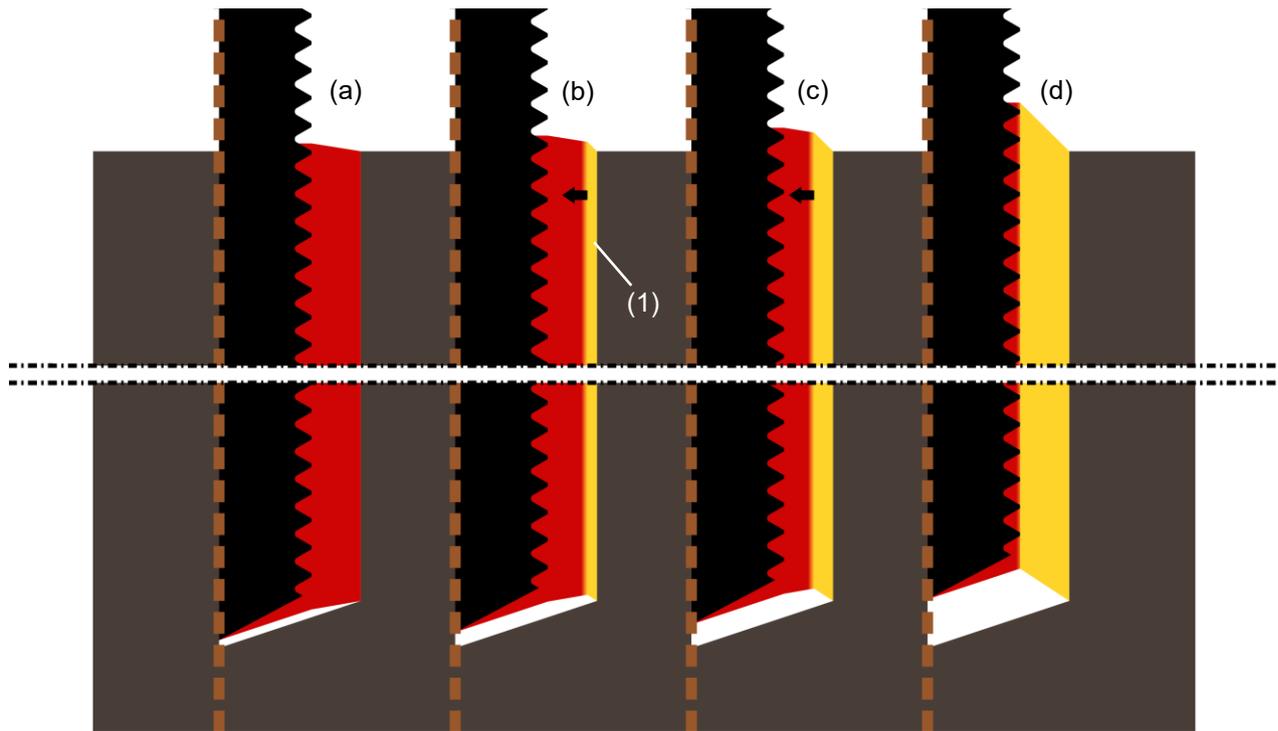
II. Gesamtverschiebungscharakteristik

Die Diagramme 7.12, 7.16 und 7.18 zeigen die Anwendung der Potenzfunktion als Gesamtverschiebungscharakteristik auf die Versuche e1\_RS13, e1\_RS18 und e1\_RS24. Es ist zu erkennen, dass hierdurch bei sämtlichen Versuchen eine gute Näherung gegeben ist. Diese Näherung trifft umso länger zu, je größer das Ring-

spaltmaß ist. Bei den Versuchen e1\_RS18 und e1\_RS24 konnte keine Abweichung hiervon während der Versuchsdauer beobachtet werden.

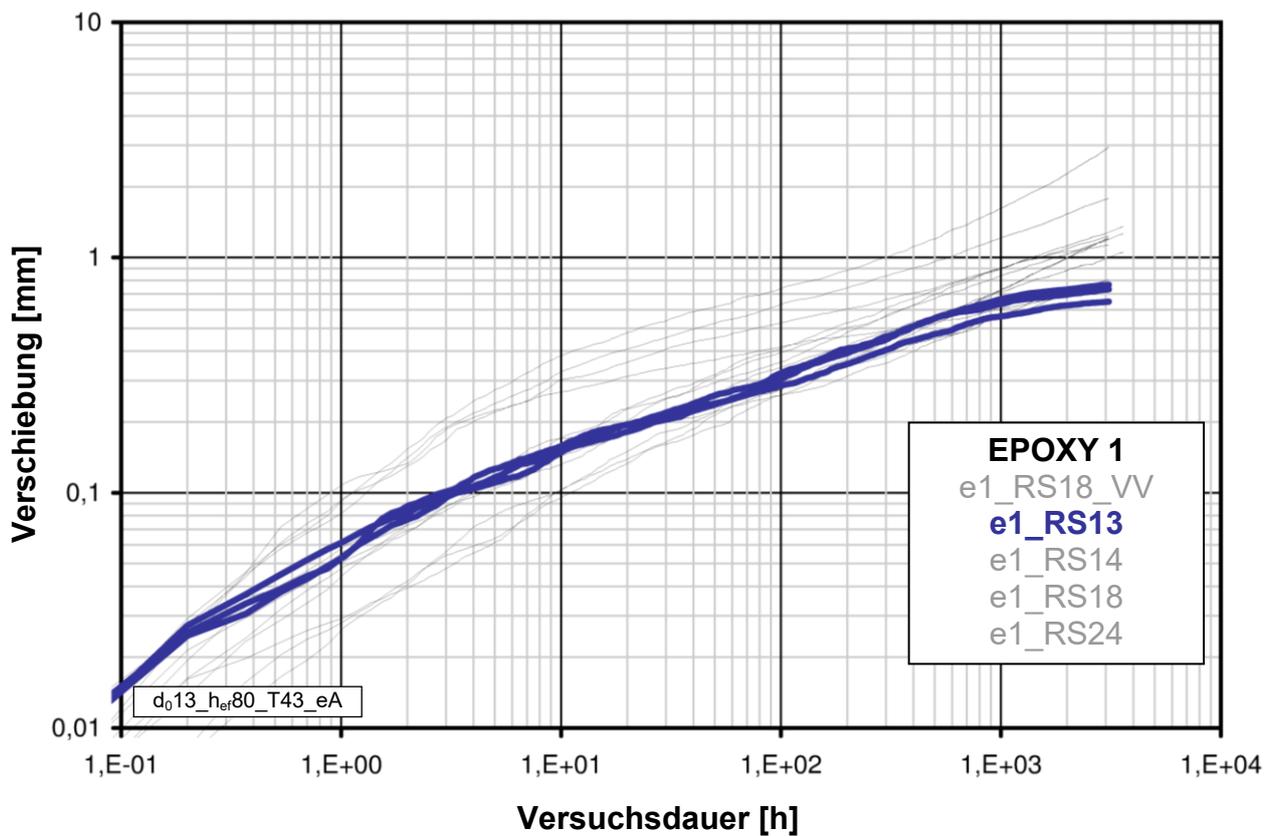
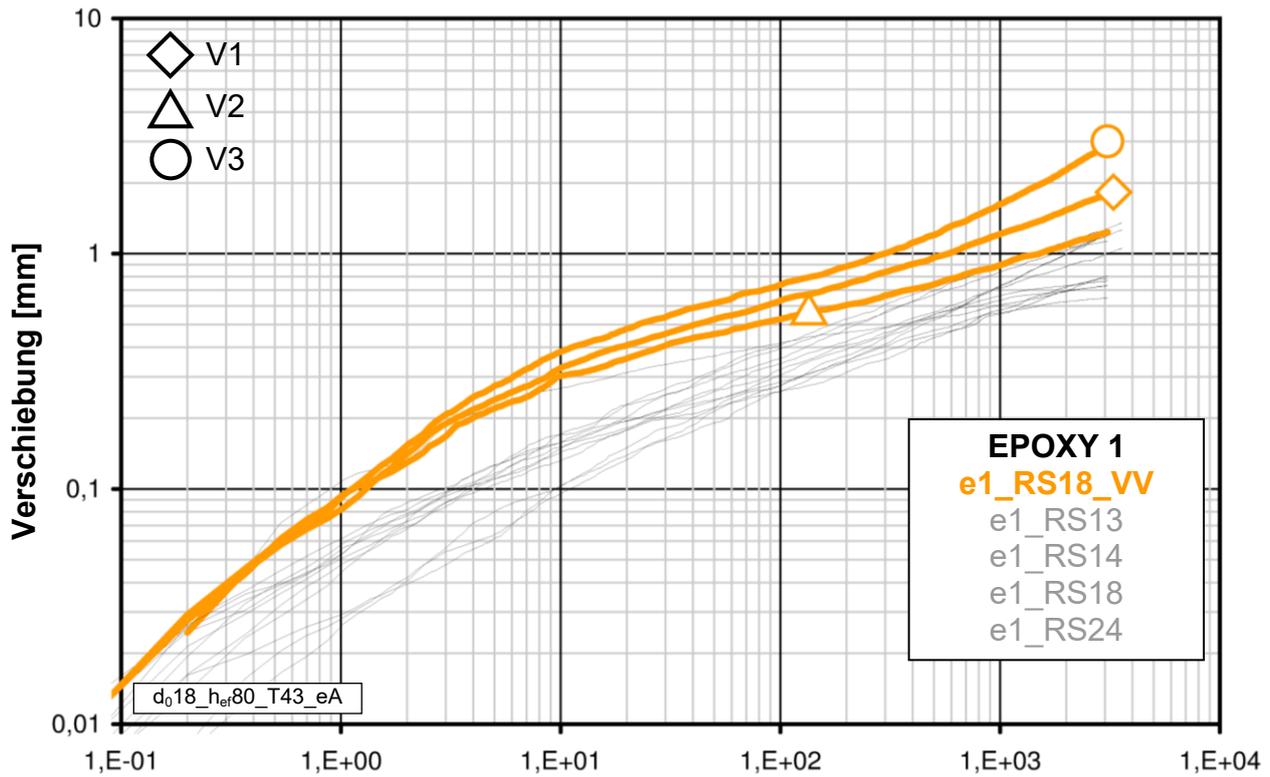
### III. Endstabilisierung

Der Zeitpunkt des Einsetzens der Endstabilisierung unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Ringspaltmaß. Bei den Versuchen e1\_RS14 erfolgt dies nach einer Versuchsdauer von ca. 1000 - 1600 Versuchsstunden. Bei den Versuchen e1\_RS13 kann dies bereits nach ca. 600 Versuchsstunden beobachtet werden. Bei den Versuchen e1\_RS18 und e1\_RS24 hatte während der Versuchsdauer noch keine Endstabilisierungsphase eingesetzt. Die Versuche e1\_RS24 liefern einen Hinweis, der das Verhalten erklären kann. Hier gelang das Freilegen der Mörtelschale nach dem Dauerlastversuch. An dieser zeigte sich eine helle Verfärbung der Mörtelsubstanz, die sich von der Verbundfläche zwischen Mörtel und Beton bis über ca. die Hälfte der Mörtelschale erstreckte. Diese helle Verfärbung des Mörtels erstreckt sich somit dem Anschein nach, von der Verbundzone ausgehend, in den Mörtel hinein. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um eine Schädigung der Mörtelschale bzw. der Mörtelsubstanz handelt, die durch die Art der Verbindung bzw. der Lastübertragung zwischen Mörtel und Beton hervorgerufen wird. Diese Vermutung wird durch den Umstand gestützt, dass eine vergleichbare Beeinträchtigung des Mörtels im Bereich der Lasteintragung aus der Gewindestange in den Mörtel nicht zu erkennen ist. Die übermäßigen Verschiebungen könnten somit das Resultat einer sich von außen nach innen fortsetzenden Schädigung der Mörtelschale sein, die sich am ehesten mit dem Begriff „Erweichung“ umschreiben lässt. Abbildung 7.2 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Die angenommene Erweichungszone (gelb, (1)) schreitet unter dauerhafter Lasteinwirkung vom Bohrlochrand in Richtung der Gewindestange fort. Demnach könnte die Endstabilisierung des Verschiebungsvorganges (vgl. z.B. Kapitel 6) ggf. mit dem Abschluss oder dem Stillstand dieses zeitabhängigen „Erweichungsvorgangs“ erklärt werden. Nähere Untersuchungen dieses Verhaltens erscheinen sinnvoll, da sich die sehr hohe Verformungskapazität epoxidharzbasierter Verbunddübelssysteme negativ auf die Dauerhaftigkeit auswirken kann, wenn eine weite Abstützung gegeben ist. Hierdurch kann der Fortschritt möglicherweise im Beton vorhandener Risse forciert werden (vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.5 / f)).

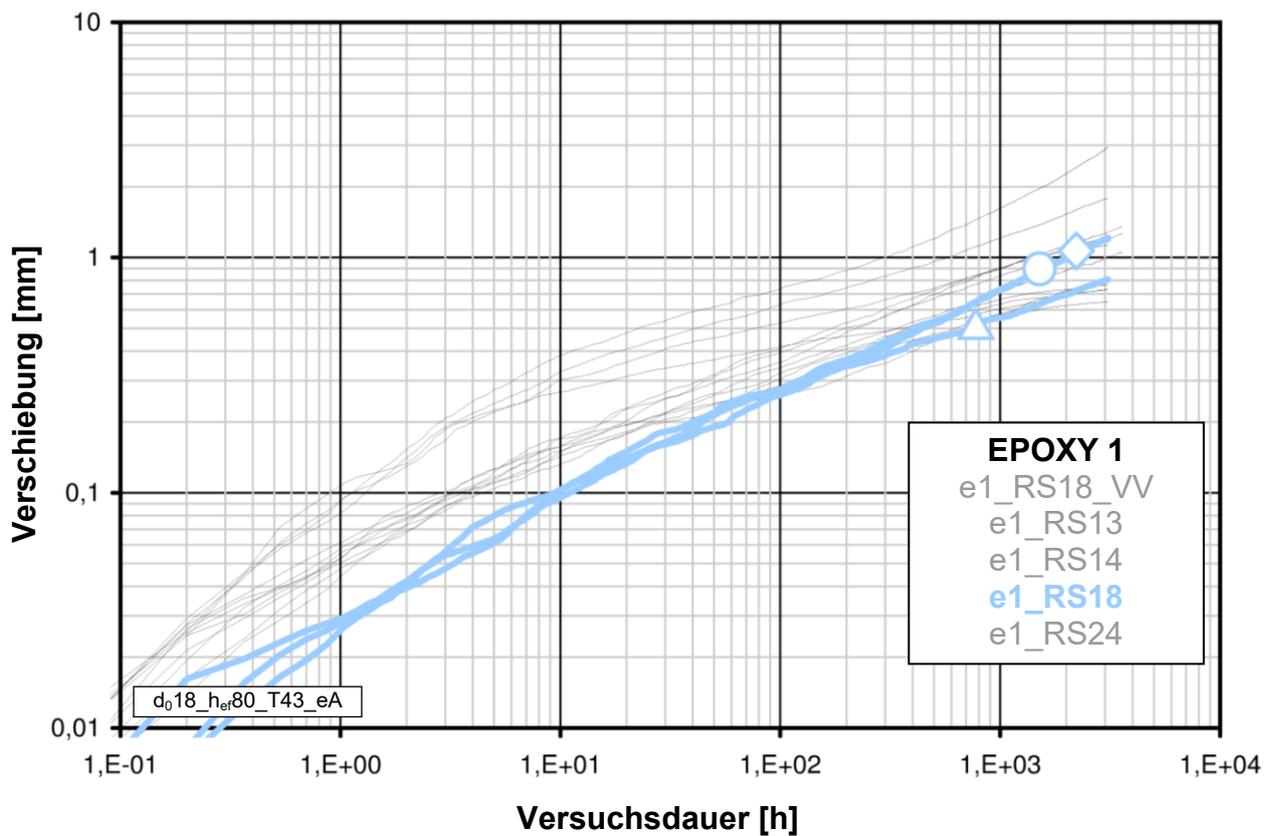
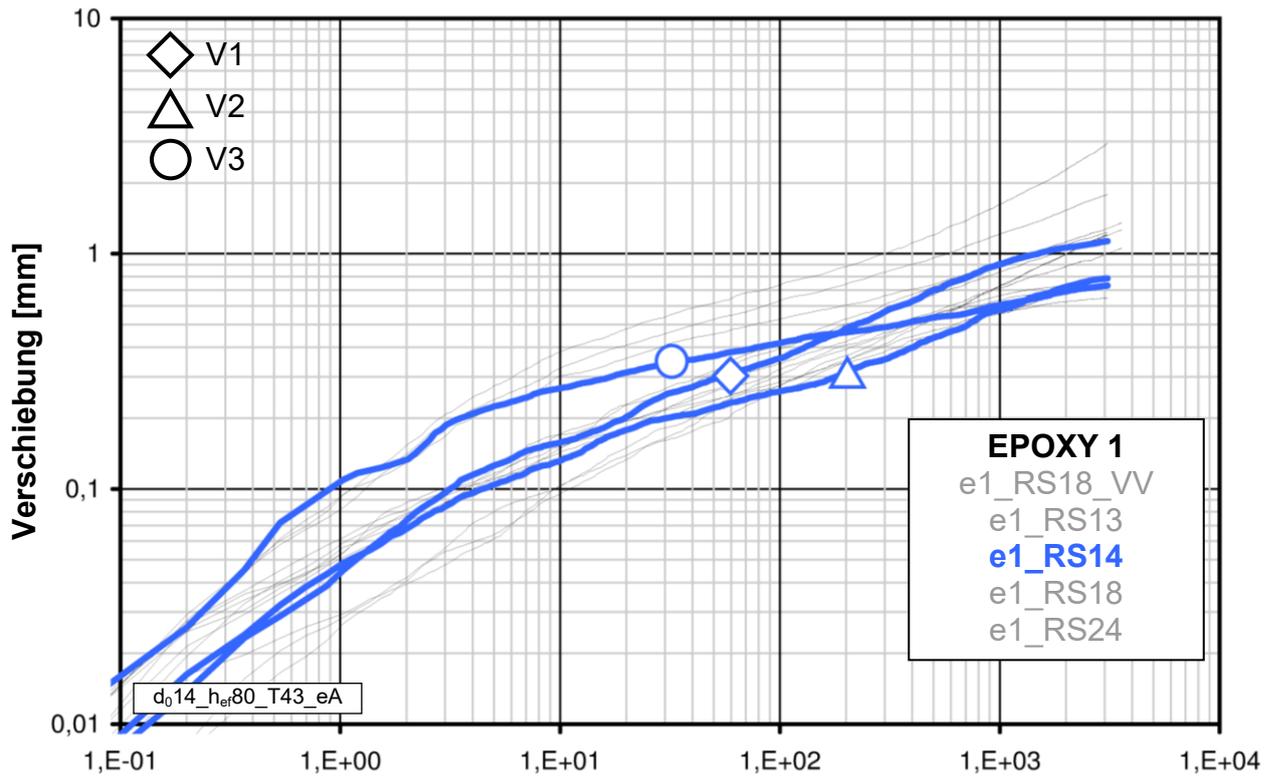


(1) Erweichungszone

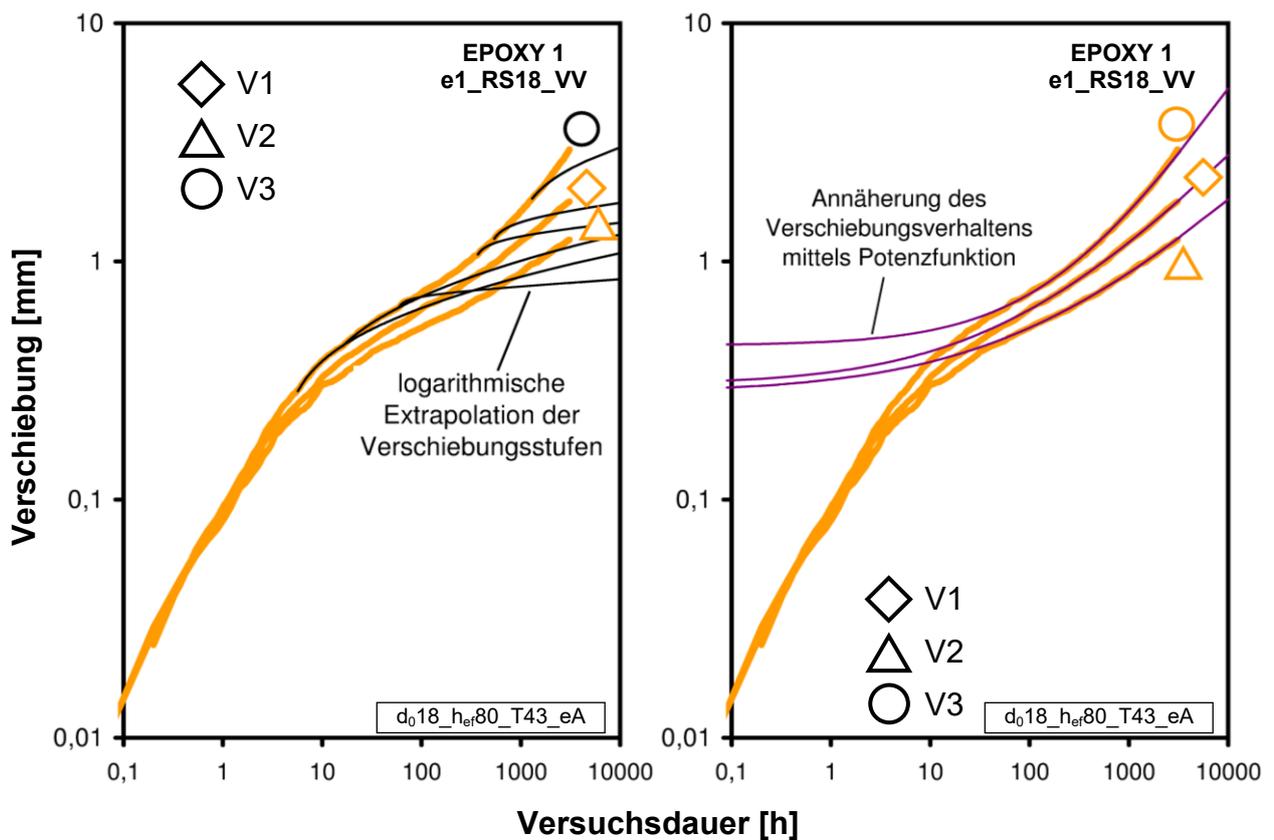
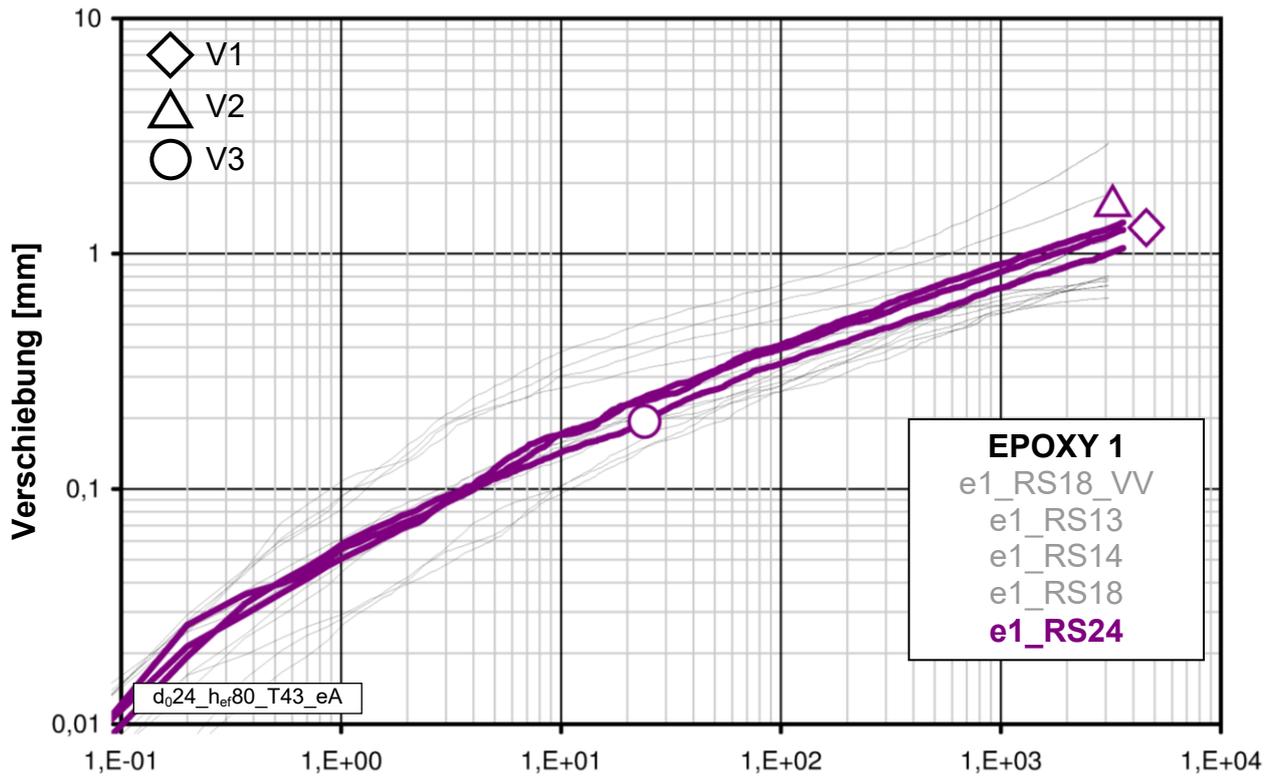
**Abbildung 7.2:** Darstellung eines von (a) nach (d) ablaufenden, zeitabhängigen Erweichungsvorgangs der Mörtelschale, ausgehend von der Kontaktfläche zwischen Mörtel und Beton, fortschreitend in Richtung Gewindestange



**Diagramm 7.4 (oben) und 7.5:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 3 mm (oben) und 0,5 mm

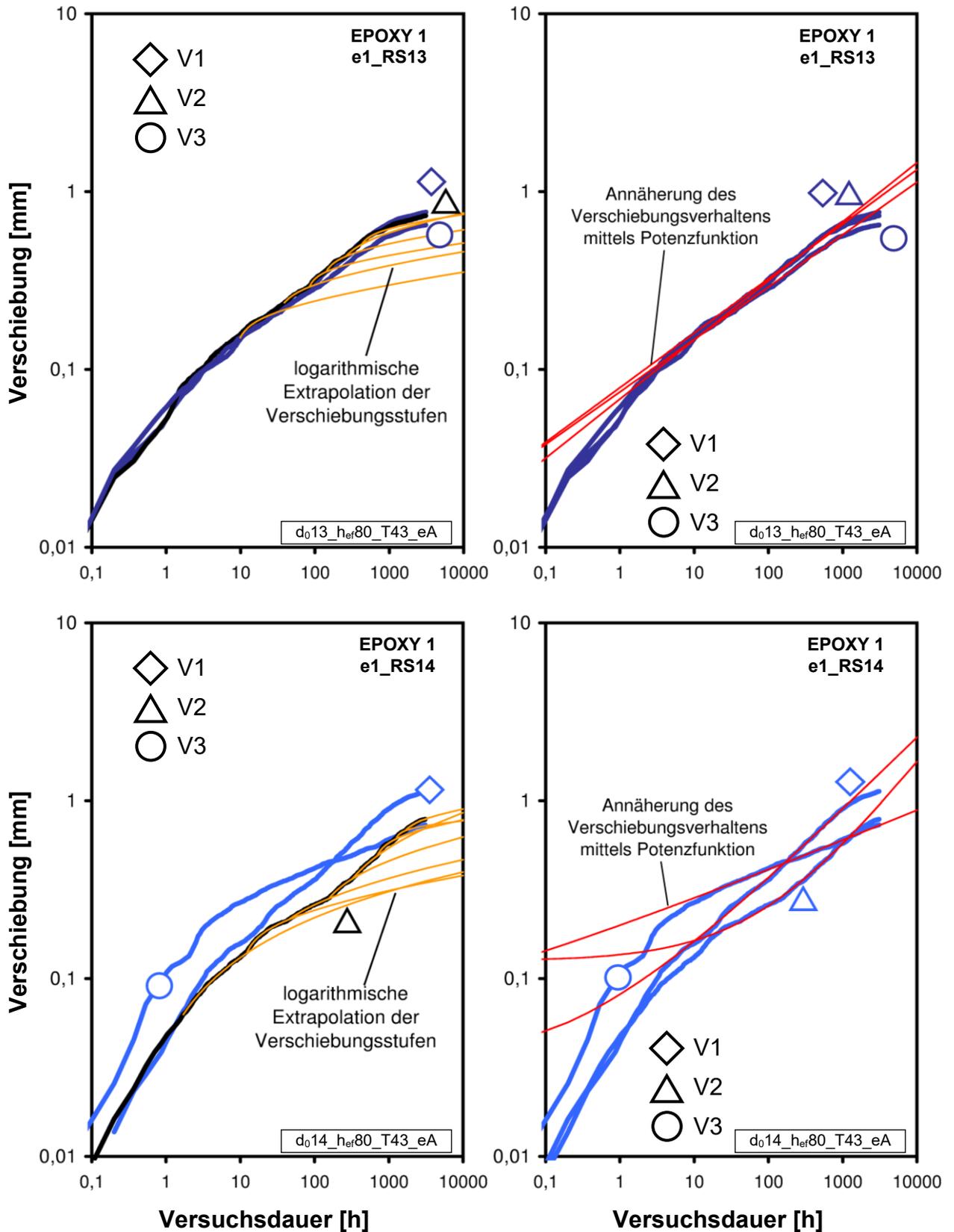


**Diagramm 7.6 (oben) und 7.7:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 1 mm (oben) und 3 mm



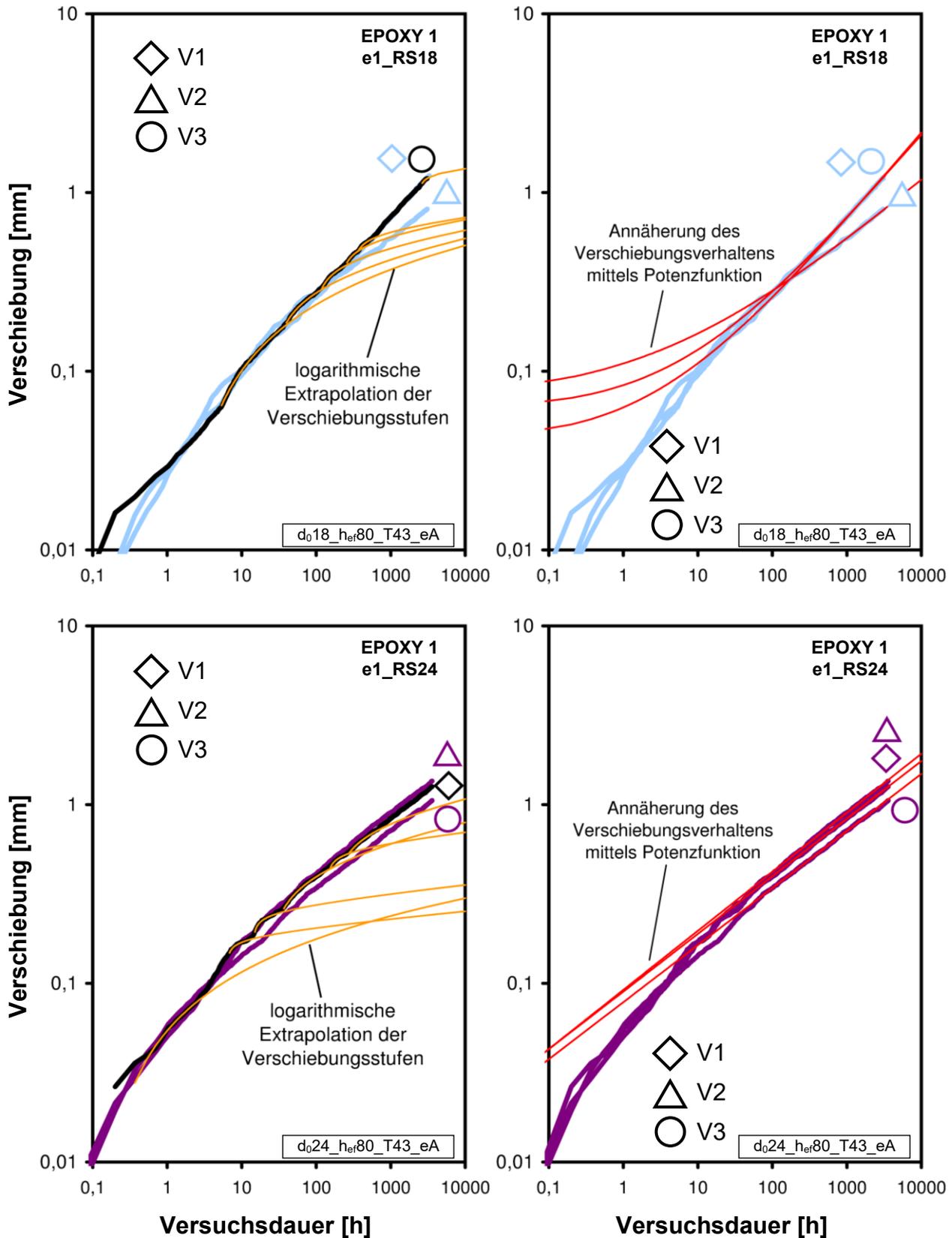
**Diagramm 7.8:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 6 mm

**Diagramm 7.9 (o.l.) und 7.10 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS18\_VV



**Diagramm 7.11 (o.l.) und 7.12 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS13

**Diagramm 7.13 (u.l.) und 7.14 (u.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS14



**Diagramm 7.15 (o.l.) und 7.16 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS18

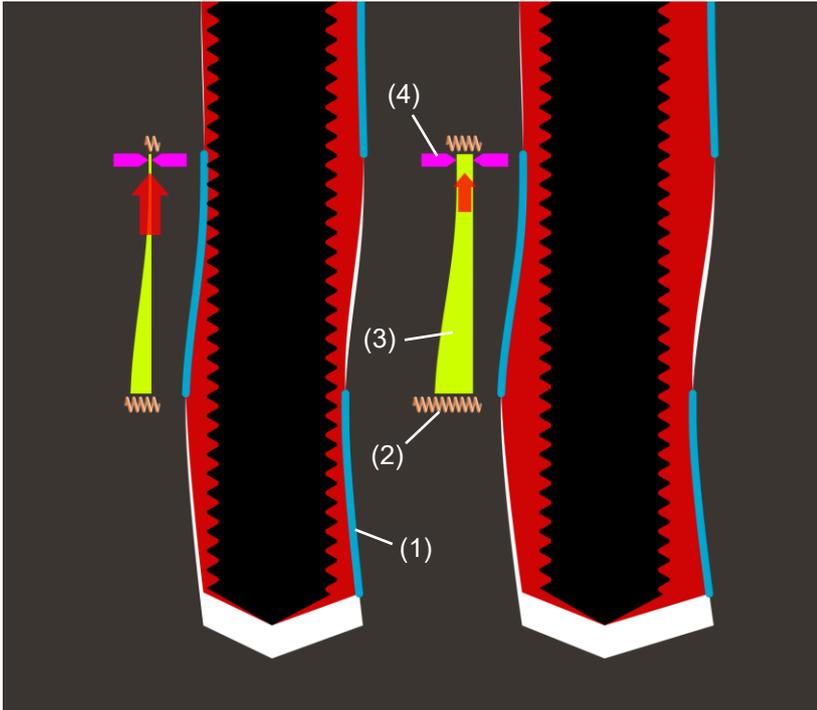
**Diagramm 7.17 (u.l.) und 7.18 (u.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS24

### 7.4.6 Zusammenfassung

(Ringspaltversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_RS18\_VV, e1\_RS13, e1\_RS14, e1\_RS18, e1\_RS24)

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Unter der Annahme, dass die Versuche e1\_RS24 während der Belastungsphase ungeschädigt blieben und somit bezüglich des Vorschädigungsgrades als Referenz dienen können, kann für die Dauerlastversuche e1\_RS18\_VV, e1\_RS13, e1\_RS14, e1\_RS18 insgesamt festgestellt werden, dass sämtliche Versuche bereits während der Belastungsphase eine Vorschädigung erlitten haben müssen. Als Anhaltspunkte dienen hierbei die Anfangsverschiebungen und die absoluten Verschiebewege unter Dauerlast. Für keines von beiden konnte eine Korrelation zwischen den Verschiebungsbeträgen und den Ringspaltmaßen festgestellt werden, wie dies für den elastischen Fall annähernd zu erwarten ist.
- b) Aus dem Ausmaß der Abweichung vom erwarteten Verhalten kann geschlossen werden, dass diese Vorschädigung umso ausgeprägter ist, je kleiner das Ringspaltmaß ist. Grund hierfür ist, dass mit kleiner werdendem Ringspaltmaß entsprechend mit größer werdenden Steifigkeitsschwankungen entlang der Mörtelschale zu rechnen ist, verursacht durch Bohrlochimperfectionen. Hierdurch ist unter Last mit höheren Spannungsspitzen entlang der Bohrlochwand zu rechnen und entsprechend mit einem früheren Versagen dieser Teilbereiche der Klebung. Dies bedeutet auf die Erkenntnisse der Standzeitversuche in Kapitel 6 bezogen, dass die dort definierte „Switch-Last“ umso niedriger anzunehmen ist, je kleiner das Ringspaltmaß ist. Unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit sind kleine Ringspaltmaße somit als kritischer zu betrachten.  
Demgegenüber ist das Nachbruchverhalten unter dauerhafter, zentrischer Lasteinwirkung mit kleiner werdendem Ringspaltmaß tendenziell weniger kritisch anzunehmen, da der unterstellte hinterschnittartige Tragwiderstand aufgrund der geringeren Mörtelschichtdicke hierbei weniger schnell abnimmt als bei einer größeren Mörtelschichtdicke. Abbildung 7.3 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Bei beiden abgebildeten Verbunddübeln hat die Adhäsion bereits vollständig versagt. Die Tragwirkung besteht somit aus Reibung sowie aus der hinterschnittartigen Tragwirkung der Bohrlochunebenheiten an den verbliebenen Kontaktzonen zwischen Mörtel und Beton (blau, (1)). Die Bohrlochwelligkeit beider Systeme ist identisch ausgeprägt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Bohrlochdurchmesser des rechten Bohrlochs größer ist und die Mörtelschale damit entsprechend dicker. Die Mörtelschale rechts weist demnach eine geringere Steifigkeit in radialer Richtung auf, dargestellt durch Federsymbole (2), und ist ortsabhängig (grün, (3)). Aus diesem Umstand resultiert eine größere, zeitabhängige Nachgiebigkeit unter Dauerlast infolge Kriechens, die es einem Dübel (bei ansonsten identischer Bohrlochbeschaffenheit) ermöglicht, den Tragwiderstand in Form des Hinterschnitts (als Spalt symbolisiert, (4)) umso schneller zu überwinden, je dicker die Mörtelschale ist. Dies wird, gegenüber einer dünneren Mörtelschale, in der Regel zu einem vergleichsweise frühen Versagen führen.
- c) Die deutlichen Unterschiede hinsichtlich des Ringspaltmaßes spiegeln sich in den Beträgen der erreichten Verschiebungen innerhalb der ersten 800 Versuchsstunden kaum wider. Erst mit Einsetzen der für die getesteten epoxidharzbasierten Verbundmörtel typischen Endstabilisierung des Verschiebungsverhaltens beginnen die Kurven unterschiedlicher Serien voneinander signifikant abzuweichen.



(1) Kontaktfläche, (2) Federsymbol = radiale Nachgiebigkeit und deren (3) Verlauf, (4) Engstelle

**Abbildung 7.3:** durch das Ringspaltmaß maßgeblich beeinflusste hinterschnittartige Tragwirkung nach Versagen der Adhäsion zwischen Mörtel und Beton

#### 7.4.7 Ausblick

Das abweichende Verhalten der Versuche e1\_RS18\_VV von sämtlichen anderen Ringspaltversuchen, insbesondere von den Versuchen e1\_RS18 mit identischem Ringspalt, konnte innerhalb der Ringspaltuntersuchung nicht geklärt werden. Mögliche Unterschiede in der Betonfestigkeit können, aufgrund der engen Abstützung, als Grund praktisch ausgeschlossen werden. Nicht ausgeschlossen werden können dagegen Unterschiede hinsichtlich der Betonsteifigkeit. Mit abnehmender Betonsteifigkeit ist unter der Abstützplatte der engen Abstützung mit größeren Querdehnungen in radialer Richtung zu rechnen und damit mit einer Beeinflussung des Querspannungszustands, durch den die Verbundfestigkeit beeinflusst sein kann [39]. Das Dübelssystem soll nachfolgend auf einen solchen Effekt hin untersucht werden.

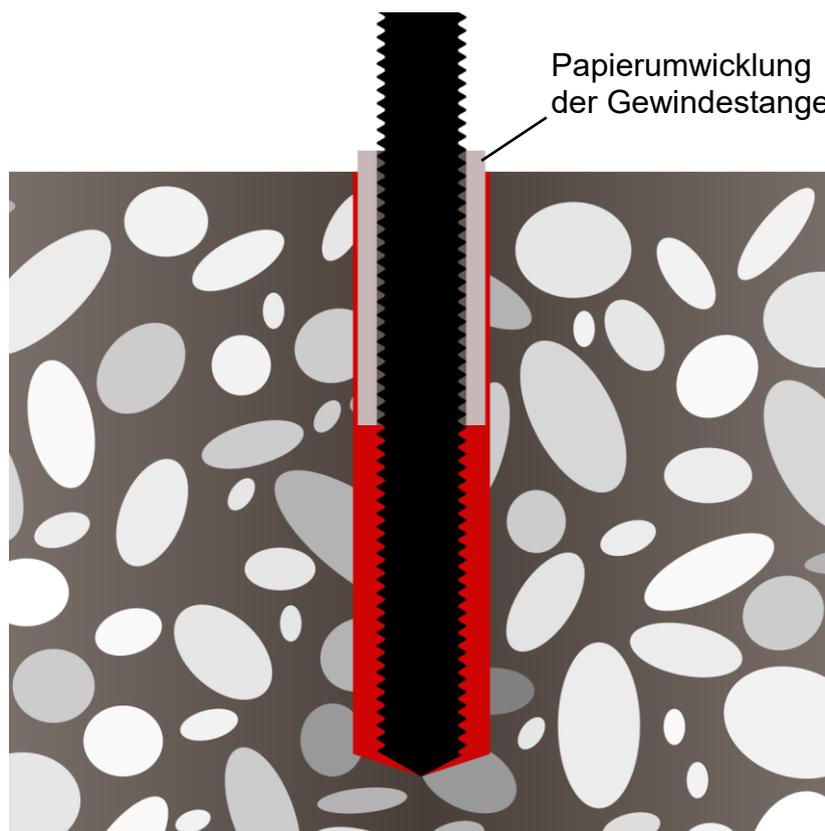
## 7.5 V2 – Querdehnungsversuche

### 7.5.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung

In den Vorversuchen e1\_RS18\_VV zu der Ringspaltuntersuchung hat sich ein Systemverhalten gezeigt, das sich signifikant von denjenigen der übrigen Ringspaltversuche unterscheidet (vgl. Kapitel 7, Abschnitt 7.4). Gemäß dem im Anschluss an die Ringspaltuntersuchungen gemachten Ausblick soll nachfolgend untersucht werden, ob durch Unterschiede bezüglich der Betonsteifigkeit ein signifikanter Einfluss auf den Verbund gegeben ist. Denkbar ist dies, weil hierdurch am Bohrlochmund unterschiedlich große Querdehnungen in radialer Richtung verursacht und damit die Verbundspannungen beeinflusst sein können.

### 7.5.2 Ansatz

Es wird unterstellt, dass sich die positiv wirkenden Querdruckspannungen vor allem nahe der Abstützplatte und somit nahe dem Bohrlochrand auswirken. Es wurde daher eine Vergleichsserie mit einer erhöhten Setztiefe von 120 mm durchgeführt, unter Beibehaltung der Einbindetiefe von 80 mm (Versuche e1\_RS18\_tief). Zwischen Mörteloberkante und Bohrlochoberkante wurde hierbei jeglicher Verbund zwischen der Gewindestange und dem Beton verhindert (siehe Abbildung 7.4). Bei Gültigkeit der obigen Annahme wäre durch diese Maßnahme zu erwarten, dass das Verschiebungsverhalten, aufgrund des Fehlens eines begünstigenden, konzentrierten Querdrucks entlang der Einbindetiefe, deutlich progressiver ausfällt als bei den Versuchen e1\_RS18 mit Standardkonfiguration.



**Abbildung 7.4:** Ausbildung einer vollständigen Verbundverhinderung zwischen Gewindestange und Beton

### 7.5.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- Bohrlochdurchmesser nominell:  $d_{\text{nom}} = 18 \text{ mm}$  (Bohrereckmaß entsprechend  $d_{\text{cut,m}}$ )
- Setztiefe: 120 mm (abisoliert)
- Einbindetiefe:  $h_{\text{ef}} = 80 \text{ mm}$ , Dübel zentriert
- Prüftemperatur:  $T = 43^\circ\text{C}$

EPOXY 1 / Querdehnungsversuche								
Serienkennung	$h_{\text{ef}}$ [mm]	$d_{\text{nom}}$ [mm]	RS [mm]	Beton	Abst.	T [°C]	Last [kN]	Anz.
e1_RS18_tief	80*	18	3,0	C20/25	eng	43	50,0	3

\* tiefster Punkt in 120 mm Tiefe

**Tabelle 7.4:** Übersicht, Querdehnungsversuche

### 7.5.4 Ergebnisse

#### 7.5.4.1 Analyse Anfangsverschiebungen

(Querdehnungsversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_RS18\_tief)

Das Diagramm 7.19 zeigt die Anfangsverschiebungen sämtlicher Ringspaltversuche. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.

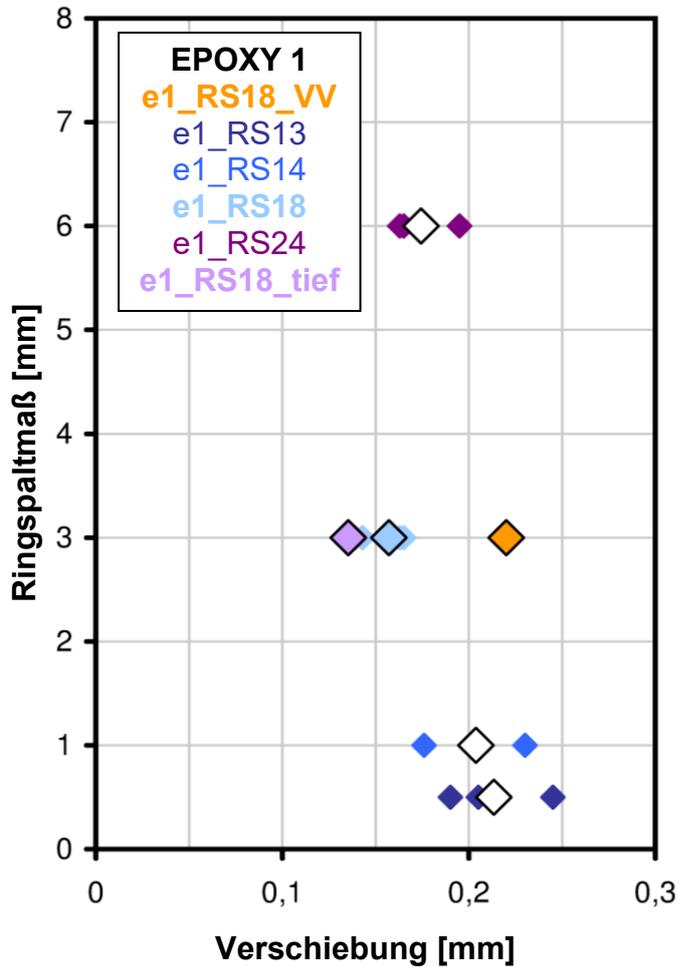
EPOXY 1 / Querdehnungsversuche									
Serienkennung	V [Nr.]	$h_{\text{ef}}$ [mm]	$d_{\text{nom}}$ [mm]	RS [mm]	Abst.	T [°C]	Last [kN]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]
e1_RS18_tief	1	80	18	3,0	eng	43	50	0,13	0,13
	2							0,13	
	3							0,14	

**Tabelle 7.5:** Anfangsverschiebungen, Querdehnungsversuche

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- Streuung
  - Die allgemeinen Feststellungen zur Streuung der Anfangsverschiebungen aus der Ringspaltuntersuchung gelten analog (vgl. Abschnitt 7.4.5.1).
  - Die Streuung der Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_RS18\_tief sind ebenso überaus gering wie die der Vorversuche e1\_RS18\_VV.
- Verschiebungsbeträge
  - Die allgemeinen Feststellungen zu den Verschiebungsbeträgen aus der Ringspaltuntersuchung gelten analog (vgl. Abschnitt 7.4.5.1)
  - Es ist ein Unterschied zwischen den Anfangsverschiebungen der Versuche

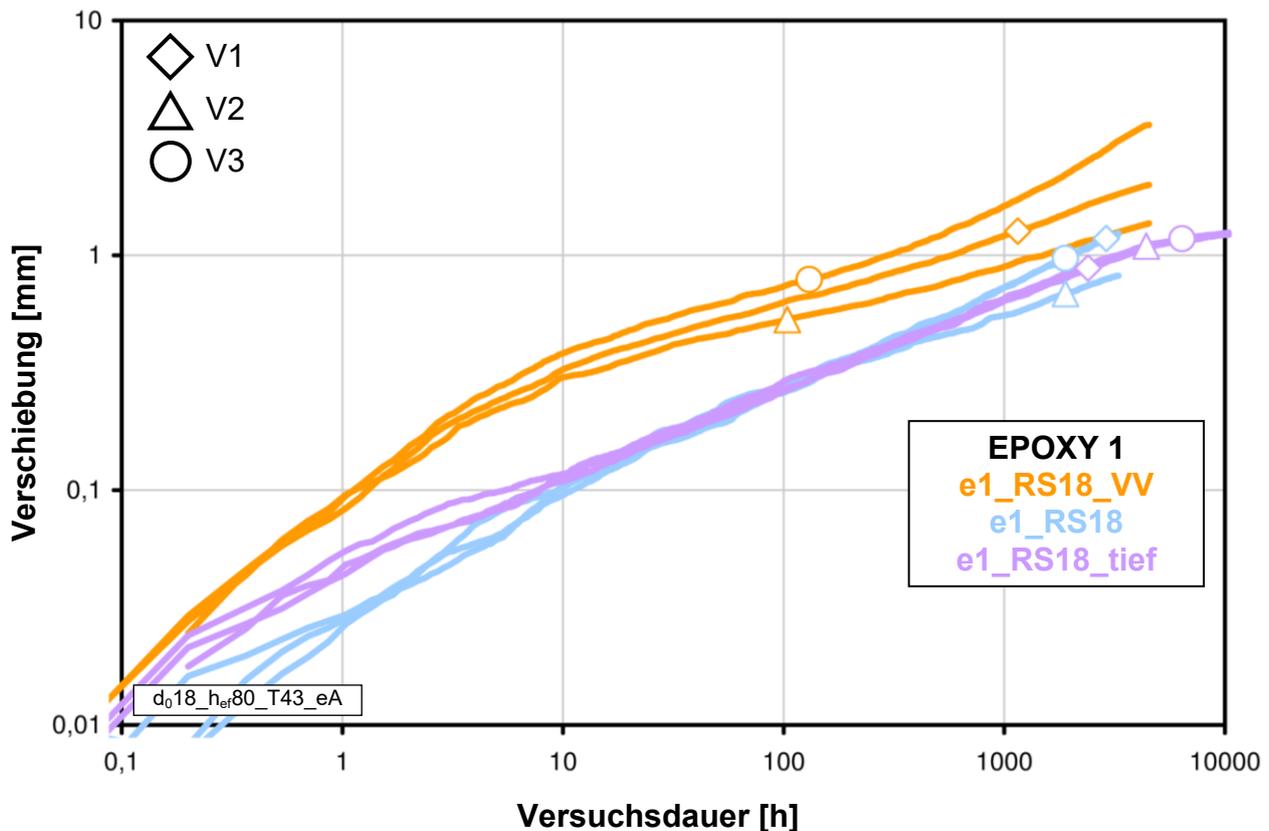
e1\_RS18 und e1\_RS18\_tief erkennbar. Dieser ist aber so gering, dass er keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Tragverhaltens bzw. des Tragmechanismus beider Versuche unmittelbar nach der Belastungsphase erwarten lässt. Durch die, gegenüber e1\_RS18\_tief, vergleichsweise große Nähe der Verbundzone der Versuche e1\_RS18 zur Lasteinleitung der engen Abstützung ist keine Beeinflussung der Verbundfestigkeit zu erkennen.



**Diagramm 7.19:** Anfangsverschiebungen der Ringspalt- und Querdehnungsversuche

### 7.5.4.2 Analyse der Kurvenverläufe

Diagramm 7.20 zeigt die Verschiebungskurven der Versuche e1\_RS18\_tief sowie der Versuche e1\_RS18\_VV und e1\_RS18 aus der Ringspaltuntersuchung im doppelt-logarithmischen Maßstab. Bezüglich der Kurvenverläufe kann Folgendes festgestellt werden:



**Diagramm 7.20:** Gegenüberstellung sämtlicher Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 3 mm

a) Teilverschiebungscharakteristik

Das Diagramm 7.21 zeigt die Teilverschiebungscharakteristik der Versuche e1\_RS18\_tief. Die Feststellung aus der Ringspaltuntersuchung zur Teilverschiebungscharakteristik gilt hier analog (vgl. Abschnitt 7.4.5.2 / e) / I.).

b) Gesamtverschiebungscharakteristik

I. Das Diagramm 7.22 zeigt die Gesamtverschiebungscharakteristik der Versuche e1\_RS18\_tief. Diese widerspricht nicht der Hypothese eines kontinuierlichen, stufenweisen Schädigungsfortschritts unter dauerhafter Lasteinwirkung, wie sie aus den Ergebnissen der Ringspaltversuche abgeleitet wurden (Details siehe Abschnitt 7.4.5.2).

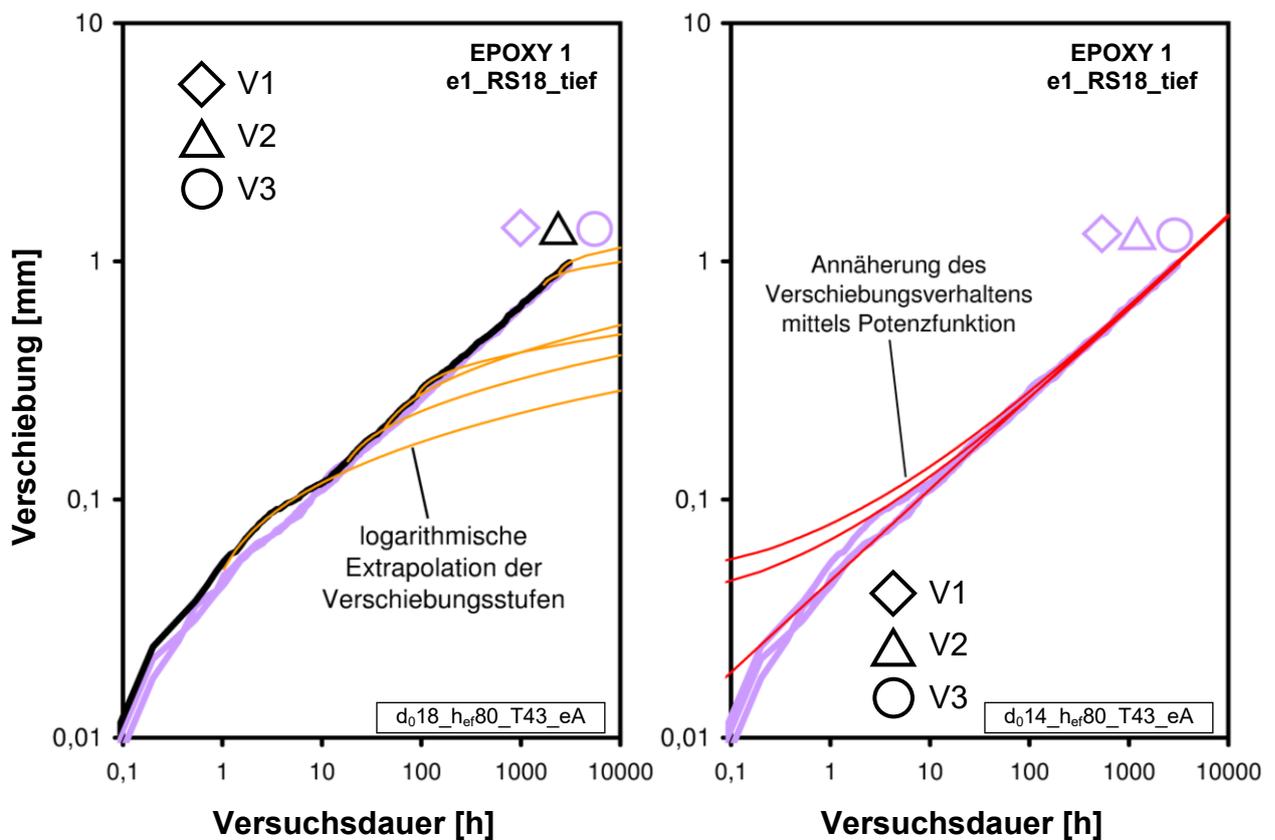
II. Die Kurven der Versuche e1\_RS18\_tief weisen untereinander ab ca. der 10. Versuchsstunde praktisch keine Unterschiede im Verschiebungsverhalten auf. Gleiches gilt, ebenso untereinander, für die Versuche e1\_RS18-1 und -3. Dies kann als Beweis für die hohe Qualität der Versuchsdurchführung und der daraus gewonnenen Ergebnisse gewertet werden, insbesondere für deren ausgezeichnete Reproduzierbarkeit.

III. Der Gesamtverschiebungscharakteristik der Versuche e1\_RS18\_tief entspricht ab ca. der 1. Versuchsstunde bis zum Beginn der Endstabilisierungsphase nach ca. 2000 Versuchsstunden in sehr guter Näherung einer Potenzfunktion (vgl.

hierzu die Versuche e1\_RS14). Gleiches gilt für die Versuche e1\_RS18-1 und -3, wobei die Kurvenverläufe im direkten Vergleich geringfügig steiler und die Verschiebungen damit zum Beginn der Endstabilisierungsphase etwas größer sind (vgl. Diagramm 7.20). Die geringfügig größeren Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_RS18\_tief können auf die hier im Messwert enthaltene Betonstauchung der Aufbetonschicht im abisolierten Bereich des Dübels zurückgeführt werden. Der Versuch e1\_RS18-2 zeigt im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen seiner Serie einen deutlich verminderten Verschiebungsfortschritt. Der Umstand, dass dieser selbst geringer ist als bei den Versuchen e1\_RS18\_tief, macht einen versuchstechnischen Einfluss wahrscheinlich, sodass mittels der Kurvenverläufe eine Begünstigung des Verbundverhaltens durch möglichen Querdruck infolge der Abstützkraft nicht bestätigt werden kann.

IV. Die Versuche e1\_RS18\_tief bilden unter versuchstechnischen Gesichtspunkten das Optimum. Die vernachlässigbar geringe Streuung bestätigt dies. Die im Vergleich hierzu tendenziell größeren Verschiebungen der Versuche e1\_RS18 können als Hinweis gedeutet werden, dass ein möglicher Querdruck unterhalb der Abstützplatte, entgegen allen Erwartungen, tendenziell negativen Einfluss auf das Verbundverhalten hat. Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist eine Aussage hierzu nicht möglich.

V. Das Verhalten der Versuche e1\_RS18\_VV, der Anlass für die Untersuchung, kann hierdurch nicht erklärt werden. Die Annahme, dass eine zeitlich veränderliche Eigenschaft der beiden verwendeten Betonchargen ursächlich hierfür ist, kann dennoch aufrechterhalten werden.



**Diagramm 7.21 (o.l.) und 7.22 (o.r.): Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für e1\_RS18\_tief-2**

c) Endstabilisierung

- I. Die allgemeinen Feststellungen aus der Ringspaltuntersuchung zum Effekt der Endstabilisierung gelten hier analog (vgl. Abschnitt 7.4.5.2).
- II. Die Versuche e1\_RS18\_tief zeigen den Effekt der Endstabilisierung in stetiger, völlig gleichmäßiger Form.

### 7.5.5 Zusammenfassung

*(Querdehnungsversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_RS18\_tief)*

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Die Ergebnisse zeigen auf, dass senkrecht zur Dübellängsachse gerichtete, radiale Querdehnungen im Beton, die in besonders ausgeprägter Form im konzentrierten Lasteinleitungsbereich unmittelbar unterhalb der Abstützplatte der engen Abstützung zu erwarten sind, das Verschiebungsverhalten in nur geringem Maße beeinflussen haben können. In zwei von drei Versuchen ist in praktisch identischer Form ein vergleichsweise geringfügig schnellerer, im dritten Versuch ein geringfügig langsamerer Verschiebungsfortschritt zu erkennen. Die Ergebnisse unterstreichen somit die Ausnahmestellung der Vorversuche e1\_RS18\_VV, deren übermäßig schneller Verschiebungsfortschritt hierdurch nicht zu erklären ist (vgl. Abschnitt 7.4.5.2).
- b) Die Versuche e1\_RS18\_tief stellen einen wichtigen Indikator für die Qualität und damit die Verlässlichkeit der Ergebnisse dar, die mit den Versuchseinrichtungen am IWB erzielt werden können. Die nahezu perfekte Reproduktion der Verschiebungskurven zeigt auf, dass innerhalb einer Serie auftretende Verhaltensabweichungen im Regelfall nicht auf versuchstechnische Einflüsse zurückzuführen sind.

### 7.5.6 Ausblick

Ein Einfluss der Steifigkeit des Ankergrundes konnte als Ursache für die außergewöhnliche Ausprägung des Verschiebungsverhaltens der Vorversuche e1\_RS18\_VV nicht bestätigt werden. Es ist zudem weiterhin nicht geklärt, ob dieses Verschiebungsverhalten überhaupt durch eine Beeinflussung der Verbundfestigkeit erfolgt sein kann. Das Dübel-system soll nachfolgend daraufhin untersucht werden, welcher Anteil an der Verschiebungscharakteristik auf die Qualität der Verbundausbildung zurückgeführt werden kann.

## 7.6 V3 – SiS-Versuche (Stahl-in-Stahl)

### 7.6.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung

In den Vorversuchen e1\_RS18\_VV zu der Ringspaltuntersuchung in Kapitel 7.4 hat sich ein Systemverhalten gezeigt, das sich signifikant von denjenigen der übrigen Ringspaltversuche unterscheidet. Eine Ursache hierfür konnte im Rahmen der bislang durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Gemäß dem im Anschluss an die Querdehnungsuntersuchung gemachten Ausblick soll das Ziel der folgenden Versuche darin bestehen, denjenigen Anteil an der Verschiebungscharakteristik zu identifizieren, der tatsächlich auf die Qualität der Verbundausbildung zurückgeführt werden kann.

### 7.6.2 Ansatz

Es wird angenommen, dass der Beton junger Versuchskörper Eigenschaften aufweist, welche die Verbundfestigkeit negativ beeinflussen und die Tragfähigkeit, insbesondere unter dauerhafter Lasteinwirkung, signifikant reduzieren können (vgl. Standzeitversuche in Kapitel 6). Diese Eigenschaften zeigen eine Abhängigkeit vom Betonalter und scheinen mit dessen Zunahme weniger ausgeprägt zu sein. Um deren Anteil an der Verschiebungscharakteristik unter dauerhafter Lasteinwirkung identifizieren und ihren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit bewerten zu können, muss die Verschiebungscharakteristik des reinen Mörtelkriechens, die der Gesamtverschiebungscharakteristik überlagert ist, bekannt sein. Es wurde daher ein Versuchsansatz gewählt, bei dem der Betoneinfluss zunächst vollständig eliminiert ist, um das Kriechverhalten des Mörtels isoliert ermitteln zu können. Zu diesem Zweck wurden als Ersatz für die Standardversuchskörper aus Beton spezielle Versuchskörper aus Stahl entwickelt, die über ein Innenfeingewinde als Ankergrund verfügen (vgl. Kapitel 5, Abbildung 5.2). Die Kraftübertragung aus dem Verbundmörtel in den Stahlkörper ist somit über die gesamte Einbindetiefe durch Formschluss sichergestellt, vergleichbar der Lasteinleitung aus der Gewindestange in den Verbundmörtel. Einflüsse aus unterschiedlichen Verbundqualitäten zwischen Verbundmörtel und Ankergrund entlang der Einbindetiefe sind somit ausgeschlossen.

### 7.6.3 Versuchsparameter

Für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung gelten die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Innendurchmesser Innenfeingewinde in Kurzzeitversuchen: 14 mm (M15/1)
- b) Innendurchmesser Innenfeingewinde in Langzeitversuchen: 14 mm (M15/1), 15 mm (M16/1) und 19 mm (M20/1)
- c) Einbindetiefe Kurzzeitversuche:  $h_{ef}$  = variabel
- d) Einbindetiefe Langzeitversuche:  $h_{ef}$  = 80 mm
- e) Prüftemperatur:  $T = 43^{\circ}\text{C}$

### 7.6.4 Programm

#### 7.6.4.1 Kurzzeitversuche

Die Kurzzeitversuche dienen nicht der Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$ , sondern der Verschiebungscharakteristik. Es soll ermittelt werden, auf welchem Lastniveau die erste Strukturschädigung im Bereich des Übergangs von der Gewindestange zur Mörtelschale auftritt. Hieraus soll abgeleitet werden, ob der in den Standzeitversuchen beobachtete

„Switch-Effekt“ (vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.5) eindeutig einem Versagen entlang der Verbundfläche zugeschrieben werden kann. Für die Standardeinbindetiefe von  $h_{ef} = 80$  mm ist hier immer Stahlversagen zu erwarten. Aus diesem Grund wurde das Verschiebungsverhalten an verschiedenen geringeren Einbindetiefen ermittelt und hieraus auf ein Verschiebungsverhalten bei Standardeinbindetiefe geschlossen.

EPOXY 1 / SiS-Versuche						
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	T [°C]	Anz.
1	e1_RS14_SiS_N <sub>u,m</sub>	34	14	1,0	43	3
2		45				
3		55				
4		66				

**Tabelle 7.6:** Übersicht, SiS-Kurzzeitversuche

#### 7.6.4.2 Langzeitversuche

Die Lastniveaus der Langzeitversuche wurden frei gewählt. Versuche mit einem Standardringspaltmaß (e1\_RS14\_SiS\_N<sub>u,m</sub>) wurden auf drei verschiedenen Laststufen durchgeführt. Die übrigen Versuche nur auf der untersten Laststufe davon.

EPOXY 1 / SiS-Versuche							
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	T [°C]	Last [kN]	Anz.
1	e1_RS14_SiS	80	14	1,0	43	50,0	3
2						70,0	
3						80,0	
4	e1_RS15_SiS		15	1,5		50,0	
5	e1_RS19_SiS		19	3,5			

**Tabelle 7.7:** Übersicht, SiS-Langzeitversuche

## 7.6.5 Ergebnisse

### 7.6.5.1 Analyse Kurzzeitversuche

(SiS-Versuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_RS14\_SiS\_N<sub>u,m</sub>)

Das Diagramm 7.23 zeigt die Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche (Referenzversuche) zur Bestimmung der Verschiebungscharakteristik.

EPOXY 1 / SiS-Versuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	h <sub>ef</sub> [mm]	d <sub>nom</sub> [mm]	RS [mm]	T [°C]	N <sub>u,i</sub> [kN]	N <sub>u,m</sub> [kN]	v [%]
1	e1_RS14_SiS_N <sub>u,m</sub>	1	34	14	1,0	43	62,4	61,3	2,87
		2					59,3		
		3					62,3		
2		1	45				76,5	77,7	5,94
		2					82,8		
		3					73,8		
3		1	55				97,0	98,0	1,45
		2					97,3		
		3					99,6		
4		1	66				104,2	-	-
		2					103,8		
		3					105,5		

\* Abbruch vor Stahlversagen

**Tabelle 7.8:** Einzelfestigkeiten, SiS-Versuche

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- Sämtliche Versuche versagten entlang der Mantelfläche der Gewindestange (Versagensmodus „P“ nach ETAG).
- Verschiebungscharakteristik

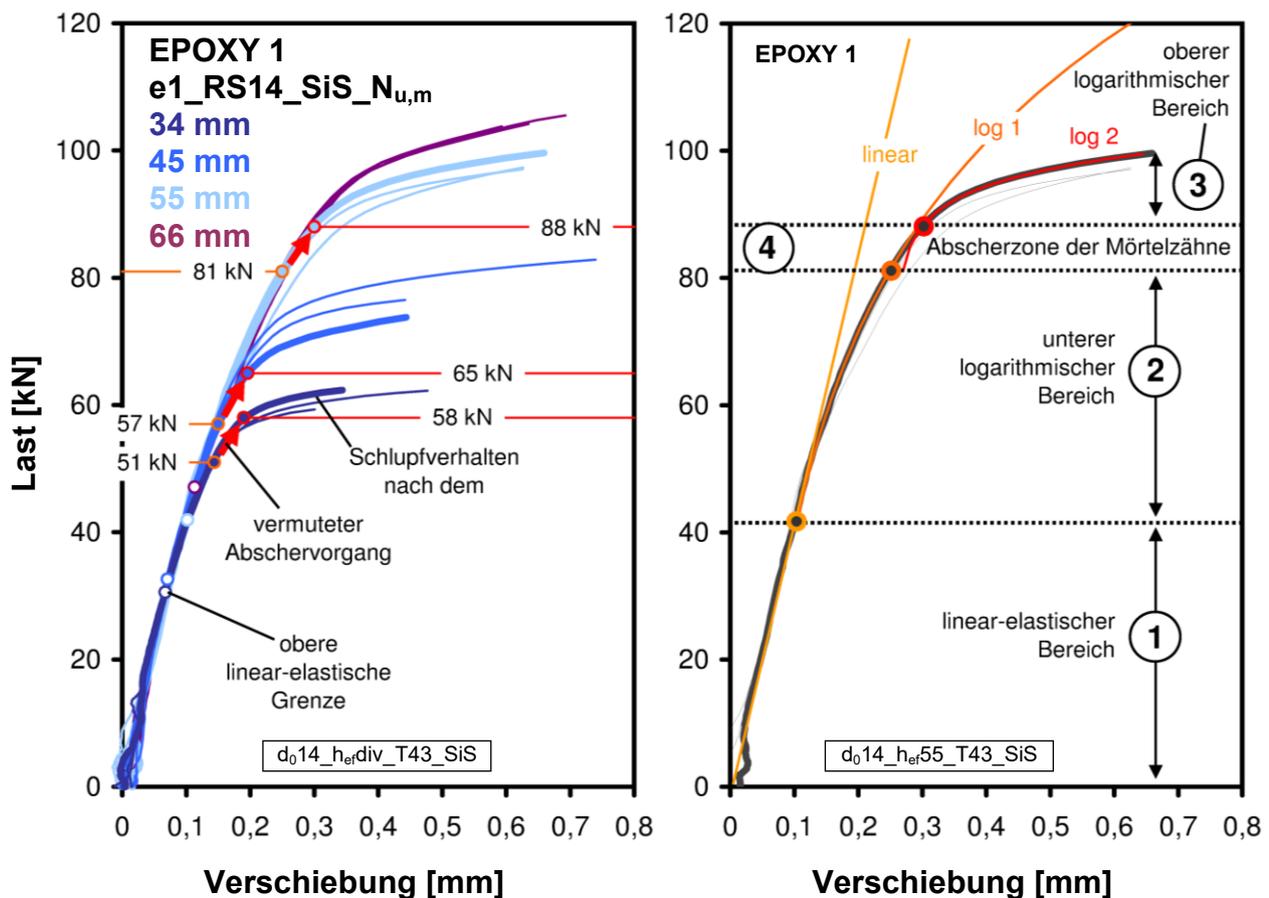
I. Diagramm 7.24 zeigt exemplarisch die für das Verhalten sämtlicher Versuche typische Last-Verschiebungskurve des Versuchs e1\_RS14\_SiS\_55 (Einbindetiefe h<sub>ef</sub> = 55 mm). Die Kurve kann in sehr guter Näherung in 4 Lastbereiche unterteilt werden. Lastbereich 1 zeigt ein linear-elastisches Verhalten. An der oberen elastischen Grenzlast schließt sich unmittelbar Lastbereich 2 an mit einem logarithmischen Verschiebungsverlauf (log 1). Ein zweiter logarithmischer Verlauf beschreibt in Lastbereich 3 das Last-Verschiebungsverhalten bis zum Bruch (log 2). Die Lastbereiche 2 und 3 folgen dabei nicht direkt aufeinander. Vielmehr gibt es mit Lastbereich 4 einen Übergangsbereich, der beide logarithmischen Teilabschnitte miteinander verbindet. Der Kurvenverlauf legt nahe, dass der Versagensmechanismus (Abscheren der Mörtelzähne) am Ende von Bereich 1 bzw. am Anfang von Bereich 2 beginnt und mit Ende des Übergangsbereichs 4 vollständig durchlaufen ist, da unmittelbar im Anschluss die Verschiebungen extrem zunehmen.

II. Die Versuche mit einer Einbindetiefe von h<sub>ef</sub> = 66 mm müssen vernachlässigt werden, da hierbei die Streckgrenze der Gewindestange noch vor dem Abscheren der Mörtelzähne überschritten wurde. Die roten Pfeile markieren den anzunehmenden Zeitpunkt des vollständigen Abscherens der Mörtelzähne (Übergangsbereich 4). Zudem sind jeweils die Punkte markiert, ab denen der Übergang vom linear-elastischen zum ersten logarithmischen Verhalten erfolgt (Übergang Lastbe-

reich 1 zu 2), also ab dem mit einer Schädigung der Mörtelzähne zu rechnen ist. Wie erwartet ist zu erkennen, dass sich beide Kennzeichen mit zunehmender Einbindetiefe zu höheren Lastniveaus hin verschieben.

III. Die obere linear-elastische Grenze befindet sich bei den Versuchen e1\_RS14\_SiS\_N<sub>u,m</sub>66 auf einem Lastniveau von ca. 47 kN und übersteigt damit bereits das Lastniveau der „Switch-Last“ der Standzeitversuche e1\_base (vgl. Kapitel 6) mit der Standardeinbindetiefe  $h_{ef} = 80$  mm, die bei ca. 40 kN festgestellt werden kann. Mit weiter steigender Einbindetiefe ist diese Grenze zudem auf noch höherem Niveau zu erwarten. Der „Switch-Effekt“ nach Kapitel 6 ist demnach bei Epoxy 1 nicht auf ein Versagen am Übergang von der Gewindestange zur Mörtelschale zurückzuführen, sondern auf ein Versagen innerhalb der Verbundzone zwischen Mörtelschale und Beton.

IV. Die Anfangssteifigkeit der Versuche e1\_RS14\_SiS\_66 müsste annähernd doppelt so groß sein wie diejenige der Versuche e1\_RS14\_SiS\_34, da die Einbindetiefe und damit die Systemsteifigkeit annähernd doppelt so groß ist. Dies ist hier offensichtlich nicht der Fall. Es ist anzunehmen, dass dies auf eine unterschiedliche Dehnungsverteilung entlang der Einbindetiefe zurückzuführen ist. Dies stellt eine grundsätzliche Erschwernis beim Vergleich des Verschiebungsverhaltens unterschiedlicher Einbindetiefen dar.



**Diagramm 7.23 (links) und 7.24:** Last-Verschiebungs-Kurven der kurzzeitigen, zentralen Zugversuche mit Epoxy 1 in Stahlkörpern (SiS-Versuche)

### 7.6.5.2 Analyse Langzeitversuche

(SiS-Versuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_RS14\_SiS, e1\_RS15\_SiS, e1\_RS19\_SiS)

#### 7.6.5.2.1 Anfangsverschiebungen

In Diagramm 7.25 sind die Anfangsverschiebungen der SiS-Versuche dargestellt. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte ab der zweiten Versuchsminute nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca. 15-sekündigen Belastungsvorganges.

EPOXY 1 / SiS-Versuche													
Serie [Nr.]	Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	T [°C]	Last [kN]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]				
1	e1_RS14_SiS	1	80	14	1,0	43	50	0,12	0,11				
		2						0,11					
		3						0,10					
2		1					1	80	14	1,0	70	0,23	0,22
							2					0,21	
							3					0,24	
3		1					1	80	14	1,0	80	0,32	0,32
							2					0,30	
							3					0,33	
4	e1_RS15_SiS	1	80	15	1,5	50	0,13	0,12					
		2					0,11						
		3					0,11						
5	e1_RS19_SiS	1	80	19	3,5	50	0,12	0,12					
		2					0,11						
		3					0,13						

**Tabelle 7.9:** Anfangsverschiebungen, SiS-Versuche

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Streuung

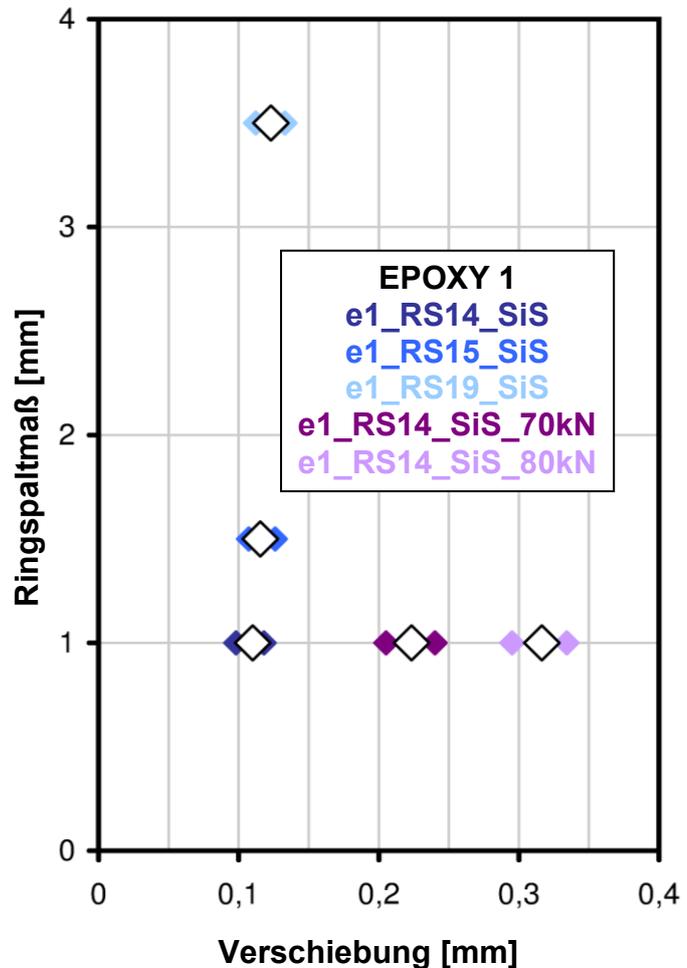
Obwohl die Anfangsverschiebungen durch Rückwärtsextrapolation ermittelt wurden, sind diese bei sämtlichen drei Ringspalten auf dem Lastniveau von 50 kN gering. Der Vergleich mit den Streuungen der als sicher vorgeschädigt geltenden, hoch belasteten

Versuche  $e1\_RS14\_SiS\_70$  und  $e1\_RS14\_SiS\_80$  stützt die Annahme, dass auf diesem untersten Lastniveau noch keine signifikante Schädigung des Systems vorliegt.

b) Anfangsverschiebungen

I. Wie schon bei Versuchen in Beton sind die ermittelten Anfangsverschiebungen verschiedener Ringspaltmaße bei identischer Last (50 kN) nicht annähernd proportional zum Ringspaltmaß (siehe hierzu Erläuterung Abschnitt 7.4.5.1 / b) / I.). Vielmehr ist zu erkennen, dass die Verschiebungen für sämtliche drei Ringspaltmaße annähernd gleich groß sind. Zwar ist grundsätzlich auch bei den Versuchen in Stahlkörpern damit zu rechnen, dass die Verbunddübelssysteme während des Belastungsvorgangs umso mehr vorgeschädigt werden, je kleiner das Ringspaltmaß ist, da die schädigenden Spannungsspitzen, die sich aus unterschiedlichen Dehnungszuständen der Gewindestange und des Betons ergeben, dann umso ausgeprägter sind. Jedoch sprechen sowohl die geringen Streuungen als auch der Umstand, dass das Verschiebungsverhalten der kurzzeitigen Bruchversuche für die Standardeinbindetiefe  $h_{ef} = 80$  mm tatsächlich Verschiebungen in dem hier beobachteten Ausmaß erwarten lassen, gegen eine Vorschädigung. Die Annahme aus Punkt IV der Erläuterungen zur Verschiebungscharakteristik der Kurzzeitversuche gilt hier analog als mögliche Erklärung (vgl. Abschnitt 7.6.5.1 / b) / IV.).

II. Die Anfangsverschiebungen der hochbelasteten Dauerlastversuche  $e1\_RS14\_SiS\_70$  und  $e1\_RS14\_SiS\_80$  übertreffen die aus den Ergebnissen der kurzzeitigen Bruchversuche zu erwartenden Verschiebungswerte. Da die Anfangsverschiebungen durch Rückwärtsextrapolation der Verschiebungen ermittelt wurden, muss von einer übermäßigen Verschiebung innerhalb der ersten zwei Versuchsminuten ausgegangen werden, was auf eine Vorschädigung schließen lässt. In ähnlicher Form kann ein solches Verhalten bei den Baseline-Versuchen mit Epoxy 1 beobachtet werden. Zurückgeführt wird der Unterschied zwischen gemessener und durch Extrapolation ermittelter Verschiebung auf eine „Trägheit“ des Versa-



**Diagramm 7.25:** Anfangsverschiebungen der SiS-Versuche mit Epoxy 1

gensmechanismus (siehe Kapitel 6, Abschnitt 6.2.5.2.2 / b) / IV.). Die Erläuterungen hierzu können sinngemäß übertragen werden.

### 7.6.5.2.2 Kurvenverläufe

Die Diagramme 7.26 und 7.27 zeigen die Verschiebungskurven sämtlicher SiS-Versuche im einfach-logarithmischen und doppelt-logarithmischen Maßstab. Bezüglich der Kurvenverläufe kann Folgendes festgestellt werden:

#### a) Teilverschiebungscharakteristik

I. Die allgemeinen Feststellungen aus der Ringspaltuntersuchung zur Ausbildung der Teilverschiebungscharakteristik (siehe Diagramme 7.28, 7.30, 7.32, 7.34 und 7.36) gelten hier analog (vgl. Abschnitt 7.4.5.2 / b) / I.).

II. Die Teilverschiebungsabschnitte sind deutlich weniger ausgeprägt als bei Versuchen in Beton. Die Diagramme 7.38 und 7.39 zeigen jeweils eine Gegenüberstellung von Versuchen mit Versuchskörpern aus Beton und Versuchskörpern aus Stahl für ein Ringspaltmaß von 1 mm (Standard) und 3 bzw. 3,5 mm. Es ist anzunehmen, dass der Schädigungsfortschritt je Stufe bei Versuchen in Stahl deutlich geringer ist als bei Versuchen in Beton und zudem seltener auftritt.

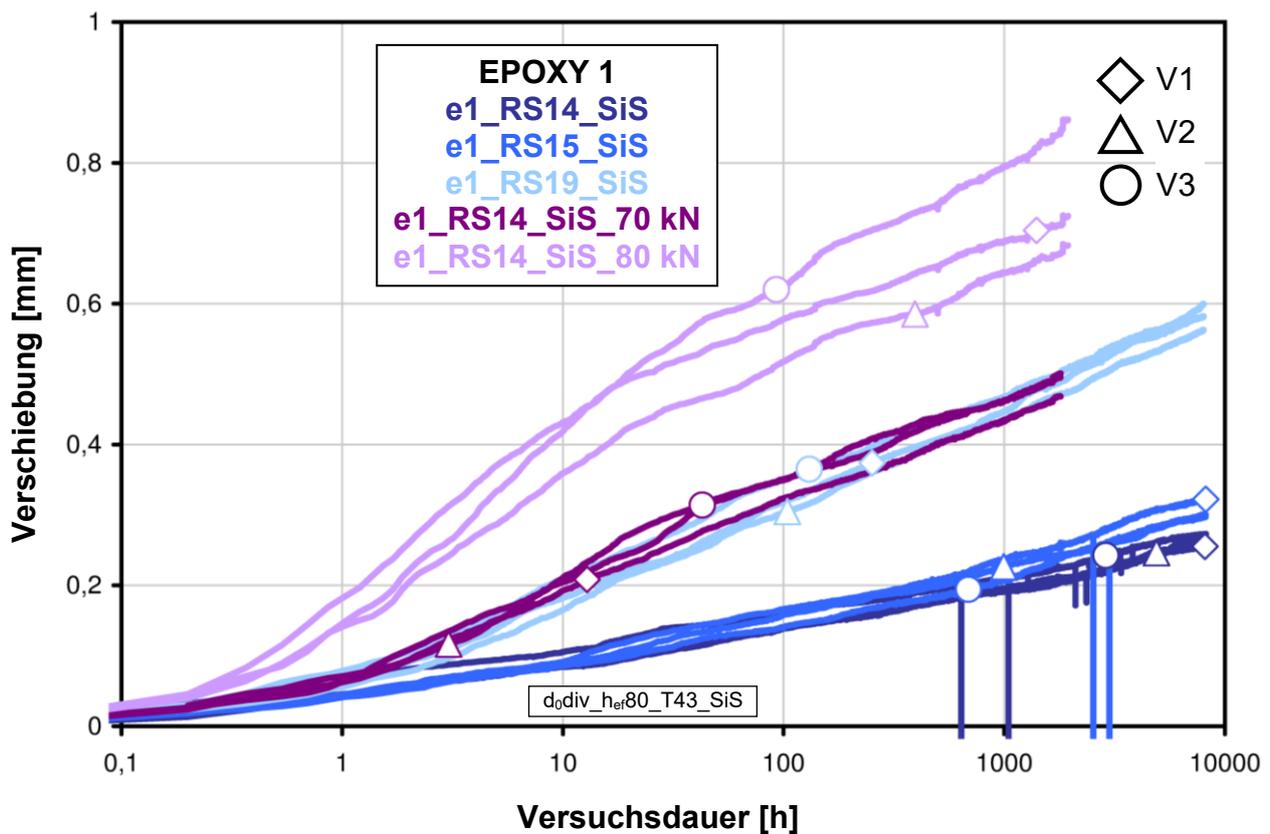
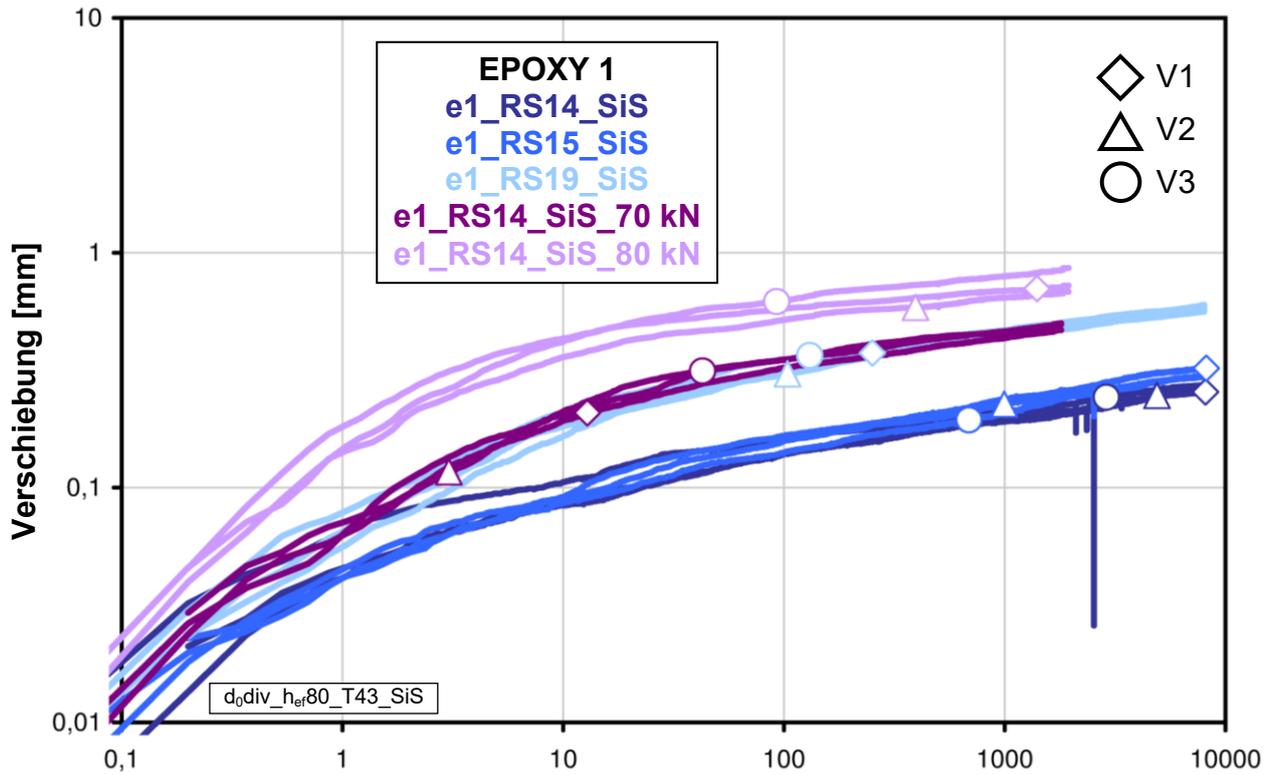
#### b) Gesamtverschiebungscharakteristik

I. Spätestens ab der ca. 100. Versuchsstunde kann die Gesamtverschiebungscharakteristik generell durch eine Potenzfunktion beschrieben werden (siehe Diagramme 7.29, 7.31, 7.33, 7.35 und 7.37).

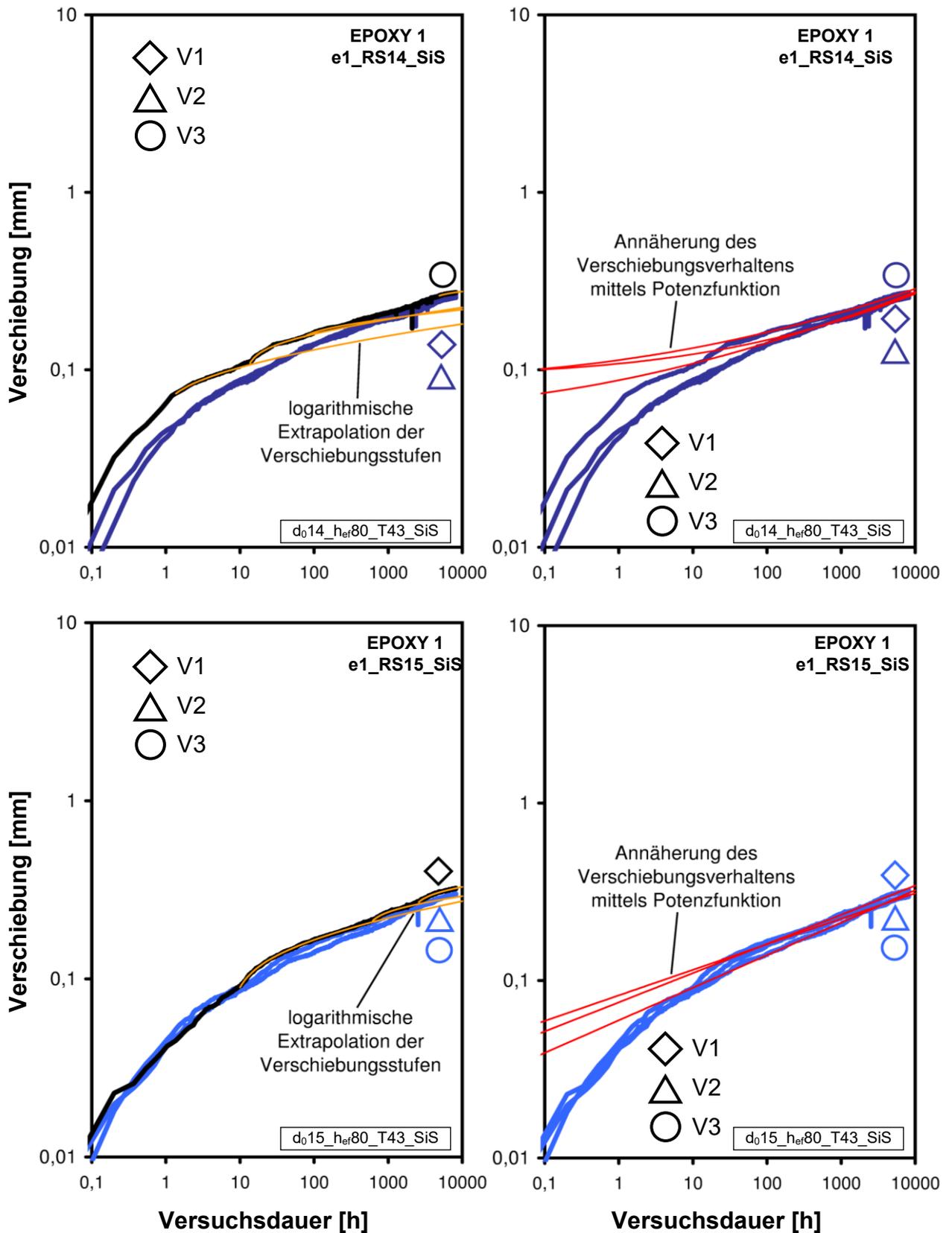
II. Die Verschiebungskurven der hoch belasteten Versuche e1\_RS14\_SiS\_70 und insbesondere e1\_RS14\_SiS\_80 zeigen wie erwartet ein deutlich progressiveres Verschiebungsverhalten (siehe Diagramme 7.35 und 7.37). Zudem nimmt die Geschwindigkeit des Verschiebungsfortschritts gegenüber der Lastzunahme weit überproportional zu. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Verschiebungscharakteristik praktisch identisch derjenigen des niedrigsten Lastniveaus von 50 kN ist. Die Schädigungsmechanik erscheint hier grundsätzlich identisch ausgebildet, trotz der vergleichsweise sehr viel höheren Lasten.

#### c) Endstabilisierung

Bei keinem der SiS-Versuche kann eine Endstabilisierung festgestellt werden, wie dies bei Versuchen in Beton der Fall ist (vgl. Diagramm 7.1). Dies stützt die Vermutung, dass die großen Verschiebewege von Versuchen in Beton auf eine spezielle Art der Mörtelschädigung zurückzuführen ist (siehe Abschnitt 7.4.5.2 / e) / III.). Hierbei wird angenommen, dass der Mörtel, ausgehend von der Verbundzone zum Beton, in Richtung Gewindestange „erweicht“. Ein solches Verhalten ist bei form-schlüssiger Kraftübertragung (Gewinde zu Mörtel) nicht zu beobachten.

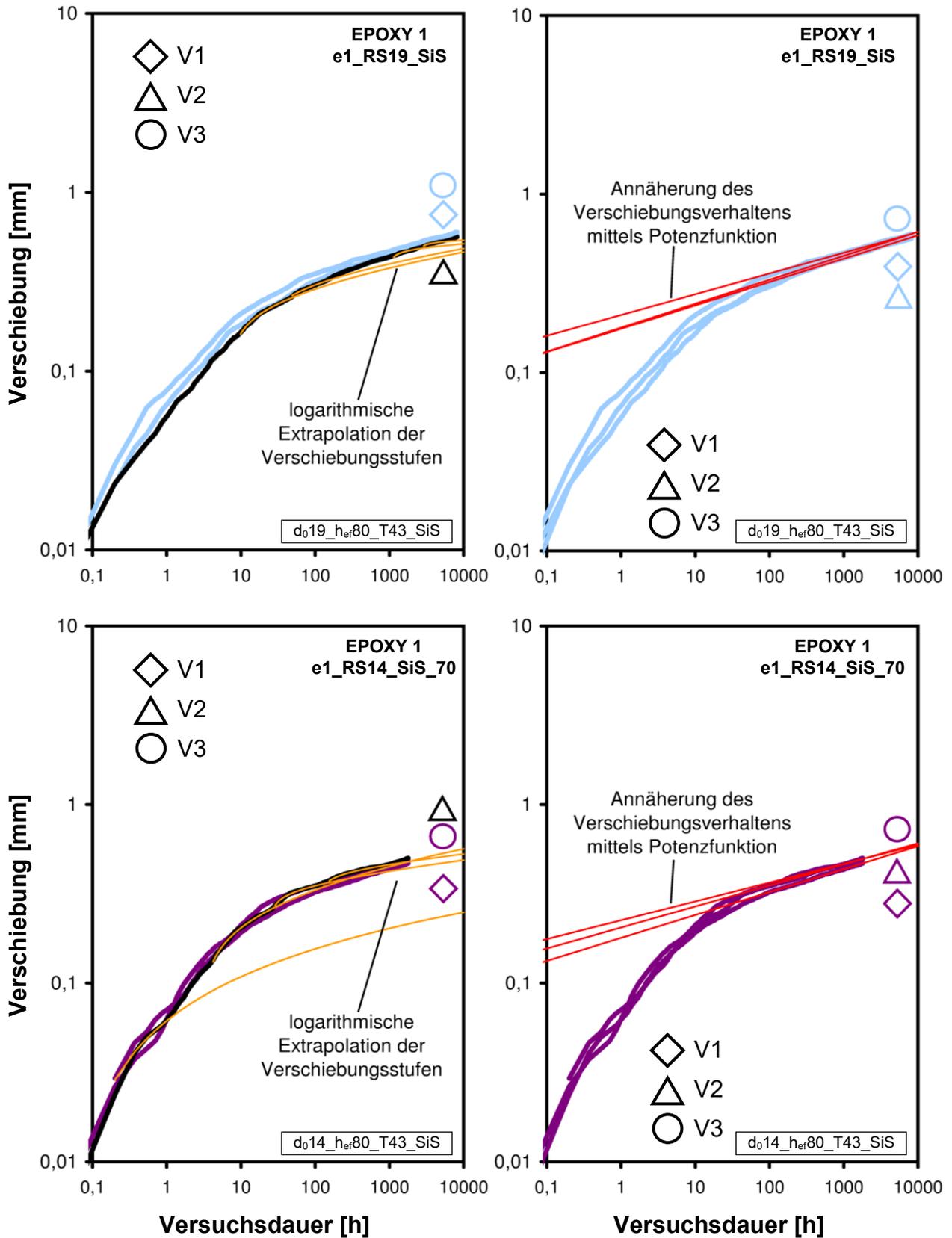


**Diagramm 7.26 (oben) und 7.27:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 in Stahlkörpern (SiS-Versuche) mit verschiedenen Ringspaltmaßen im doppelt-logarithmischen (oben) und einfach-logarithmischen Maßstab



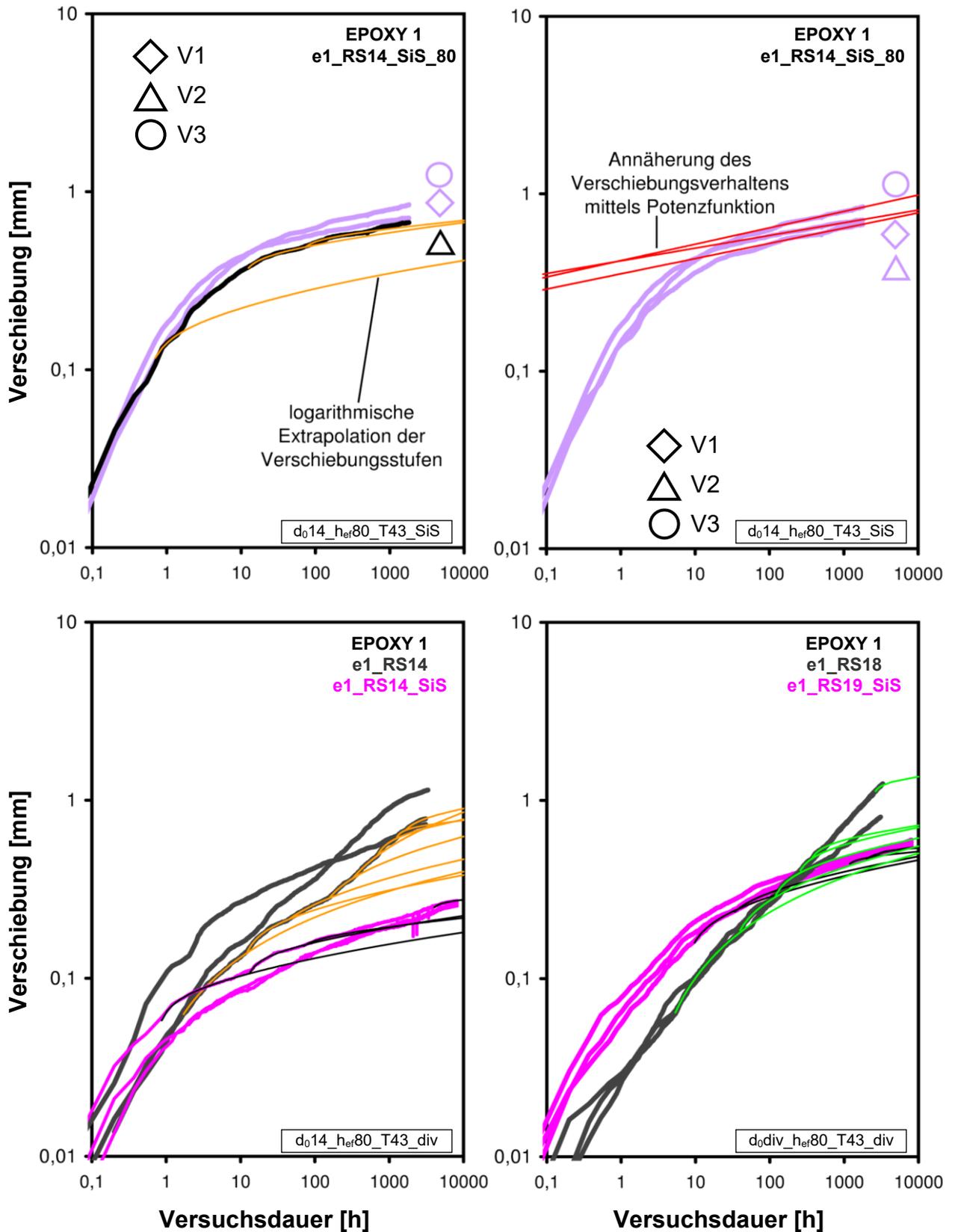
**Diagramm 7.28 (o.l.) und 7.29 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für RS14 SiS

**Diagramm 7.30 (u.l.) und 7.31 (u.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für RS15 SiS



**Diagramm 7.32 (o.l.) und 7.33 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für RS19\_SiS

**Diagramm 7.34 (u.l.) und 7.35 (u.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für RS14\_SiS bei 70 kN



**Diagramm 7.36 (o.l.) und 7.37 (o.r.):** Teilverschiebungscharakteristik (links) und Gesamtverschiebungscharakteristik für RS14\_SiS bei 80 kN

**Diagramm 7.38 (links) und 7.39:** Vergleich der Teilverschiebungscharakteristik von e1\_RS14 und e1\_RS14\_SiS (links) bzw. e1\_RS18 und e1\_RS19\_SiS

### 7.6.6 Zusammenfassung

(SiS-Versuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_RS14\_SiS\_N<sub>u,m</sub>, e1\_RS14\_SiS, e1\_RS15\_SiS, e1\_RS19\_SiS)

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Aus der isolierten Betrachtung des Dauerlastverhaltens von Epoxy 1 im SiS-Versuch ergibt sich, dass das logarithmische Teilverschiebungsverhalten eine Eigenschaft des Mörtels ist und nicht auf eine Eigenschaft des Verbundes zurückgeführt werden kann. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die sehr großen Verformungen der Versuche in Beton eine verbundspezifische Ausprägung des Verschiebungsverhaltens unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung darstellt. Unklar ist, ob hierdurch der Tragwiderstand der Mörtelsubstanz selbst gegenüber dauerhafter Lasteinwirkung zunehmend beeinträchtigt wird. Der Umstand, dass nach Abschluss der Endstabilisierungsphase bei keinem der durchgeführten Versuche ohne Versagen auch nur ein Anzeichen für ein nahendes Versagen zu erkennen ist, lässt dies jedoch unwahrscheinlich erscheinen.
- b) Der in den Standzeitversuchen beobachtete und für die Dauerhaftigkeit der epoxidharzbasierten Verbunddübelssysteme maßgebliche „Switch-Effekt“ ist nicht beeinflusst von der Grenzzone zwischen Gewindestange und Verbundmörtel. Selbst auf Lastniveaus, die annähernd dem Doppelten der „Switch-Last“ entsprechen, findet in SiS-Versuchen kein vergleichbarer Wechsel im Standzeitverhalten statt. Der im Dauerlastversuch maßgebliche Versagensmechanismus muss demnach in der Grenzfläche zwischen Verbundmörtel und Beton liegen.
- c) Die Last-Verschiebungskurven im kurzzeitigen Bruchversuch weisen eine eindeutig definierte Verschiebungs- und Versagenscharakteristik auf. Diese besteht aus einer Aneinanderreihung eines linearen Verschiebungsabschnitts zu Beginn und zweier logarithmischer Verschiebungsabschnitte, die durch einen lastmäßig kleinen, der Form nach undefinierten Übergangsbereich voneinander getrennt sind. Die Verschiebungskurven lassen klar erkennen, dass sich der ungeschädigte, linear-elastische Bereich nur bis ca. 0,4 N<sub>u, SiS</sub> erstreckt. Danach ist bereits mit einer Schädigung der Grenzzone zwischen Gewindestange und Mörtel zu rechnen. Auf die Standzeitversuche in Betonkörpern mit Standardeinbindetiefe bezogen (vgl. Kapitel 6.2) bedeutet dies eine beginnende Schädigung dieser Zone ab einer Last von ca. 50 kN, wobei über mögliche Auswirkungen auf das Standzeitverhalten keine Aussagen gemacht werden können.

### 7.6.7 Ausblick

Die SiS-Versuche dienten dazu, das Kriech- bzw. Verschiebungsverhalten des Dübel-systems zu ermitteln, ohne eine Beeinflussung durch einen ggf. gestörten Verbund zwischen Verbundmörtel und Beton. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Dauerhaftigkeit der getesteten epoxidharzbasierten Verbunddübelssysteme eindeutig durch die Verbundqualität zwischen Mörtel und Beton bestimmt ist. Als Ursache für die außergewöhnliche Ausprägung des Verschiebungsverhaltens der Vorversuche e1\_RS18\_VV kann somit eine Verbundschwäche angenommen werden. Nachfolgend soll untersucht werden, welcher Einfluss auf den Verbund eine derartige Schwächung hervorrufen kann und wie hierdurch ggf. die für die Dauerhaftigkeit maßgebliche „Switch-Last“ beeinflusst ist.

## 7.7 V4 – Feuchteversuche mit Epoxy 1

### 7.7.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung

Die Ergebnisse der SiS-Versuche zeigen einen signifikanten Unterschied im Verschiebungsverhalten unter Dauerlasten gegenüber Versuchen in Beton auf. Dieser wird darauf zurückgeführt, dass wegen des Innengewindes der Stahlkörper eine Verbindung konstanter Qualität über die gesamte Einbindetiefe existiert, wohingegen bei Versuchen in Beton nicht sichergestellt ist, dass die Verbundqualität und damit die Verbundfestigkeit entlang der Einbindetiefe konstant sind. In [38] wird angenommen, dass das Last-Verschiebungsverhalten von epoxidharzbasierten Mörteln im Kurzzeitversuch vom Austrocknungszustand der Versuchskörper abhängig ist. Es steht daher zu vermuten, dass dies für das Verschiebungsverhalten unter dauerhafter Lasteinwirkung ebenso zutrifft. Das Ziel der nachfolgenden Versuche ist es zu überprüfen, ob und ggf. in welchem Umfang Feuchte im Beton den Verbund epoxidharzbasierter Verbunddübel beeinflusst.

### 7.7.2 Ansatz

Der exakte Trocknungszustand der verwendeten Betonkörper lässt sich nicht zerstörungsfrei ermitteln. Um einen Vergleich zwischen feuchtem und trockenem Beton zu ermöglichen, wurden die maßgeblichen Versuche mit Versuchskörpern einer Charge durchgeführt, die über einen Zeitraum von mehr als 2,5 Jahren im Laborgebäude des IWB offen gelagert wurde und hierdurch einen vergleichbar hohen Austrocknungsgrad aufwies wie die Versuchskörper der Standzeitversuche e1\_base zum Zeitpunkt der Durchführung der Ringspaltversuche e1\_RS13, e1\_RS14 und e1\_RS18. Für Versuche mit Feuchteinfluss wurden diese Versuchskörper nach dem Bohren und Reinigen oder nach dem Setzen des Dübels (wenn explizit vermerkt) verschiedenen Feuchtebedingungen unterzogen, die aus definierten Wässerungs- und Trocknungsphasen bestanden. Die Dauer der Trocknungsphase vor dem Setzen wurde dabei so gewählt, dass Oberflächenwasser entlang der Bohrlochwand und damit eine mögliche Verbundbehinderung durch einen Wasserfilm zwischen Mörtel und Betonoberfläche sicher ausgeschlossen werden konnte. Feuchtigkeit konnte somit nur in Form von Wasserdampf auf das Dübelssystem einwirken.

### 7.7.3 Versuchsparameter

Sofern in den nachfolgend aufgeführten Versuchsprogrammen nicht anders angegeben, gelten für die Anker, die Versuchskörper und die Ausbildung der Abstützung die Standards der Versuchsdurchführung nach Kapitel 5. Eine Gesamtübersicht sämtlicher Versuchsparameter findet sich im Anhang.

Hauptparameter:

- a) Bohrlochdurchmesser:  $d_{\text{nom}} = 14 \text{ mm}$  (Bohrereckmaß entsprechend  $d_{\text{cut,m}}$ )
- b) Einbindetiefe:  $h_{\text{ef}} = 80 \text{ mm}$
- c) Prüftemperatur:  $T = 43^\circ\text{C}$

Details zur Feuchtebehandlung sowie zu relevanten Zeiten (Wässerungsdauer, Aushärtedauer, etc.) sind dem jeweiligen Versuchsprogramm zu entnehmen.

## 7.7.4 Programm

### 7.7.4.1 Teilprogramm – Tastversuche mit zyklischer Belastung

Im Vorfeld der Untersuchungen zum Feuchteinfluss wurden in Summe drei Tastversuche mit zyklischer Belastung durchgeführt, die sich untereinander hinsichtlich ihrer Feuchtecondition unterschieden. Die Versuchskörper wurden vor der Konditionierung ca. 2,5 Jahre im Laborgebäude des IWB offen gelagert und konnten ungehindert austrocknen. Ziel der Versuche war es, erste Anhaltspunkte für eine Abhängigkeit der Verbundqualität von der Feuchtecondition zu ermitteln.

#### Versuchsvorbereitung:

Die Feuchteconditionierung, das Setzen und das Aufheizen erfolgten für die jeweilige Condition in folgenden Schritten:

- a) Condition 1
  - I. keine Feuchteconditionierung
  - II. Aushärten bei 20°C, Dauer: 24 h
  - III. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 24 h
- b) Condition 2
  - I. Lagerung unter Wasser bei ca. 20°C, Dauer: 96 h
  - II. Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 24 h
  - III. Aushärten bei 20°C, Dauer: 24 h
  - IV. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 24 h
- c) Condition 3
  - I. nach dem Setzen, Lagerung im Hallenklima bei ca. 17°C, mit 40% rel. Luftfeuchte, Dauer: 5 h (minimale Aushärtezeit)
  - II. Wässerung des Gesamtsystems bei ca. 20°C, Dauer: 24 h
  - III. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 24 h

#### Versuchsablauf:

Die Dübel wurden jeweils mehrmals in Folge be- und entlastet. In den Belastungsphasen wurde die Last jeweils soweit gesteigert, bis ein erkennbarer Steifigkeitsverlust des Systems zu beobachten war. Danach erfolgte eine schnelle Entlastung.

EPOXY 1 / Feuchteversuche									
Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Körp.	Beton	Abst.	T [°C]	FK	Anz.
e1_FE_zyl_SL_tast	1	80	14	Zyl.	C20/25	eng	43	K1	1
	2							K2	
	3							K3	

**Tabelle 7.10:** Übersicht, zyklische Tastversuche

### 7.7.4.2 Teilprogramm – Versuche mit zyklischer Belastung

Zur Untermauerung der Ergebnisse der Tastversuche wurden drei Versuchsserien mit zyklischer Belastung durchgeführt, die sich untereinander hinsichtlich ihrer Feuchtebedingungen unterschieden. Die Versuchskörper wurden vor der Konditionierung ca. 2,5 Jahre im Laborgebäude des IWB offen gelagert und konnten ungehindert austrocknen. Für die Versuche wurden hochfeste Gewindestangen der Festigkeitsklasse 14.9 verwendet, um auf den angestrebten Höchstlastniveaus ein Erreichen der Streckgrenze während des Versuchs auszuschließen.

#### Versuchsvorbereitung:

Die Feuchteconditionierung, das Setzen und das Aufheizen erfolgten für die jeweilige Kondition in folgenden Schritten:

- a) Kondition 1
  - I. keine Feuchteconditionierung
  - II. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 24 h
  - III. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- b) Kondition 2
  - I. Lagerung unter Wasser bei 20°C, Dauer: 48 h
  - II. Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 4 h
  - III. Weitertrocknung im Hallenklima bei ca. 17°C, und 40% rel. Luftfeuchte, Dauer: 4 h
  - IV. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 24 h
  - V. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- c) Kondition 3
  - I. Lagerung unter Wasser bei 20°C, Dauer: 48 h
  - II. Trocknung im Hallenklima bei ca. 17°C, und 40% rel. Luftfeuchte, Dauer: 18 Tage
  - III. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 24 h
  - IV. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h

#### Versuchsablauf:

Die Dübel wurden jeweils mehrmals in Folge be- und entlastet. In den Belastungsphasen wurde die Last jeweils soweit gesteigert, bis ein erkennbarer Steifigkeitsverlust des Systems zu beobachten war. Danach erfolgte eine schnelle Entlastung.

EPOXY 1 / Feuchteversuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Körp.	Beton	Abst.	T [°C]	FK	Anz.
1	e1_FE_zyl_SL	80	14	Zyl.	C20/25	eng	43	K1	3
2								K2	
3								K3	

**Tabelle 7.11:** Übersicht, zyklische Versuche

### 7.7.4.3 Teilprogramm – Kurzzeitversuche

Es wurden zwei Reihen von kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen durchgeführt. Ziel der ersten Reihe mit vier Versuchsserien, durchgeführt in Betonwürfeln, war eine Überprüfung, ob die Temperatur während des Aushärtens einen zusätzlichen Einfluss auf eine feuchtebedingte Verbundschwächung hat. Die Betonwürfel lagerten zuvor

ca. 2,5 Jahre im Laborgebäude in gleicher Weise wie die Standardversuchskörper. Ziel der zweiten Reihe von Serien mit kurzzeitigen, zentrischen Zugversuchen, durchgeführt in Standardversuchskörpern, war die Ermittlung der Abhängigkeit der Bruchfestigkeiten von den Feuchtebedingungen.

Die Versuche erfolgten mit einer reduzierten Einbindetiefe von  $h_{ef} = 50$  mm.

### **Versuchsvorbereitung:**

Die Feuchteconditionierung, das Setzen und das Aufheizen erfolgten für die jeweilige Kondition in folgenden Schritten:

Versuche zum Temperatureinfluss mit Betonwürfeln:

- a) Kondition 1
  - I. keine Feuchteconditionierung
  - II. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 6 Tage
  - III. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- b) Kondition 2
  - I. keine Feuchteconditionierung
  - II. Setzen und Aushärten bei 10°C, Dauer: 24 h
  - III. Weiterhärtung bei 20°C, Dauer: 5 Tage
  - IV. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- c) Kondition 3
  - I. Lagerung unter Wasser bei ca. 20°C, Dauer: 48 h
  - II. Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 96 h
  - III. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 6 Tage
  - IV. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- d) Kondition 4
  - I. Lagerung unter Wasser bei ca. 20°C, Dauer: 48 h
  - II. Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 96 h
  - III. Setzen und Aushärten bei 10°C, Dauer: 24 h
  - IV. Weiterhärtung bei 20°C, Dauer: 5 Tage
  - V. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 24 h

Versuche zur Bruchfestigkeit mit Standardversuchskörpern:

- a) Kondition 1
  - I. keine Feuchteconditionierung
  - II. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 9 h
  - III. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h
- b) Kondition 2
  - I. Lagerung unter Wasser bei ca. 20°C, Dauer: 48 h
  - II. Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 96 h
  - III. Setzen und Aushärten bei 20°C, Dauer: 9 h
  - IV. Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 18 h

**Versuchsablauf:**

Es handelt sich um übliche zentrische Zugversuche bis zum Bruch unter Anwendung einer engen Abstützung.

EPOXY 1 / Feuchteversuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Körp.	Beton	Abst.	T [°C]	FK	Anz.
1	e1_FE_würfel_N <sub>u,m</sub>	50	14	Würf.	C20/25	eng	43	K1	3
2								K2	
3								K3	
4								K4	

**Tabelle 7.12:** Übersicht, Kurzzeitversuche (Betonwürfel)

EPOXY 1 / Feuchteversuche									
Serie [Nr.]	Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Körp.	Beton	Abst.	T [°C]	FK	Anz.
1	e1_FE_zyl_N <sub>u,m</sub>	50	14	Zyl.	C20/25	eng	43	K1	3
2								K2	

**Tabelle 7.13:** Übersicht, Kurzzeitversuche (Betonzylinder)

**7.7.4.4 Teilprogramm – Langzeitversuche**

Es wurde eine Serie von feuchteconditionierten Dauerlastversuchen durchgeführt. Ziel war die Ermittlung des Einflusses der Feuchteconditionierung auf das Verschiebungsverhalten unter dauerhafter, zentrischer Zuglasteinwirkung. Die Vorbehandlung wurde so gewählt, dass zum Zeitpunkt des Setzens über die gesamte Einbindetiefe dieselbe Feuchteconditionierung im angrenzenden Porenraum des Betons herrschte. Hierbei sollte insbesondere vermieden werden, dass sich im Porenraum nahe dem Bohrlochmund eine geringere relative Luftfeuchte einstellen kann als in den tiefer liegenden Bohrlochabschnitten, indem zusätzlich eine Austrocknung über die Oberfläche des Versuchskörpers erfolgt.

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit den Dauerlastversuchen e1\_RS18\_VV, e1\_RS18 und e1\_RS18\_tief zu erreichen, wurde dasselbe Ringspaltmaß von 3 mm gewählt. Die Feuchteconditionierung, das Setzen und das Aufheizen erfolgten in folgenden Schritten:

- |             |      |  |
|-------------|------|--|
| Kondition 1 | I.   | Lagerung unter Wasser bei ca. 20°C, Dauer: 24 h  |
|             | II.  | Trocknung im Klimaschrank mit Ventilation bei 20°C, Dauer: 72 h  |
|             | III. | Lagerung in hermetisch verschlossenen Kunststofftüten bei 20°C, Dauer: 24 h  |
|             | IV.  | Injizieren des Mörtels und Setzen des Dübels durch ein kleines Loch in der Kunststofftüte, danach Entfernen der Kunststofftüte |
|             | V.   | Aushärten bei 20°C, Dauer: 168 h   |
|             | VI.  | Aufheizen bis zur Versuchsdurchführung, Dauer: 36 h  |

## Versuchsablauf:

Die Durchführung der Dauerlastversuche erfolgte gemäß den Standards der Versuchsdurchführung (vgl. Kapitel 5).

EPOXY 1 / Feuchteversuche										
Serienkennung	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	RS [mm]	Körp.	Beton	Abst.	T [°C]	FK	Last [kN]	Anz.
e1_FE_RS18	80	18	3	Zyl.	C20/25	eng	43	K1	50	3

**Tabelle 7.14:** Übersicht, Langzeitversuche

### 7.7.5 Teilergebnisse der Tastversuche

(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_zyl\_SL\_tast)

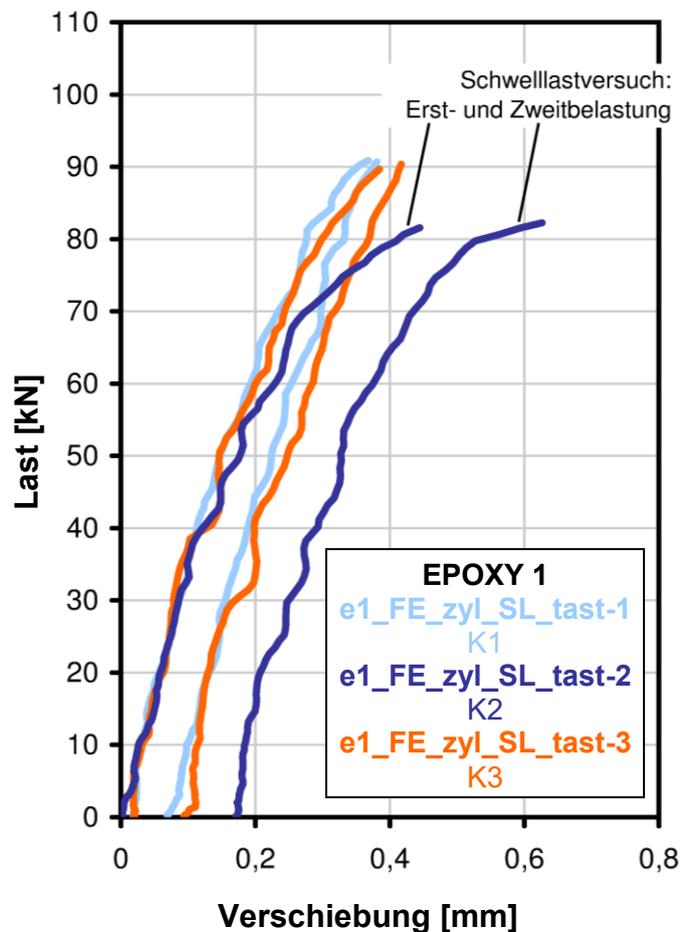
Die Absolutwerte der hier gemessenen Verschiebungen können nicht direkt mit denen anderer Versuche dieser Untersuchung verglichen werden, da die zu kompensierende Dehnung aus Dübelüberstand nicht bestimmt wurde. Diese Versuche dienen ausschließlich dem direkten Vergleich untereinander. Diagramm 7.40 zeigt die drei Tastversuche im direkten Vergleich. Dargestellt sind die Belastungsphasen der jeweils ersten beiden Lastzyklen. Es kann Folgendes festgestellt werden:

#### a) Höchstlastniveaus

Bei den Versuchen 1 und 3, die zum Setzzeitpunkt unbehandelt waren, konnte die Last bis nahe an die Streckgrenze der Gewindestange gesteigert werden, ohne dass ein signifikanter Steifigkeitsabfall eintrat. Es ist anzunehmen, dass die Last ohne diese Beschränkung noch weiter hätte gesteigert werden können. Der Verhaltensunterschied zu Versuch 2 ist entsprechend noch ausgeprägter anzunehmen, als dies aus dem Diagramm abzulesen ist.

#### b) Verschiebungscharakteristik

I. Der Versuche 2 mit feuchte-konditioniertem Versuchskörper zeigt während der Erstbelastungsphase, ab einer Last von ca. 70 kN, ein deutlich progressiveres Verschiebungsverhalten als die Versuche 1 und 3, die zum Setzzeitpunkt unbehandelt waren. Während die Systemsteifigkeiten der Versuche 1 und 3 nur geringfügig und zudem stetig abfallen, erfolgt bei Versuch 2 hierbei ein sprunghafter Steifigkeitsabfall auf weniger als die Hälfte der Ursprungssteifigkeit. Die verbliebene plastische Verformung zum Ende der ersten Entlastungsphase ist bei Versuche 2 annähernd



**Diagramm 7.40:** zyklische Tastversuche mit Epoxy 1

doppelt so groß wie bei den Versuchen 1 und 3. Entsprechend ist davon auszugehen, dass die Systemschädigung während des ersten Lastzyklus bei Versuch 2 unter Kondition 2 signifikant größer war, ohne dass hierbei dasselbe Lastniveau erreicht wurde. Der Umstand, dass die nach dem Aushärten vorgenommene Feuchte-konditionierung bei Versuch 3 praktisch keine Beeinflussung des Verschiebungsverhaltens verursacht, liefert den eindeutigen Hinweis darauf, dass bereits die Ausbildung des Verbundes zwischen Mörtel und Beton durch eine Feuchte-konditionierung signifikant gestört wird.

II. Während der Zweitbelastungsphase zeigt sich der Verhaltensunterschied noch ausgeprägter. Während die Verschiebungen der Versuche 1 und 3 mit Erreichen der Höchstlast von ca. 90 kN nur geringfügig größer sind als während der Erstbelastungsphase, schreitet diejenige von Versuch 2 in erheblichem Maße fort. Bemerkenswert hierbei ist, dass das Verschiebungsverhalten bis zu einer Last von ca. 70 kN wieder demjenigen der Erstbelastungsphase entspricht. Eine Linearisierung des Verschiebungsverhaltens, wie es bei der Zweitbelastung der Versuche 1 und 3 auftritt, ist hier nicht zu beobachten. Dies spricht dafür, dass das Verschiebungsverhalten von Versuch 2 bereits von Schlupf zwischen Mörtel und Beton bestimmt ist, während bei den Versuchen 1 und 3 ein noch weitgehend monolithisches Tragverhalten vorliegt.

*(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_zyl\_SL\_tast)*

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Feuchte in Beton behindert die Ausbildung des Verbundes in der Grenzfläche zwischen Verbundmörtel und Beton. Eine Beeinflussung des fertig ausgebildeten Verbundes ist dagegen nicht zu beobachten.
- b) Für diese Behinderung ist kein flüssiges Wasser erforderlich. Es ist anzunehmen, dass für diesen Effekt eine hohe relative Luftfeuchtigkeit im Porenraum des Betons genügt, der unmittelbar an die Grenzfläche zum frisch eingebrachten Verbundmörtel anschließt.
- c) Da die Feuchtigkeitsverteilung im Beton vom Austrocknungszustand abhängt, ist anzunehmen, dass im Normalfall die Verbundschwächung mit zunehmendem Abstand zur Betonoberfläche zunimmt. Tiefliegende Dübelabschnitte wären von der Verbundschwächung entsprechend stärker betroffen als oberflächennahe.

### **7.7.6 Teilergebnisse der Versuche mit zyklischer Belastung**

*(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_zyl\_SL)*

Die Diagramme 7.41 bis 7.43, 7.45 bis 7.48 und 7.49 bis 7.52 zeigen jeweils die Last-Verschiebungskurven der drei Versuche einer einzelnen Feuchte-kondition.

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Höchstlastniveaus

Die Feststellungen zu den vorangegangenen Tastversuchen gelten hier analog. Ausgenommen hiervon ist Versuch e1\_FE\_zyl\_SL\_K3-1, der, vergleichbar der Versuche mit Kondition 2, deutlich unterhalb der Streckgrenze einen Steifigkeitsabfall aufzeigt.

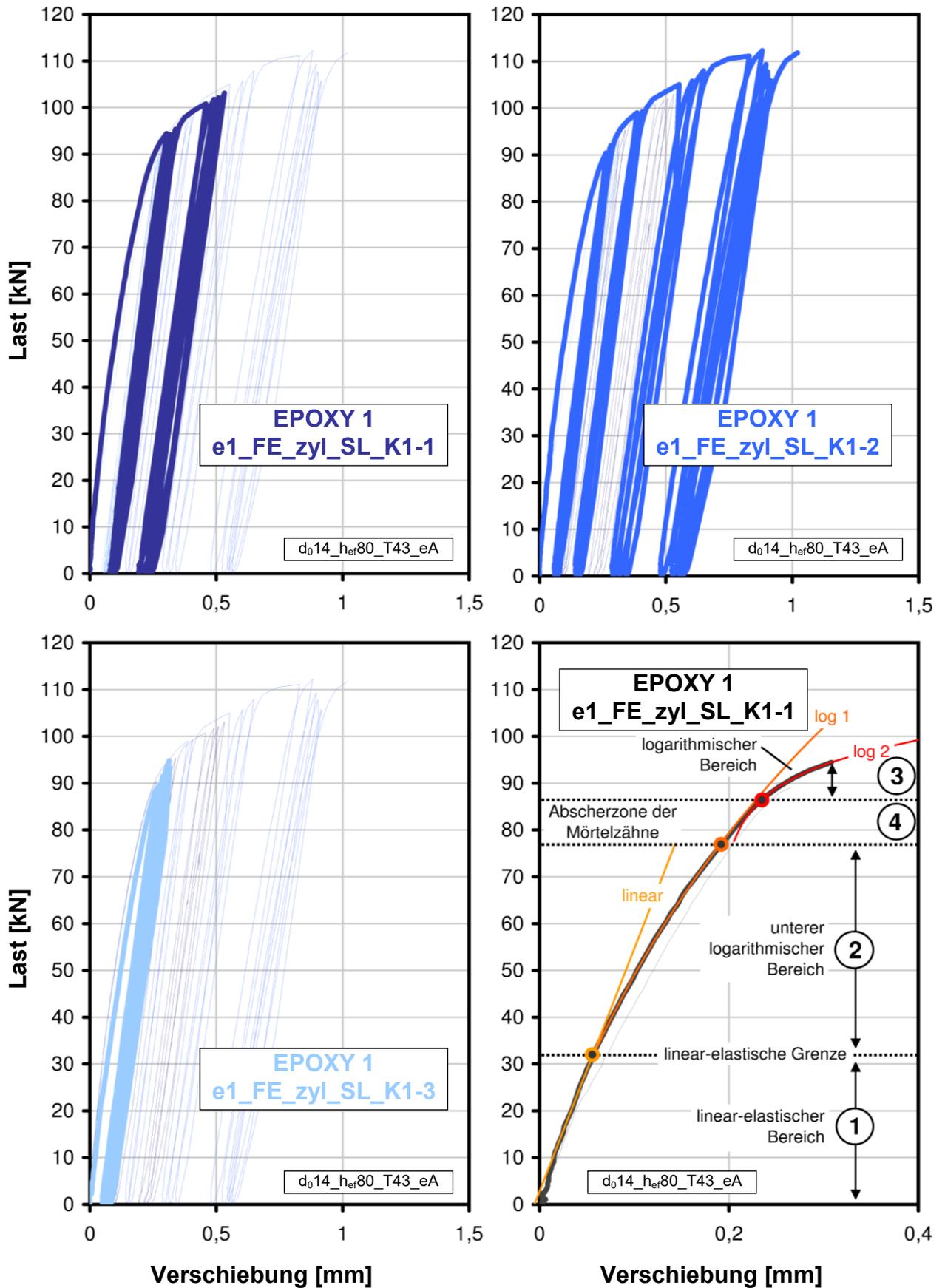
b) Verschiebungscharakteristik

I. Bei den Versuchen der Kondition 1 erfolgte vor jeder Lasterhöhung mehrmals hintereinander eine Belastung mit derselben Last. Es ist zu erkennen, dass die Einhüllenden der Last-Verschiebungskurven der drei Versuche weitgehend deckungsgleich sind. Das Verschiebungsverhalten ist somit ausgezeichnet reproduzierbar.

II. Diagramm 7.44 zeigt beispielhaft die Erstbelastungsphase von Versuch 3 der Kondition 1. Die Verschiebungscharakteristik entspricht praktisch genau derjenigen der kurzzeitigen zentrischen Zugversuche in Stahlkörpern (vgl. Diagramm 7.24 in Abschnitt 7.6.5.1). Die Feststellungen dort gelten hier analog. Es ist zu erkennen, dass sich in beiden Diagrammen die vermutete Abscherzone der Mörtelzähne auf annähernd demselben Lastniveau befindet, knapp oberhalb einer Last von 80 kN. Das Verschiebungsverhalten unter Kondition 1 enthält demnach keinen erkennbaren Anteil, der auf Verbundeigenschaften zurückzuführen ist. Aus der Ähnlichkeit im Verhalten ist zu schließen, dass der Verbund unter der Kondition 1 bis zur aufgebrauchten Höchstlast von ca. 112 kN (Versuch 2) annähernd ungeschädigt ist. Versagenslasten bei Versuchen mit Epoxy 1, die im kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche mit enger Abstützung (z.B. Referenzversuche zu den Standzeitversuchen in Kapitel 6.2) unterhalb dieser aufgebrauchten Höchstlast liegen, deuten demnach auf eine feuchtebedingte Verbundschädigung während der Belastungsphase hin. Der Festigkeitsverlust kann hier mindestens zu 30% der Trockenfestigkeit angenommen werden (aus dem Verhältnis der aufgebrauchten Höchstlast zur angenommenen Abscherlast der Mörtelzähne).

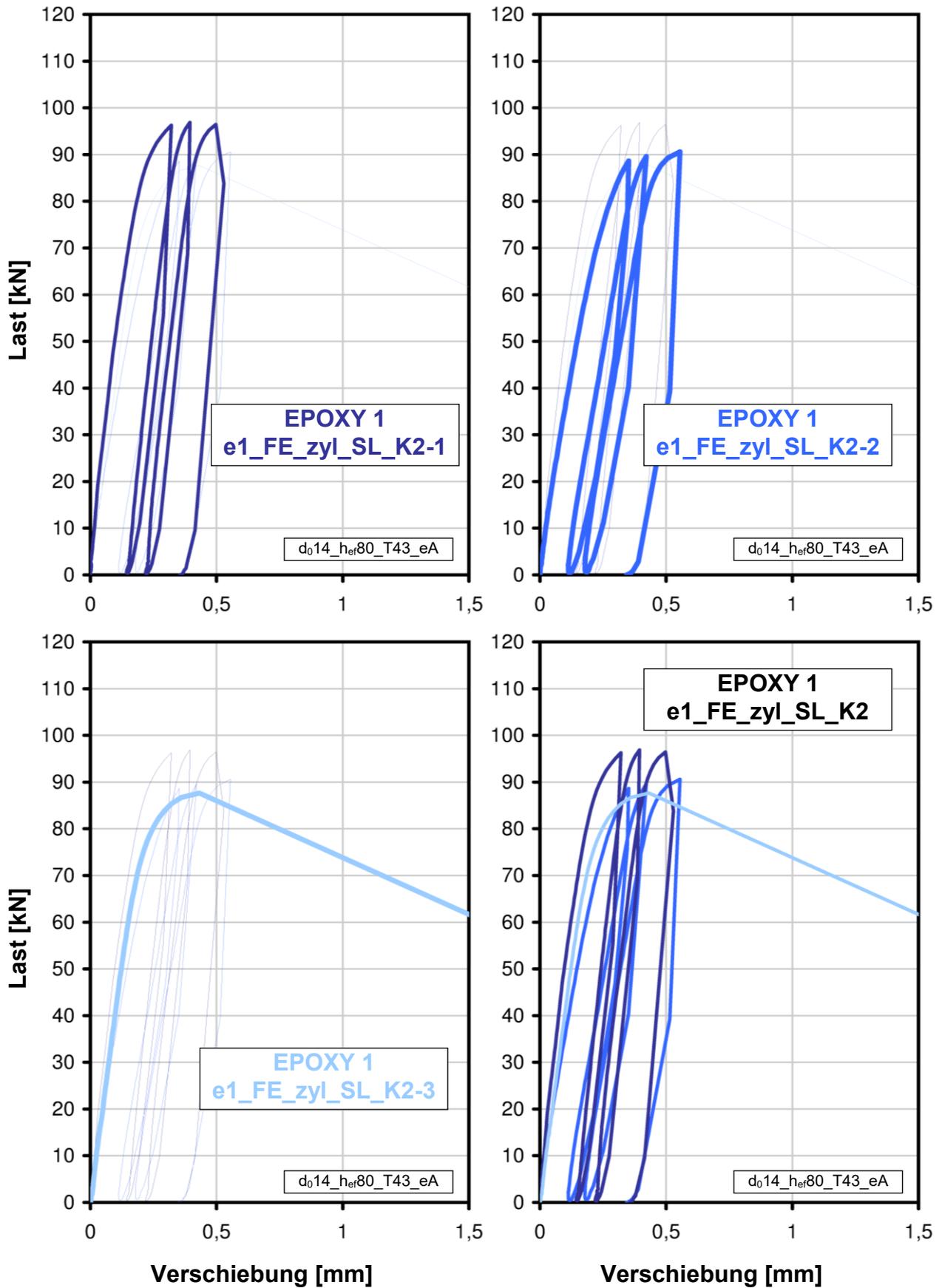
III. Der Unterschied des Verhaltens von Kondition 2 (Diagramm 7.45) im Vergleich zum Verhalten der Versuche der Kondition 1 (Diagramm 7.41) ist offensichtlich. Mit jeder Belastungsphase vergrößern sich die Verschiebungen, ohne dass hierfür eine erkennbare Laststeigerung notwendig ist. Bei allen drei Versuchen ist das Verschiebungsverhalten vor allem durch Schlupf bestimmt. Im Gegensatz zu den Versuchen der Kondition 1 muss der Verbund bereits versagt haben.

IV. Im direkten Vergleich mit den Versuchen der Kondition 2 ist für die Kondition 3 zu erkennen, dass weder eine ausgedehnte Trocknungsdauer, noch eine ausgedehnte Aushärtezeit das Verhalten erkennbar positiv beeinflussen. Somit handelt es sich bei der anzunehmenden Verbundbehinderung infolge von Feuchteeinwirkung während der Aushärtephase um einen Effekt, dem nicht oder allenfalls innerhalb baupraktisch irrelevanter Trocknungsdauern begegnet werden kann.

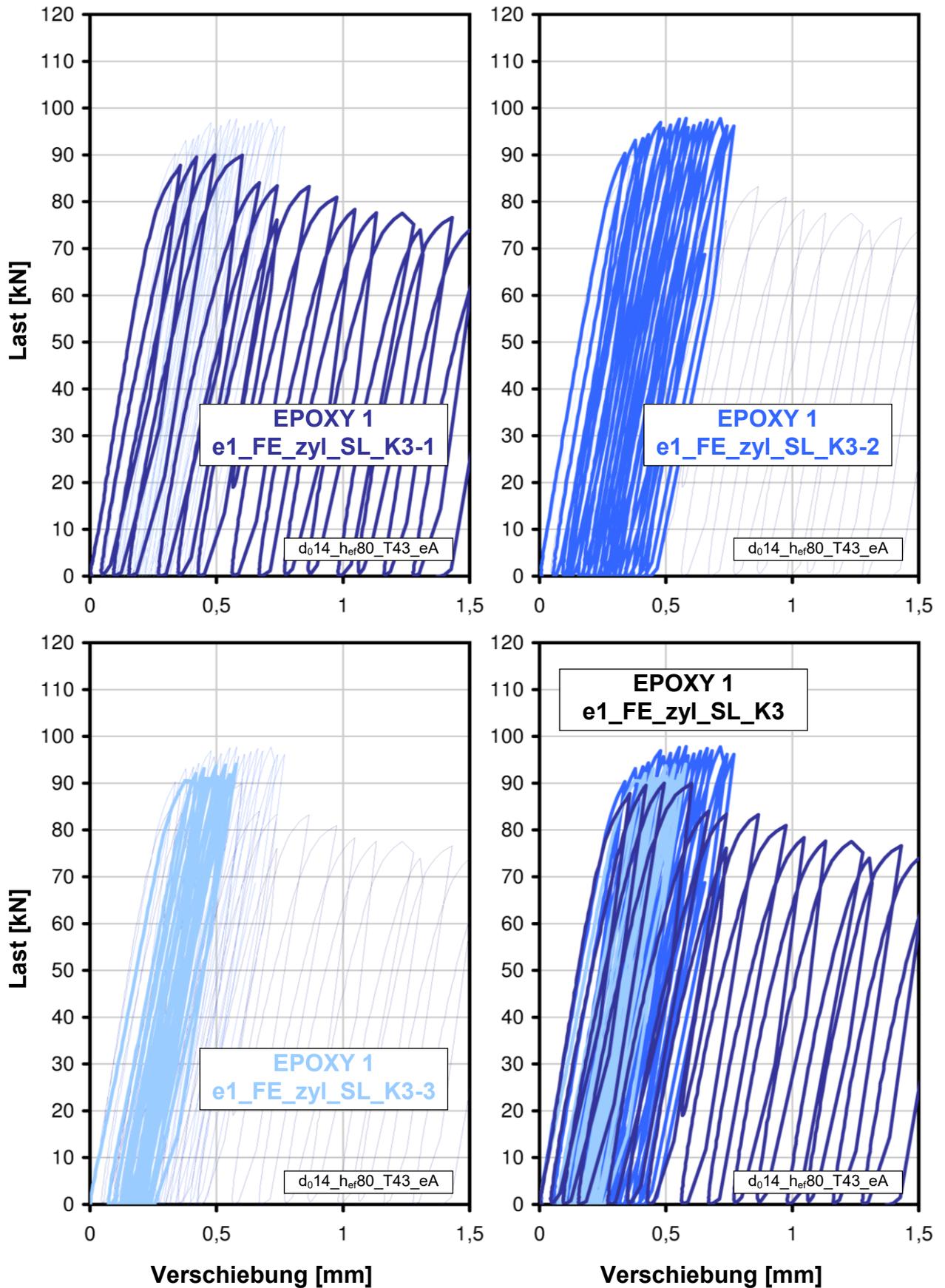


**Diagramm 7.41 (o.l.), 7.42 (o.r.), 7.43 (u.l.):** zyklische Versuche mit Epoxy 1 unter Kondition 1 in Standardversuchskörpern

**Diagramm 7.44:** Verschiebungscharakteristik von Epoxy 1 unter Kondition 1



**Diagramm 7.45 (o.l.), 7.46 (o.r.), 7.47 (u.l.):** zyklische Versuche mit Epoxy 1 unter Kondition 2 in Standardversuchskörpern  
**Diagramm 7.48:** Gegenüberstellung aller drei Versuche der Kondition 2



**Diagramm 7.49 (o.l.), 7.50 (o.r.), 7.51 (u.l.):** zyklische Versuche mit Epoxy 1 unter Kondition 3 in Standardversuchskörpern  
**Diagramm 7.52:** Gegenüberstellung aller drei Versuche der Kondition 3

(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_zyl\_SL)

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- Bei von Feuchte unbeeinflusster Verbundausbildung zwischen Mörtel und Bohrlochwand ist die Tragfähigkeit in dieser Grenzschicht höher als zwischen Gewindestange und Mörtel. Anhand des Verschiebungsverhaltens konnte selbst bei einer Last von 112 kN noch kein Hinweis auf eine mögliche Verbundschädigung beobachtet werden. Die Mörtelzähne gelten hierbei bereits ab einer Last von ca. 85 kN als abgeschert, sodass die weitere Lastzunahme durch Reibung und hinterschnittartige Tragwirkung der Unebenheiten entlang der Scherfläche aufgenommen werden müssen.
- Bei Versuchen mit Feuchteconditionierung wurde demgegenüber grundsätzlich ein Versagen zwischen Mörtel und Beton maßgeblich. Die vorhandene Verbundfestigkeit liegt hierdurch nun niedriger als die Abscherlast der Mörtelzähne entlang der Gewindestange.

### 7.7.7 Teilergebnisse der Kurzzeitversuche

(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen e1\_FE\_würfel\_N<sub>u,m</sub>, e1\_FE\_zyl\_N<sub>u,m</sub>)

Diagramm 7.53 zeigt die Last-Verschiebungskurven aller vier Konditionen der Versuche mit Betonwürfeln. Diagramm 7.54 zeigt die Last-Verschiebungskurven der beiden Konditionen der Versuche mit Standardversuchskörpern.

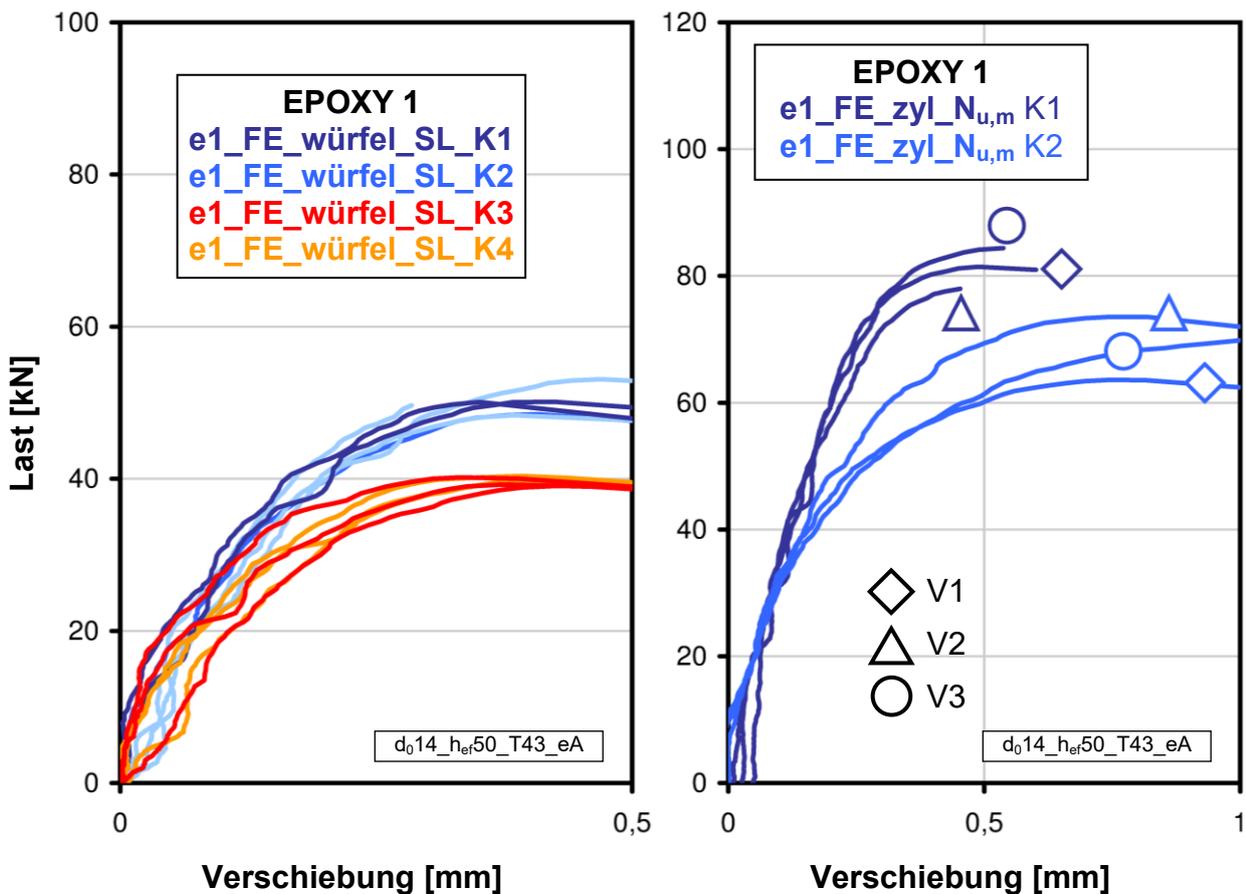


Diagramm 7.53 (links) und 7.54: kurzzeitige, zentrische Zugversuche mit Epoxy 1 in Betonwürfeln (links) und in Standardversuchskörpern aus Beton

Es kann Folgendes festgestellt werden:

a) Versuche mit Betonwürfeln

- I. Die Versuche versagten erwartungsgemäß sämtlich durch Spalten des Versuchskörpers.
- II. Das Last-Verschiebungsverhalten zeigt keine Beeinflussung durch die Temperatur beim Setzen und während des Aushärtens.
- III. Das Last-Verschiebungsverhalten unterscheidet sich deutlich zwischen den unbehandelten und den feuchteconditionierten Versuchen. Die Lasten, die zum Zeitpunkt des Spaltens erreicht werden, sind bei unbehandelten Versuchskörpern um ca. 25% höher als bei feuchteconditionierten. Zudem ist das Systemverhalten oberhalb einer Last von ca. 20 kN steifer.
- IV. Abbildung 7.5 zeigt sämtliche Dübel nach dem Freilegen aus dem versagten Betonkörpern. Links abgebildet sind die Dübel der Konditionen 1 und 2, die in unbehandelten Versuchskörpern durchgeführt wurden. Rechts abgebildet sind die Dübel der Konditionen 3 und 4 mit Feuchteconditionierung. Es ist klar zu erkennen, dass die Oberfläche der Mörtelschale bei den Versuchen der Konditionen 1 und 2 vollflächig mit anhaftenden Betonresten bedeckt ist, wohingegen bei den Versuchen der Konditionen 3 und 4 auf der Mörteloberfläche nur wenige Anhaftungen zu erkennen sind. Diese Versuche zeigen somit besonders anschaulich, dass die Verbundausbildung durch Feuchteeinwirkung beeinflusst ist.

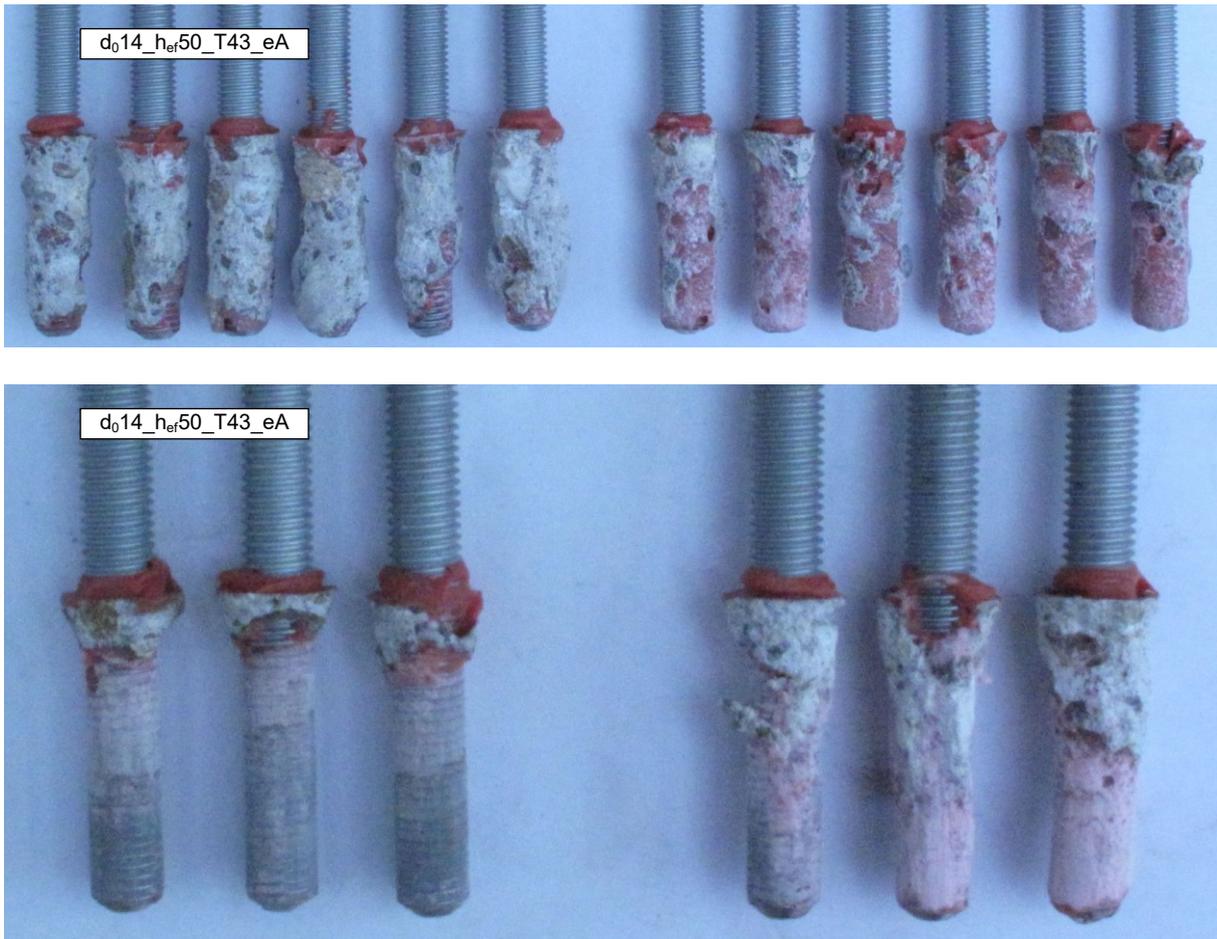
b) Versuche mit Standardversuchskörpern

- I. Wie auch bei den Versuchen in Betonwürfeln zeigen die Versuche in unbehandeltem Beton, gegenüber denjenigen in feuchteconditioniertem Beton, oberhalb einer Last von hier ca. 30 kN ein deutlich steiferes Systemverhalten, was sich mit den Beobachtungen in [38] deckt. Hieraus folgt, dass durch unterschiedliche Feuchteconditionen auch Unterschiede hinsichtlich der Anfangsverschiebungen von Dauerlastversuchen zu erwarten sind, sobald die linear-elastische Grenzlast überschritten ist.

Somit kann dies als Erklärung für das bemerkenswerte Anfangsverschiebungsverhalten der Baseline-Versuche mit Epoxy 2 (siehe Kapitel 6, Abschnitt 6.2.5.2.1) und der Standzeitversuche zum Einfluss der Art der Abstützung mit Epoxy 1 dienen (siehe Kapitel 6, Abschnitt 6.3.5.2.1), die im Rahmen der Standzeituntersuchungen durchgeführt wurden. Bei den Versuchen mit Epoxy 2 ( $e2\_base\_N_{u,m}$ ) hatten die Versuchskörper zum Teil einen Altersunterschied von 130 Tagen, wodurch der Austrocknungsfortschritt und damit die Restfeuchtegehalt der Versuchskörper unterschiedlich hoch anzunehmen ist. Bei den Versuchen mit Epoxy 1 unterschieden sich die Lagerungsbedingungen der dort verwendeten Versuchskörper bis zu ihrer Verwendung dahingehend, dass diejenigen der Serie  $e1\_105\_eng\_75$  im Stapel der bevorrateten Versuchskörper obenauf lagen und entsprechend ungehindert austrocknen konnten, während die Versuchskörper der darauffolgend angesetzten Serien, durch Sperrholztafeln bedeckt, darunter lagerten. Die Austrocknung war hier behindert und der negative Einfluss der Restfeuchte entsprechend höher zu erwarten als bei den Versuchen der Serie  $e1\_105\_eng\_75$ .

- II. Die Versuche der Kondition 1 mit unbehandeltem Beton zeigen ein Versagen zwischen Gewindestange und Mörtel (Versagensmodus „P“), wohingegen die Versuche der Kondition 2 mit feuchteconditioniertem Beton zwischen Mörtel und Beton versagen (Versagensmodus „P<sub>M</sub>“). Den Versagensmodi entsprechend ist die Versagensverschiebung bei Kondition 1 deutlich geringer als bei Kondition 2.

III. Abbildung 7.6 zeigt sämtliche Dübel nach dem Freilegen aus dem versagten Betonkörpern. Die beiden unterschiedlichen Versagensmodi sind klar zu erkennen.



**Diagramm 7.5 (oben) und 7.6:** freigelegte Dübel der Versuche mit Epoxy 1 in Betonwürfeln (oben) und die ausgezogenen Dübel der Versuche in Standardversuchskörpern

(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennungen  $e1\_FE\_würfel\_N_{u,m}$ ,  $e1\_FE\_zyl\_N_{u,m}$ )

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- Die Beeinflussung des Verbundes durch Feuchte zeigt keine Abhängigkeit von der Temperatur. Versuche, bei denen das Setzen und Aushärten jeweils bei 20°C erfolgte, zeigen ein identisches Verhalten wie Versuche, bei denen das Setzen und Aushärten jeweils bei 10°C erfolgte.
- Die Ausbildung des Versagensmodus ist durch die Feuchtecondition beeinflusst.

## 7.7.8 Teilergebnisse der Dauerlastversuche

(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_RS18)

### 7.7.8.1 Anfangsverschiebungen

Das Diagramm 7.55 zeigt die Anfangsverschiebungen sämtlicher Ringspaltversuche. Die Ermittlung erfolgte durch eine Rückwärtsextrapolation der Messwerte nach Kapitel 4, Abschnitt 4.3.5.5, da versuchstechnisch eine kontinuierliche Wegmessung während der Belastungsphase nicht möglich war. Die Werte repräsentieren die Dübelverschiebungen am Ende des ca.15-sekündigen Belastungsvorganges.

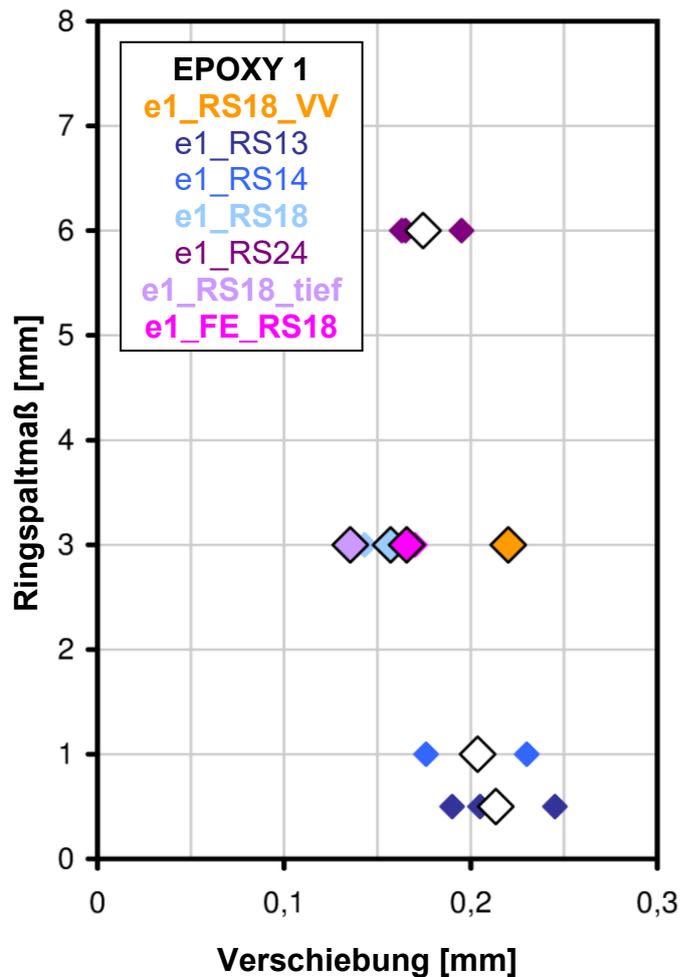


Diagramm 7.55: Anfangsverschiebungen, Ringspaltversuche

EPOXY 1 / Feuchteversuche										
Serienkennung	V [Nr.]	$h_{ef}$ [mm]	$d_{nom}$ [mm]	Körp.	Abst.	T [°C]	FK	Last [kN]	$s_{0,i}$ [mm]	$s_{0,m}$ [mm]
e1_FE_RS18	1	80	14	Zyl.	eng	43	K1	50	0,17	0,17
	2								0,16	
	3								0,17	

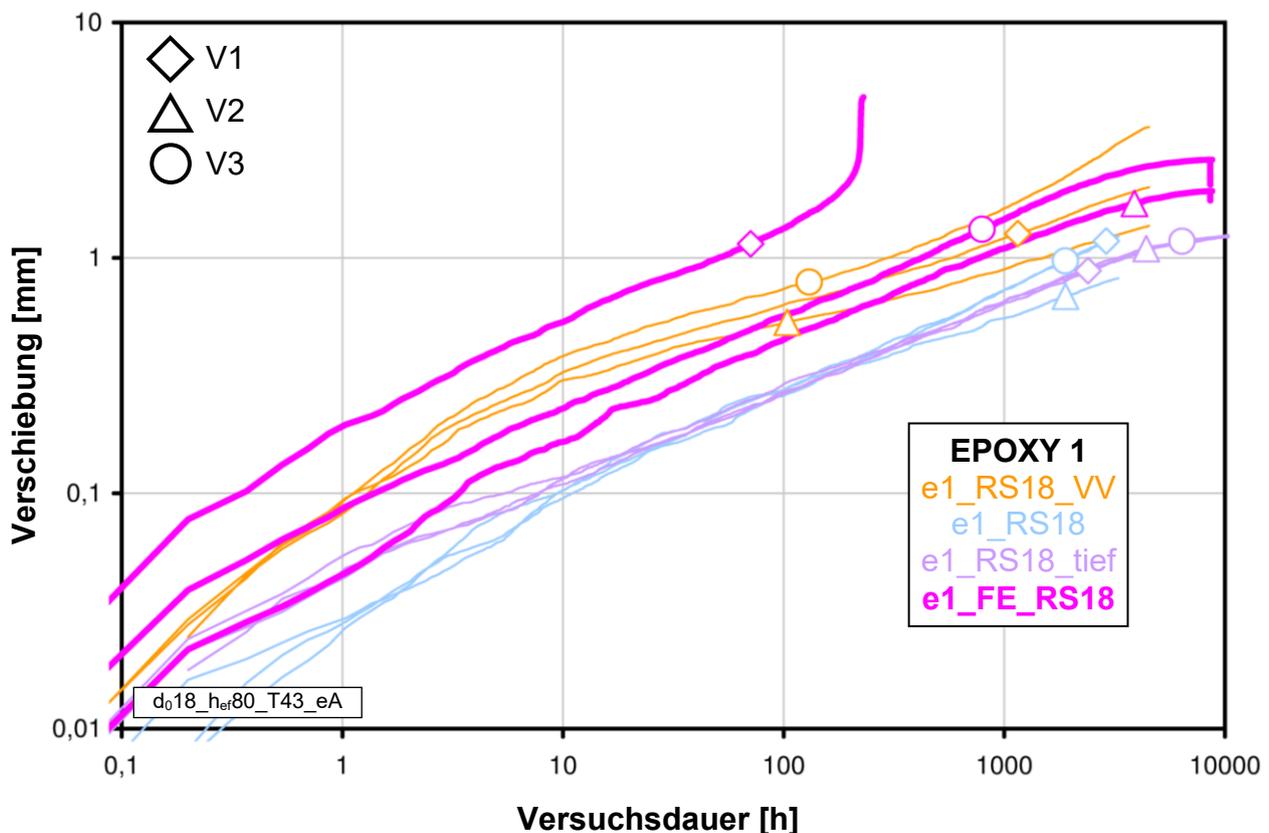
Tabelle 7.15: Anfangsverschiebungen, Feuchteversuche

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Die Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_FE\_RS18 entsprechen annähernd denjenigen der Ringspaltversuche e1\_RS18. Dies deutet auf einen ähnlichen Vorschädigungsgrad hin.
- b) Im Vergleich zu den Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_RS18\_VV sind die Verschiebungen der Versuche e1\_FE\_RS18 unerwartet gering. Das außergewöhnliche Verschiebungsverhalten der Versuche e1\_RS18\_VV kann somit nicht wie erwartet dem Feuchteinfluss zugeschrieben werden. Eine Erklärung hierfür steht somit weiter aus.

### 7.7.8.2 Verschiebungscharakteristik

Das Diagramm 7.56 zeigt sämtliche Verschiebungskurven der Versuchsreihen mit Epoxy 1 und einem Ringspaltmaß von 3 mm im doppelt-logarithmischen Maßstab. Die Diagramme 7.57 und 7.58 zeigen eine Gegenüberstellung sämtlicher Verschiebungskurven sowohl im doppelt-logarithmischen als auch im einfach-logarithmischen Maßstab.



**Diagramm 7.56:** sämtliche Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 3 mm

Es kann Folgendes festgestellt werden:

- a) Verschiebungscharakteristik

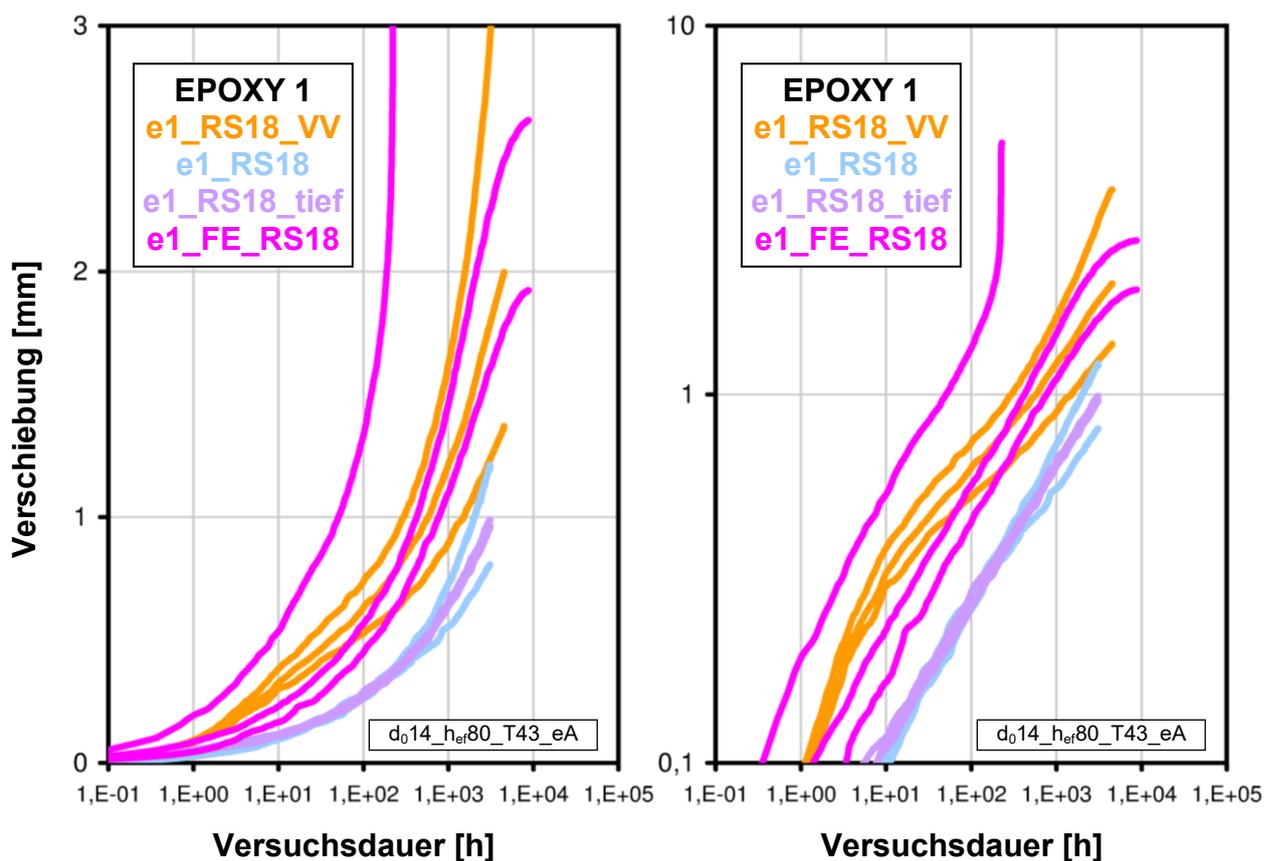
- I. Während die Anfangsverschiebungen der Versuche e1\_FE\_RS18 keine Auffälligkeiten zeigen im direkten Vergleich mit den übrigen Versuchen, trifft dies auf das Verschiebungsverhalten nicht zu. Hier übertreffen die Verschiebungswerte diejenigen der übrigen Versuche deutlich (ausgenommen den Sonderfall e1\_RS18\_VV) während der gesamten Versuchsdauer. Die Feuchteconditionierung wirkt sich zweifelsfrei auf das Verschiebungsverhalten unter dauerhafter Lasteinwirkung aus.

II. Wie bei sämtlichen Dauerlastversuchen in Beton mit Epoxy 1 zeigen auch die nicht versagten Versuche e1\_FE\_RS18-2 und -3 im Anschluss an das FINDLEY-artige Verschiebungsverhalten (Potenzfunktion) der ersten ca. 1500 Versuchsstunden den Effekt der Endstabilisierung (vgl. Diagramm 7.1). Allerdings findet dieser Vorgang auf einem, verglichen mit den Versuchen e1\_RS18 und e1\_RS18\_tief, deutlich höheren Verschiebungsniveau statt. Somit ist zwar anzunehmen, dass eine feuchtigkeitsbedingte Verbundschwächung aufgetreten ist. Bei den Versuchen e1\_FE\_RS18-2 und -3 war diese jedoch, im Gegensatz zu e1\_FE\_RS18-1, nicht derart ausgeprägt, dass eine vollständige Ablösung des Mörtelpfropfens vom Beton erfolgen konnte. Die verbliebenen intakten Klebestellen haben jedoch die gesamte Last übernommen, was zu entsprechend größeren Verformungen geführt hat.

b) Versagensverhalten

I. Bei Versuch e1\_FE\_RS18-1 tritt bereits nach ca. 220 Stunden Versuchsdauer vollständiges Versagen ein. Die Feuchteconditionierung beeinflusst demnach nicht nur das Verschiebungsverhalten, sondern reduziert ebenso die Dauerhaftigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung.

II. Das Versagen des Versuchs e1\_FE\_RS18-1 deutet darauf hin, dass durch die Feuchteconditionierung die „Switch-Last“ des Systems reduziert ist.



**Diagramm 7.57 (links) und 7.58:** Verschiebungskurven von Epoxy 1 mit einem Ringspaltmaß von 3 mm im einfach-logarithmischen (links) und doppelt-logarithmischen Maßstab

*(Feuchteversuche mit Epoxy 1, Serienkennung e1\_FE\_RS18)*

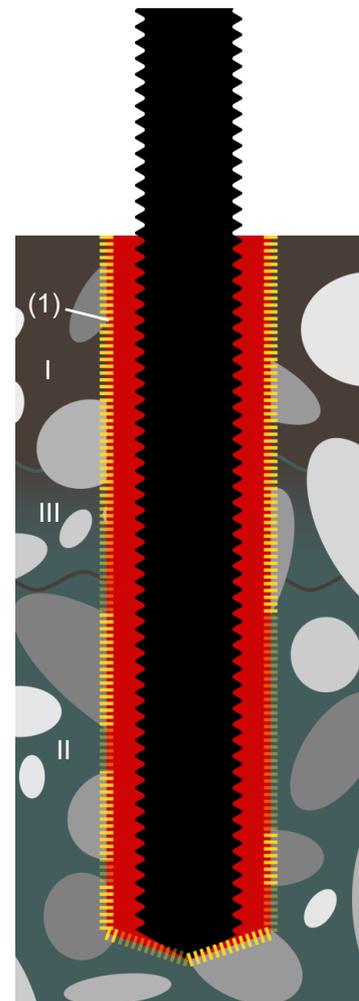
Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

- Sowohl die Verschiebungscharakteristik als auch das Versagensverhalten von Epoxy 1 sind durch die Feuchtecondition der Versuchskörper maßgeblich beeinflusst.
- Eine Reduzierung des Einflusses der Feuchte auf die Verbundausbildung erhöht die Dauerhaftigkeit von Befestigungen mit Epoxy 1 signifikant.
- Die Prüfung der Dauerhaftigkeit muss grundsätzlich in feuchteconditionierten Versuchskörpern erfolgen, da andernfalls Ergebnisse zu erwarten sind, die auf der unsicheren Seite liegen.

### 7.7.9 Zusammenfassung der Feuchteversuche mit Epoxy 1

Sämtliche Feuchteversuche zusammenfassend ist Folgendes festzustellen:

- Die Feuchtigkeit im Beton ist der maßgebliche Parameter bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von Dübelssystemen mit Epoxy 1. Dies gilt für die Tragfähigkeit unter kurzzeitiger Lasteinwirkung, in besonderem Maße jedoch für die Tragfähigkeit unter dauerhafter Lasteinwirkung.
- Für einen schädigenden Einfluss muss das Wasser nicht in flüssiger Form an die Grenzfläche zwischen Frischmörtel und Beton gelangen. Es genügt ein gasförmiger Zutritt als Wasserdampf.
- Es ist anzunehmen, dass die Verbundfestigkeit entlang der Einbindetiefe nicht konstant ist, weil im Porenraum zwischen der Betonoberfläche, die völlig trocken ist, und dem Kern des Versuchskörpers, der nach dem Herstellen noch für lange Zeit flüssiges Wasser enthält, ein Luftfeuchtegradient existiert. Entsprechend ist das Ausmaß des Feuchtezutritts aus dem Porenraum des Betons an die Grenzfläche zum frisch injizierten Mörtel unterschiedlich hoch zu erwarten.
- Aufgrund des Umstandes, dass die Wasseraufnahmefähigkeit (und damit die Abgabefähigkeit) der angebohrten Zuschlagskörner im Vergleich zur Wasseraufnahmefähigkeit des Zementsteins äußerste gering ist, muss davon ausgegangen werden, dass entlang der Oberflächen der Zuschlagskörner eine vergleichsweise hohe Verbundfestigkeit ausgebildet ist. Die Verbundverminderung ist dann nicht nur eine Funktion des Abstandes von der Betonoberfläche, sondern ändert sich auch entlang des Umfanges des Bohrlochs in Abhängigkeit davon, ob der Klebpartner lokal in Form von Zementstein oder in Form eines Zuschlagkorns gegeben ist. Abbildung 7.7 zeigt diesen Sachverhalt. Dargestellt ist eine mögliche Verteilung der Verbundfestigkeit (gelb gestrichelt (1)) wenn angenommen wird, dass diese vom Feuchteangebot entlang der Klebeflächen abhängt (je heller dargestellt, desto höher die Festig-



(1) Verbundfestigkeit

**Abbildung 7.7:**  
 Verbundfestigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Klebpartner und den lokalen Feuchtebedingungen:

- I = trocken,
- II = gesättigt,
- III = Übergangszone

keit). Zone I wird als völlig ausgetrocknet angenommen, die Verbundfestigkeit ist maximal. Zone II wird als wassergesättigt angenommen, die Verbundfestigkeit ist minimal. Zone III stellt einen Übergang dazwischen dar. Zu erkennen ist weiter, dass auch innerhalb der wassergesättigten Zone II Unterschiede in der Verbundfestigkeit zu erwarten sind, wenn diese feuchteabhängig ist. Grund hierfür ist, dass die Feuchteaufnahme der Zuschlagskörner und damit auch die Feuchteabgabe um ein Vielfaches geringer sind als diejenige des Zementsteins. Entsprechend ist anzunehmen, dass in einem frisch gebohrten Loch an den Oberflächen der angebohrten Zuschlagskörner kaum festigkeitsmindernder Feuchteinfluss zu erwarten ist und hier entsprechend die volle Verbundspannung gegeben ist.

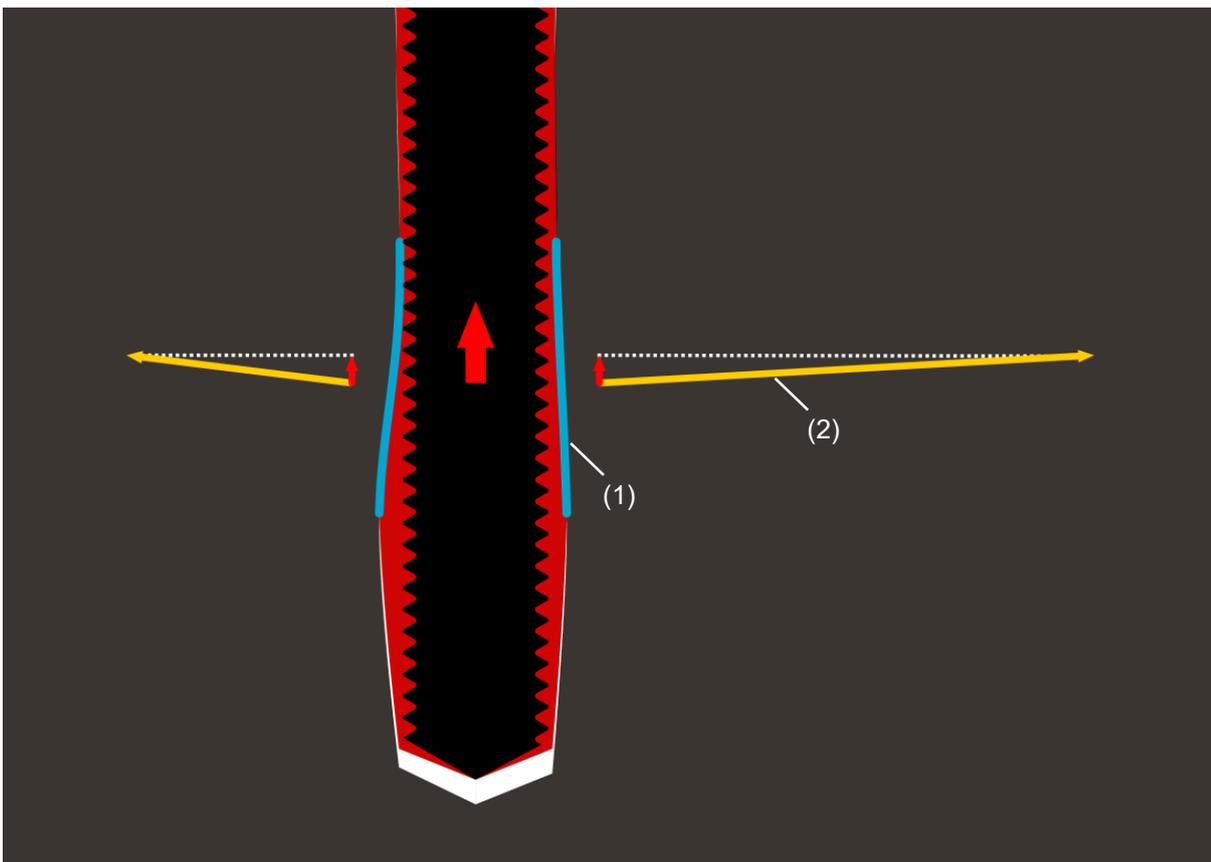
#### **7.7.10 Konsequenzen aus den Feuchteversuchen mit Epoxy 1**

Aus der feuchtebedingten Beeinträchtigung der Verbundausbildung von Epoxy 1 ergeben sich folgende Auswirkungen:

- a) Bei Einsatz verschiedener Prüfkörper innerhalb einer Prüfung sind weder die Ergebnisse kurzzeitiger, zentrischer Zugversuche, noch die Ergebnisse von Langzeitversuchen sinnvoll zu bewerten und miteinander zu vergleichen, sofern die Feuchtebedingungen der Versuchskörper nicht im Detail bekannt sind.
- b) Zumindest bei enger Abstützung weisen sowohl die kurzzeitigen, zentrischen Zugversuche als auch die entsprechenden Langzeitversuche ein umso günstigeres Verhalten auf (höhere Bruchlasten, geringere Verschiebungen unter Dauerlasten), je weniger das System während der Aushärtphase von Feuchte beeinflusst ist. Eine Prüfung von Epoxy 1 in weitgehend getrockneten oder vollständig ausgetrockneten Versuchskörpern stellt eine Prüfung unter viel zu günstigen Randbedingungen dar, verglichen mit den praxisnahen Zuständen während einer Dübelinstallation auf einer Baustelle. Selbst Installationen in älteren Bestandsbauwerken können hiervon betroffen sein. Einen Extremfall stellen dabei Dübelmontagen in frei bewitterten Betonbauteilen dar, bei denen über die gesamte Einbindetiefe mit völliger Durchfeuchtung zu rechnen ist.
- c) Für eine gute Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen wird üblicherweise angestrebt, die Prüfungen in Versuchskörpern möglichst derselben Betoncharge durchzuführen. Dies ist zu diesem Zweck nicht ausreichend. Für die Versuchskörper einer Betoncharge sind darüber hinaus identische Lagerungsbedingungen vorzuschreiben, die einen identischen Trocknungsprozess garantieren. Solange die Trocknung von Versuchskörpern fortschreitet, muss der Zeitraum, in dem Prüfungen durchgeführt werden, möglichst kurz sein, um unterschiedliche Feuchtebedingungen zu vermeiden.
- d) Bei Langzeituntersuchungen sind Unterschiede bezüglich der Feuchtebedingungen kaum zu vermeiden, da im Extremfall Jahre zwischen zwei Untersuchungen liegen können. Wie im vorliegenden Forschungsvorhaben können hieraus Schwierigkeiten hinsichtlich der Interpretation von Versuchsergebnissen resultieren (siehe Ringspaltversuche e1\_FE\_RS18, e1\_RS18, e1\_RS18\_VV). Es ist daher anzuraten, jeweils vor Beginn einer Versuchsreihe grundsätzlich eine definierte Feuchtekonditionierung der Versuchskörper durchzuführen, um auch über lange Zeiträume die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Versuchen zu gewährleisten.
- e) Bei der numerischen Simulation kurzzeitiger, zentrischer Zugversuche an Verbunddübeln wird die Verbundfestigkeit entlang der Einbindetiefe in der Regel als konstant angenommen. Insbesondere bei der Simulation unter Berücksichtigung realitätsnaher Verhältnisse hinsichtlich der Abstützung (weite Abstützung) muss dies kritisch hinterfragt werden, da die Verteilung der Verbundfestigkeiten entlang der

Einbindetiefe einen direkten Einfluss auf die Ausbildung (Tiefe) des Betonausbruchkegels und somit auf die Ausbruchlasten hat (vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.3).

- f) Die Auswirkung auf das Tragverhalten unter Dauerlasten infolge des festigkeitsmindernden Einflusses auf die Verbundausbildung kann ohne weitere Untersuchungen nicht bestimmt werden. Geht man vom „Worst-Case“ aus, dann ist anzunehmen, dass in Bereichen intensiver Feuchteinwirkung kein nennenswerter Verbund zwischen Verbundmörtel und Beton ausgebildet ist. Die Kraftübertragung würde in diesem Extremfall ausschließlich über Formschluss erfolgen. Der Widerstand dieses formschlüssigen Tragmechanismus gegenüber einer Dauerbelastung hängt dann in hohem Maße von der Geometrie des Bohrlochs ab. Je „flacher“ die Bohrlochwelligkeit ausgebildet ist, desto größer sind die Pressungen, die auf eine derartige Unebenheit der Mörtelschale einwirken. Abbildung 7.8 zeigt diesen „Keileffekt“ sinnbildlich. Wenn sich aufgrund von Bohrlochunebenheiten, nach dem Adhäsionsversagen zwischen Verbundmörtel und Beton, ein hinterschnittartiges Tragverhalten einstellt, dann hängen die Pressungen an den Kontaktflächen (1) von der Orientierung der Normalen (gelb, (2)) auf den Pressflächen ab. Je flacher die Bohrlochunebenheiten sind (bezogen auf die Dübellängsachse), desto größer sind die Pressungen (Keileffekt) und damit mögliche Kriechverformungen des Mörtels. Es ist folglich zu erwarten, dass die Dauerhaftigkeit eines Systems in diesem Zustand vor allem von der Ausprägung der Bohrlochunebenheiten abhängt.



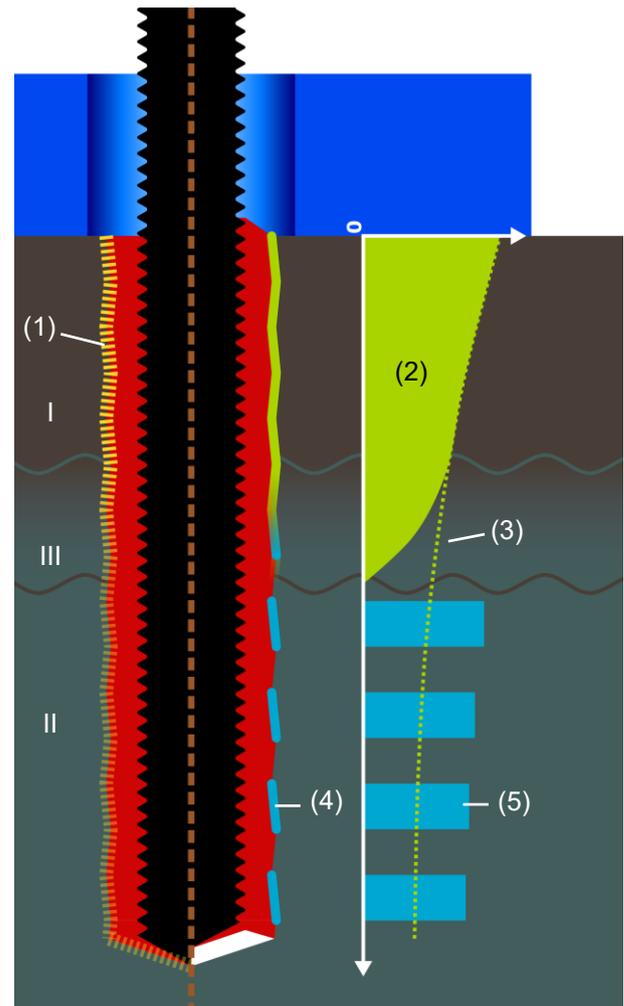
(1) Kontaktfläche, (2) Kraftkomponente senkrecht zur Kontaktfläche

**Abbildung 7.8:** Darstellung der Kraftkomponenten des Keileffekts der hinterschnittartigen Tragwirkung bei flach (rechts) und vergleichsweise steil verlaufenden Bohrlochunebenheiten (links)

- g) Unter der Annahme, dass ein Feuchtegradient entlang der Einbindetiefe zu einem Gradienten der Verbundfestigkeit führt, muss davon ausgegangen werden, dass der zeitabhängige Tragwiderstand entlang der Einbindetiefe nicht konstant ist. Dies bedeutet, dass unter dauerhafter Lasteinwirkung zuerst die Bereiche mit dem niedrigsten zeitabhängigen Tragwiderstand versagen. Die dort nicht mehr aufgenommenen Lasten lagern sich in die zu diesem Zeitpunkt steifsten Bereiche des Systems um und beschleunigen dort den Schädigungsvorgang, wodurch sich dieser Mechanismus kontinuierlich fortsetzt.

Unter der Annahme einer völligen Verbundverhinderung ist mit einem Zustand vergleichbar der sinnbildlichen Darstellung in Abbildung 7.9 zu rechnen. In der linken Bildhälfte dargestellt ist ein Verbunddübelssystem, dessen Verbundfestigkeit (gelb gestrichelt, (1)) vom Feuchteangebot an der Klebefläche abhängt (je heller dargestellt, desto größer die Festigkeit). Der Beton in Zone I wird als völlig ausgetrocknet angenommen (maximale Verbundfestigkeit). Der Beton in Zone II wird als wassergesättigt angenommen (geringe/keine Verbundfestigkeit). Zone III stellt entsprechend den Übergang dar. In der rechten Bildhälfte steht dieses System unter Last. In Zone II hat die Adhäsion versagt, ein möglicher Resttragmechanismus besteht aus hinterschnittartiger Wirkung von Bohrlochunebenheiten (4) (Pressungen = blau dargestellt, (5)). In Zone I besteht hingegen noch voller Verbund, die Kräfte werden über Verbundspannungen in den Beton weitergeleitet (Verbundspannungen = grün, (2)). Die grün gepunktete Linie zeigt vereinfacht die Verbundspannungen unmittelbar vor dem Versagen der Adhäsion in Zone II (3). Mit zunehmender Einwirkungsdauer der Last kommt es, aufgrund der vergleichsweise großen zeitabhängigen Deformationen entlang des Bereiches mit (überwiegend) formschlüssigen Tragverhalten (Zone II), zu einer Umlagerung der Lasten in den Bereich mit monolithischem Verbundtragverhalten (Zone I).

- h) Unter realitätsnahen Abstützbedingungen (weite Abstützung) wäre das System unter Dauerlast tragfähig, sofern die Last, die im trockenen Bereich über Verbund eingeleitet wird, diejenige Last nicht überschreitet, die für einen Betonausbruch bis zur



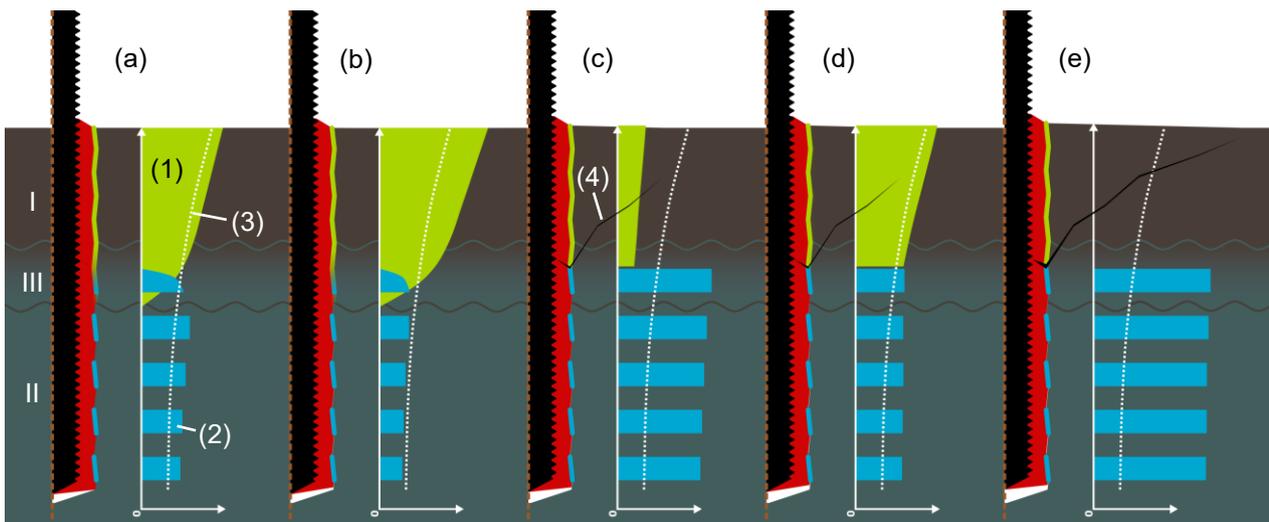
(1) Verbundfestigkeit, (2) Verbundspannungen und deren (3) Verlauf ohne Verbundversagen, (4) Hinterschnitte, (5) Pressungen

**Abbildung 7.9:** schematische Darstellung der Verteilung der Tragwirkungen (stoffschlüssig, hinterschnittartig) entlang der Einbindetiefe in Abhängigkeit von den lokalen Feuchtebedingungen (I = trocken, II = gesättigt, III = Übergangszone)

Grenztiefe der monolithischen Verbundtragwirkung erforderlich ist.

⇒ Eine enge Abstützung, wie in der Abbildung dargestellt, verhindert dieses Versagen.

Abbildung 7.10 zeigt den Fall eines kegelförmigen Ausbruchs. Schematisch dargestellt ist ein möglicher Schädigungshergang unter dauerhafter Lasteinwirkung, wieder unter Annahme einer Verbundschwächung infolge einer Feuchteinwirkung. Zone I wird hierbei als völlig ausgetrocknet angenommen (maximale Verbundfestigkeit). Zone II wird als wassergesättigt angenommen (geringer/kein Verbund), die Tragwirkung entsteht durch hinterschnittartiges Verhalten infolge von Bohrlochunebenheiten. Zone III bildet dazwischen den Übergang. Situation (a) stellt die Verteilung der Verbundspannungen (grün, (1)) und der Pressungen infolge Hinterschnitt (blau, (2)) unmittelbar nach dem Belasten dar (reiner Verbund zum Vergleich gepunktet dargestellt, (3)). Die hohen Pressungen in Zone II und die damit verbundene hohe Kriechneigung des Mörtels führen zu einer Lastumlagerung in Richtung des vergleichsweise steif wirkenden Verbundes in Zone I (b). Beim Überschreiten der Betonzugfestigkeiten erfolgt eine Rissbildung (c, (4)), wodurch die Lasten wieder in Zone II umgelagert werden. Dieses Wechselspiel setzt sich fort (d), bis der Betonkegel vollständig ausgebrochen ist (e). Die Dauerhaftigkeit hängt nun allein von der stark zeitabhängigen hinterschnittartigen Tragwirkung in Zone II ab, deren rasche Abnahme unter dauerhafter Lasteinwirkung zu einem baldigen Versagen führt.



(1) Verbundspannungen, (2) Pressungen infolge hinterschnittartiger Tragwirkung nach Verbundversagen, (3) Verbundfestigkeit, (4) Rissbildung

**Abbildung 7.10:** schematische Darstellung der von (a) nach (e) ablaufenden, zeit- und feuchteabhängigen Entwicklung des Tragwiderstands und der damit verbundenen mehrfachen Lastumlagerungen entlang der Einbindetiefe sowie eines hieraus resultierenden kegelförmigen Betonausbruchs (Feuchtebedingungen: I = trocken, II = gesättigt, III = Übergangszone)

### 7.7.11 Ausblick

Einen ersten Anhaltspunkt für eine mögliche Ursache der Feuchteempfindlichkeit des Verbundes von Epoxy 1 ist der Effekt des „Blushings“, der von epoxidharzbasierten Beschichtungssystemen her bekannt ist, die bei Raumtemperatur durch Aminhärtung aushärten (kalthärtende Systeme). Hierbei reagieren Teile des Härter an der Oberfläche der aufgetragenen Beschichtung mit dem  $\text{CO}_2$  und dem Wasserdampf der Atmosphäre.

---

Es kommt zu einer Bildung von Carbamat ( $\text{NH}_3\text{CONH}$ ), einer weißlichen, wächsernen Schicht auf der Oberfläche der Beschichtung [40]. Diese Schicht ist mechanisch leicht zu entfernen. Deren Verbundfestigkeit darf als vernachlässigbar angenommen werden.

Eine vertiefte Untersuchung des Effekts der feuchtebedingt verminderten Verbundfestigkeit und deren Auswirkung auf das Tragverhalten epoxidharzbasierter Verbunddübelssysteme unter dauerhafter Lasteinwirkung erfordert umfangreiche Umbauarbeiten an den Versuchsanlagen des IWB. Sie können somit nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein.

## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis eines Forschungsvorhabens zur Bestimmung des Tragverhaltens von Verbunddübelssystemen unter Dauerlast am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart. Die Arbeit beschreibt die wichtigsten Forschungsaktivitäten seit 2008 und bildet die Zwischenbilanz zum Zeitpunkt einer Neuausrichtung des Forschungsvorhabens im Frühjahr 2013, die aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse notwendig wurde.

Innerhalb dieses Zeitraums lässt sich das Forschungsvorhaben in zwei aufeinander folgende Teile gliedern. Das Ziel des ersten Teils bestand darin, nach dem Unglück im Bostoner Ted-Williams-Tunnel im Jahr 2006 so rasch wie möglich ein Prüfverfahren zu entwickeln und zu validieren, das innerhalb praxistauglicher Prüfzeiten eine sichere Einschätzung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung ermöglichen kann. Hierzu musste kurzfristig eine schnelle und sichere Methode zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit der sich auf dem Markt befindlichen, bauaufsichtlich zugelassenen Verbunddübelssysteme unter dauerhafter, zentrischer Lasteinwirkung gefunden und überprüft werden. Zu diesem Zweck wurde ein Verfahren verwendet, das u.a. im Rahmen der Dauerhaftigkeitsuntersuchung von mit Innendruck beaufschlagten Kunststoffrohren nach DIN EN ISO 1167 in Kombination mit DIN EN ISO 9080 Anwendung findet.

Diesem Ansatz folgend wurden Verbunddübelssysteme untersucht. Hierzu wurden die Dübel mit verschiedenen hohen zentrischen Zuglasten belastet und im Anschluss die Dübelverschiebung und die Zeitdauer bis zum Versagen aufgezeichnet. Ausgehend von einem Lastniveau nahe der Kurzzeitfestigkeit der Systeme wurde mit jeder weiteren Versuchsserie die Dauerlast schrittweise reduziert. Im Anschluss wurden die ermittelten Datenpaare (Kraft/Standzeit) ausgewertet und überprüft, ob die Qualität der Ergebnisse die Anwendung eines Extrapolationsansatzes erlaubt. Im Gegensatz zum Standzeitverhalten von mit Innendruck beaufschlagten Kunststoffrohren ist das Standzeitverhalten der untersuchten Dübelssysteme innerhalb des betrachteten Lastbereichs jedoch unstetig. Dadurch kann bei keinem der Systeme eine Extrapolation des realen Verhaltens auf 50 Jahre erfolgen.

Die Ergebnisse lassen zudem vermuten, dass die Annahme einer sich über die gesamte Einbindetiefe erstreckenden, gleichmäßigen Spannungsverteilung zwischen Mörtel und Beton unter Dauerlast nicht zulässig ist. Dies stellt jedoch die Grundannahme der aktuell gültigen Prüfnormen in Frage und erfordert genauere Untersuchungen zum Spannungsverlauf und zur Spannungsumlagerung von dauerbelasteten Verbunddübeln.

Zur Überprüfung dieses Sachverhaltes wurden in einem zweiten Teil des Forschungsvorhabens umfangreiche Versuche mit dauerhafter, zentrischer Lasteinwirkung unter eindeutig definierten Randbedingungen durchgeführt, bei denen die Untersuchung unterschiedlicher Einflüsse auf das Dauerstandverhalten im Fokus standen. Aufgrund der besonderen Ausprägung ihres Dauerstandverhaltens erfolgte dabei eine Beschränkung auf epoxidharzbasierte Verbunddübelssysteme. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigten die Unzulässigkeit der Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung bei diesen Systemen unter den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Randbedingungen.

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit in Kurzform aufgeführt:

### a) Standzeituntersuchungen

- I. Das Standzeitverhalten ist innerhalb des möglichen Lastspektrums (0 kN bis  $N_u$ ) nicht stetig und kann vereinfachend in drei verschiedene Lastbereiche unterteilt werden. Dabei kann das Dauerstandverhalten nicht über Bereichsgrenzen hinweg extrapoliert werden. Auf Gebrauchslastniveau erfolgt dabei selbst auf dem obersten

Lastniveau in praxisrelevanten Versuchsdauern kein Versagen.

II. Durch Rissbildung und -entwicklung im Beton ist die effektive Einbindetiefe unter Dauerlast eine zeitlich und örtlich veränderliche Größe. Durch ausgeprägte Steifigkeitsänderungen und den damit verbundenen Lastumlagerungen innerhalb des Systems während einer dauerhaften Lasteinwirkung ist die effektive Einbindetiefe (statisch wirksamer Teil) nicht mehr identisch mit der nominellen Einbindetiefe beim Setzen. Hieraus ergeben sich veränderte Tragfähigkeiten sowohl unter Kurzzeit- als auch unter Langzeitbelastung. Dies gilt insbesondere für Mörtel mit höheren Festigkeiten und höheren Steifigkeiten.

III. Die Kurzzeitfestigkeit  $N_{u,m}$  stellt unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit nur bedingt eine sinnvolle Bezugsgröße dar, weil die Dübelssysteme bereits auf geringeren Lastniveaus (ca.  $0,4 N_{u,m}$  -  $0,6 N_{u,m}$ ) als versagt gelten müssen. („Switch-Lastniveau“, vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.3). Dieses Lastniveau stellt ungefähr die Grenze des linear-elastischen Verhaltens in den Referenzversuchen dar.

b) Dauerlastversuche

I. Die Feuchtecondition des Betons hat bei dem untersuchten epoxidharzba-  
sierten Verbunddübelssystem einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der  
Verbundfestigkeit. Es ist bekannt, dass Feuchtigkeit auf der Oberfläche der Bohr-  
lochwand die Ausbildung des Verbundes zwischen Verbundmörteln und Beton er-  
heblich stören kann. Untersuchungen an diesem System haben hier jedoch gezeigt,  
dass es keiner Benetzung der Oberfläche des Bohrlochs bedarf, sondern dass al-  
lein das Vorhandensein von Wasser im umgebenden Porenraum nahe der Ver-  
bundfläche zwischen Mörtel und Beton ausreicht, um die Ausbildung des Verbun-  
des während des Aushärtens des Mörtels signifikant zu stören. Demnach genügt  
es, wenn Feuchte in Form von Wasserdampf durch das Porennetz an die Kontakt-  
fläche zwischen Mörtel und Beton herantritt.

II. Selbst auf Verschiebungsniveaus, die betragsmäßig das Ringspaltmaß deut-  
lich übersteigen, kann sich dem Anschein nach ein stabiler Systemzustand einstel-  
len (Endstabilisierung, vgl. Kapitel 7, Abschnitt 7.2), der in absehbarer Zeit kein  
Versagen erwarten lässt. So wurde in der Mörtelschale eines nicht versagten Dü-  
bel-systems eine Rissbildung beobachtet, die ein Tragverhalten nach Abbildung 8.1  
nahelegt. Unterstellt man, dass die Verbundfestigkeit (linke Bildhälfte, gelb gestri-  
chelt, (1)) sowie der Kraftübertrag (2) entlang der Einbindetiefe nicht konstant ist,  
sondern wie abgebildet mit zunehmender Tiefe abnimmt (heller = höher), bei-  
spielsweise infolge einer Beeinflussung durch Feuchte, dann ist unter einer anstei-  
genden Last (rechte Bildhälfte) ein Wechsel zum druckstrebenartigen Tragsystem  
denkbar. Hierbei versagen in Bereichen hoher Verbundfestigkeiten zuerst die  
Scherflächen der Mörtelzähne (3). Dadurch lagern sich Lasten in unbelastete Teile  
des Dübels um. In diesen Bereichen erfolgt ein Versagen des Verbundes und nicht  
der Mörtelzähne. Es bildet sich eine Druckstrebe aus (4), die sich in tiefer liegenden  
Bereichen über die Gewindevverzahnung gegen den Dübel abstützt (5) und in den  
darüber liegenden Bereichen über Verbundspannungen (grün, (6)) gegen den Be-  
ton. Dies könnte der Mechanismus hinter dem außergewöhnlichen Verschiebungs-  
verhalten der Versuche e1\_RS18\_VV sein, das auf Grundlage der im Rahmen die-  
ser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht geklärt werden konnte (siehe Kapi-  
tel 7, Abschnitt 7.4).

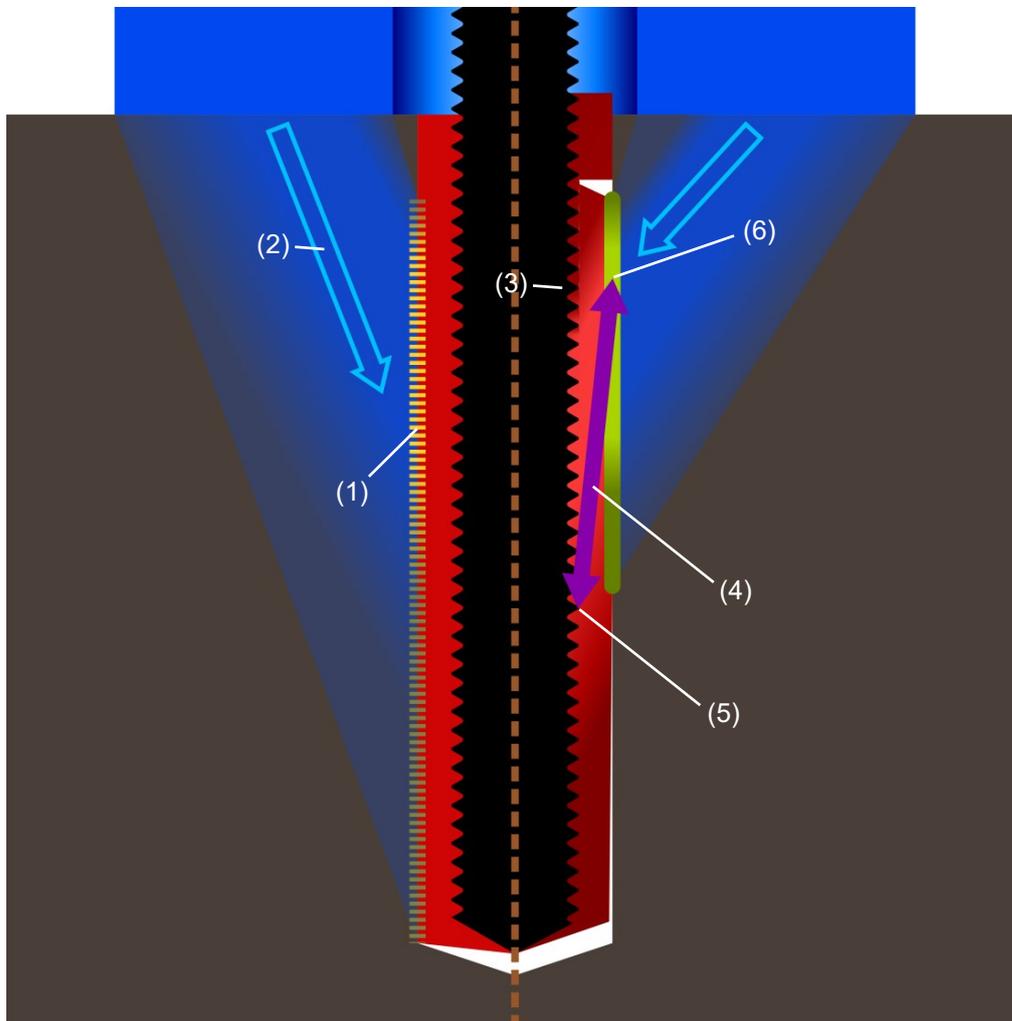
III. Aus vorgenanntem Sachverhalt folgt, dass aus dem Verschiebungsverhalten  
des Gesamtsystems in Standzeitversuchen keine verlässliche Aussage zum reinen  
Materialverhalten des Mörtels gemacht werden kann. Vielmehr muss das System-  
verhalten betrachtet werden, insbesondere die Adhäsion zwischen Mörtel und

Bohrlochwandung. Dieses verhält sich un stetig hinsichtlich Zeit, Verschiebung und Lastniveau.

c) Versuchsdurchführung

I. Die Prüfung des Verhaltens von Verbunddübelssystemen unter dauerhafter Lasteinwirkung muss künftig auch unter realitätsnahen Abstützungsverhältnissen (weite Abstützung) erfolgen, um die infolge einer Rissbildung ungleichmäßigen Spannungsverteilungen zu berücksichtigen. Die bis dato übliche enge Abstützung, wie sie nach aktuell gültigen Prüfnormen zulässige ist, darf bei der Prüfung des Gesamtsystems nur zur Anwendung kommen, sofern garantiert wird, dass sich die Spannungsverteilung auf Gebrauchslastniveau nicht oder nur wenig ändert. Dies ist nur dann der Fall, wenn das System im linear elastischen Bereich bleibt.

II. Der Feuchtezustand des Versuchskörpers kann die Versuchsergebnisse beeinflussen. Bei Verbundmörteln, deren Verbundfestigkeit empfindlich gegenüber Feuchteinwirkung ist, müssen die Versuche unter definierter Feuchteconditionierung durchgeführt werden.



- (1) Verbundfestigkeit, (2) Kraft unterhalb der Druckplatte der engen Abstützung,  
 (3) Scherfläche entlang der Gewindestange, (4) Druckstrebe,  
 (5) Lastübertrag durch Verzahnung und (6) Adhäsion

**Abbildung 8.1:** schematische Gegenüberstellung eines druckstrebenartigen Lastabtrags (rechts) im Falle eines partiellen Verbundversagens sowie eines rein stoffschlüssigen Lastabtrags (links)

## 9 Ausblick

Das Standzeitverhalten der untersuchten Verbunddübelssysteme eignet sich nur bedingt dazu, durch Extrapolation ein ertragbares Dauerlastniveau vorherzusagen. Ohne eine solche Prognosemöglichkeit ist jedoch keine Aussage zur realen zeitabhängigen Tragsicherheit dieser Systeme während der planmäßigen Lebensdauer möglich. Jedoch scheint mit der „Switch-Last“ eine obere Grenzlast für die Dauerhaftigkeit vorhanden zu sein, unterhalb derer es zu keinem Versagen mehr kommt. Da oberhalb dieser Grenzlast die Systeme bereits als „versagt“ gelten müssen, sind sämtliche Betrachtungen zur Standsicherheit ausschließlich auf Lastniveaus sinnvoll, die unterhalb dieses Grenzwerts liegen.

Im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit ist diese „Switch-Last“ deutlich geringer. Für das System mit Epoxy 1 beträgt diese bei enger Abstützung ca.  $0,5 N_{u,m}$  und bei weiter Abstützung ca.  $0,4 N_{u,m}$ . Für die Standsicherheit bestehender Anwendungen unter dauerhafter Lasteinwirkung ist somit entscheidend, ob durch die bislang angewendeten Prüfverfahren nach ETAG 001 und AC 308 das zulässige Lastniveau auf die charakteristische „Switch-Last“ begrenzt wurde und damit ein ausreichender Sicherheitsabstand gegeben ist. Dies kann z.B. dadurch geprüft werden, dass der Wert  $N_{sust}$ , der als Prüflast für Dauerlastversuche im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Verbunddübelssysteme nach ETAG 001 bzw. AC 308 dient (vgl. Kapitel 2), mit der „Switch-Last“ dieses Mörtels bei weiter Abstützung verglichen wird. Hierfür liegen jedoch bislang nur Werte aus den Standzeitversuchen mit Epoxy 1 vor (Kapitel 6, Abschnitt 6.3). Wie aufgezeigt kann die angenommene „Switch-Last“ bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Systemen annähernd aus den Last-Verschiebungskurven der kurzzeitigen Bruchversuche abgeleitet werden (vgl. Kapitel 6, Abschnitt 6.5). Für bereits zugelassene Systeme muss die Verschiebungsmessung jedoch mit hierfür ausreichender Genauigkeit erfolgt sein. Dies ist erfahrungsgemäß meist nicht der Fall (vgl. Kapitel 2, Abschnitt 2.4.2). Das vorrangige Forschungsziel ist damit die Ermittlung bzw., aus Sicht der Hersteller, die Erhöhung des „Switch-Lastniveaus“ für unterschiedliche Randbedingungen wie z.B. Feuchtigkeit, Temperatur und Reinigung.

Die SiS-Versuche nach Kapitel 7, Abschnitt 7.6, haben gezeigt, dass für epoxidharzbaute Systeme kein „Switch-Effekt“ zu erwarten ist, wenn das Standzeitverhalten weitgehend durch das reine Materialverhalten des Mörtels bestimmt ist und nicht durch die Ausbildung des Verbundes. Diese Verbunddübel zeigen unter solch idealen Bedingungen mit nahezu gleichmäßigem Verbund einen deutlich geringeren Verschiebungsfortschritt als ein im Beton gesetzter Verbunddübel. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen somit, dass eine sichere Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Verbunddübelssystemen nicht nur durch Standzeituntersuchungen erfolgen kann, sondern dass ebenso ein ggf. vorhandenes un stetiges Adhäsionsverhalten entlang der Bohrlochwand berücksichtigt werden muss. Durch Standzeituntersuchungen lassen sich jedoch wesentliche Erkenntnisse zum Tragverhalten von Verbunddübeln unter dauerhafter Lasteinwirkung gewinnen, die unverzichtbar sind, um zukünftige Forschungsansätze beurteilen zu können.

## 10 Englische Zusammenfassung / Summary

The presented work is the result of a research project, the aim of which was to determine the load-bearing behavior of bonded anchor systems under sustained axial tensile loads at the Institute of Construction Materials (IWB), University of Stuttgart. The thesis describes the most important research activities since 2008 and finally draws up an interim balance at the point, when a reorientation became necessary in spring 2013, due to the obtained research results.

The research project was divided into two consecutive parts. The aim of the first part was to develop and to validate a test procedure that enables a reliable, direct determination of the durability of bonded anchor systems under sustained loads within practicable test durations. For this purpose, a test method was chosen, whose principle is commonly used for the durability testing of plastic pipes subjected to constant internal pressure (e.g. according to DIN EN ISO 1167 in conjunction with DIN EN ISO 9080).

Using this testing approach, commercially available bonded anchor systems were tested in a similar way. The anchors were loaded with different levels of high axial tensile loads, starting with load levels close to the individual short-term strength of the systems. The anchor displacements and times-to-failure were recorded. It was then examined whether an extrapolation method could be successfully used to predict the time-to-failure behavior up to the envisaged service lifetime of 50 years.

The most important finding was that the time-to-failure behavior of all tested bonded anchor systems are discontinuous, at least at one point of the load range between 0 kN and the individual short-term-strength. This is in contrast to the time-to-failure behavior of plastic pipes under constant internal pressure.

As a consequence, no meaningful extrapolation up to the intended service lifetime could be performed for any of the tested anchor systems. The results also show that the assumption of a uniform stress distribution between mortar and concrete along the entire embedment depth is questionable under sustained loads. This contradicts one of the basic assumptions of the currently valid test procedures according to ETAG and AC for assessing the durability of bonded anchor systems. In addition, already at a maximum of approximately 50 % of the individual short-term strength  $N_{u,m}$  all systems must be considered as failed under the aspect of durability under sustained loads.

The aim of the second part of the research project was to examine these issues. The focus was on various influences on the long-term behavior of an epoxy resin-based bonded anchor system under sustained loads. The results of these investigations confirmed the previous findings. They also showed that additional test methods and test parameters must be taken into account in future tests of bonded anchor systems.

The following are the most important findings from the present work in brief:

### a) Time-to-failure studies

I. The time-to-failure functions of all tested anchor systems are discontinuous functions. The load-range between 0 kN and  $N_{u,m}$  must be subdivided into at least three partial load ranges with specific time-to-failure behavior. These specific time-to-failure behavior cannot be extrapolated beyond their limits. In the lowest load range, including the service load range, no failure occurs within practicable test durations even at its upper limit. Therefore, no time-to-failure data for the extrapolation can be obtained from this most relevant load range.

II. Due to time-dependent deformations and progression of cracks in the concrete, the effective embedment depth may decrease under sustained loads, due to the resulting change in stiffness changes and load transfer within the system.

In this case, the effective embedment depth no longer corresponds to the nominal embedment depth at the time of installation. This will lead to changes in the load bearing capacity, both under short-term loads and under sustained loads.

III. From the aspect of durability under sustained loads, the short-term strength  $N_{u,m}$  is not a relevant reference value, since the anchor systems are already considered to have failed at load levels close to  $0.5 N_{u,m}$ . For the tested anchor systems, this load level approximately represents the upper load limit of linear-elastic behavior in short-term reference tests.

#### b) Sustained-load tests

I. For the examined epoxy resin-based bonded anchor system, the moisture state within the concrete specimen has a significant influence on the formation of the bond between the mortar and the concrete.

It is known that water covering the surface of the borehole can prevent proper bond formation between mortar and concrete. However, the investigations have shown that at the time of curing, even the water present in pores near the contact area between mortar and concrete can also significantly affect the bond formation. This means that even water vapor, which is transported to the contact area through the pore network of the concrete, can significantly disturb the bond formation.

II. According to the measured displacement characteristics, for epoxy resin-based systems, a stable system state may occur even at anchor displacements that exceed the size of the annular gap. In these cases, the displacement curves do not indicate any kind of system failure in the foreseeable future.

III. According to the findings mentioned above, it is not possible to derive any material property of a mortar itself (or vice versa) from the displacement behavior of an entire bonded anchor system.

#### c) Testing

I. In the future, bonded anchor systems under sustained loads must be tested under realistic support conditions (unconfined setup) in order to account for the potential changes in the stress distribution inside the concrete due to cracks.

A confined setup, as used for long-term testing according to the current test standards (ETAG / AC), may only be used if it is ensured that the stress distribution under service loads is almost identical to the stress distribution under test loads. This is the case when the system remains in the linear-elastic state.

II. The moisture conditions inside the test specimen may influence the test results. For mortar systems whose bond strengths are sensitive to moisture, the tests must be carried out in test specimens with well-defined moisture conditions.

III. The investigations show that the time-to-failure method does not allow a reliable evaluation of the durability of the tested bonded anchor systems under sustained loads within practicable test durations. However, the results show that lifetime studies can provide important insights into the load-bearing behavior of bonded anchor systems under sustained loads, which are essential for the evaluation of future research approaches.

## 11 Literaturübersicht

- [1] Eligehausen, R., Mallée, R.: Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2000
- [2] Raupach, M., Orlowsky, J.: Erhaltung von Betonbauwerken, Baustoffe und ihre Eigenschaften. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2008
- [3] Mészáros, J.: Das Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001
- [4] Hülder, G.: Zur Aushärtung kalthärtender Reaktionsharzsysteme für tragende Anwendungen im Bauwesen. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008
- [5] National Transportation Safety Board: Ceiling Collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel, Boston, Massachusetts, July 10, 2006. Highway Accident Report NTSB/HAR-07/02
- [6] Ocel, J.M., Hartmann, J., Fuchs, P.: I-90 Seaport Portal Tunnel Partial Ceiling Collapse Investigation: Sustained Load Behavior of Powers Fasteners Power-Fast+ Adhesive Anchors. TFHRC Report, Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, United States, 2007
- [7] Lehr, B.: Tragverhalten von Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand mit Verbundankern unter zentrischer Belastung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001
- [8] Appl, J.: Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009
- [9] European Organisation for Technical Approvals: ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Part 1: Anchors in General, First Amendment November 2006, Brüssel 2006
- [10] European Organisation for Technical Approvals: ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Part 5: Bonded Anchors, Second Amendment February 2008, Brüssel 2008
- [11] European Organisation for Technical Approvals: ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex A: Details of test, Second Amendment November 2006, Brüssel 2006
- [12] European Organisation for Technical Approvals: ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex C: Design Methods for Anchorages, Second Amendment November 2006, Brüssel 2006
- [13] ICC ES: AC 308: Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete. ICC Evaluation Services, Inc., Whittier, California, 2008
- [14] Ehrenstein, G.W.: Polymer Werkstoffe, Struktur-Eigenschaften-Anwendung. Carl Hanser Verlag, München 2011
- [15] Habenicht, G.: Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [16] Fuchs, W., Eligehausen, R.: Zum Kriechverhalten von Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung. Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen - Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt, Hamburg: Libri BOD, 1999
- [17] Eligehausen, R., Silva, J.F.: The Assessment and Design of Adhesive Anchors in Concrete for Sustained Loading. Hilti Corporation, Schaan, Lichtenstein, 2008

- 
- [18] Findley, W.N., Lai, J.S., Onaran, K.: Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials. North-Holland Publishing Company, 1976
- [19] DIN EN ISO 1167-1: Rohre, Formstücke und Bauteilkombinationen aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten - Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren. Ausgabe 2006
- [20] DIN EN ISO 9080: Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme - Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation. Ausgabe 2003
- [21] DIN EN ISO 899-1: Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuche. Ausgabe 2003
- [22] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Ausgabe 1996
- [23] Unterweger, K. D. (1999): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von chemischen Verankerungen. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur, Wien 1999
- [24] Mauthe, P.: Neue Verbundanker – Generation mit Epoxyacrylat, Schweizer Ingenieur und Architekt. Sonderdruck aus Heft 13/1987
- [25] Petrie, E.M.: Epoxy Adhesive Formulations. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006
- [26] Cook, R. A., Kunz, J., Fuchs, W., Konz, R. C. (1998): Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. ACI Structural Journal, Vol. 95 No. 1, January-February 1998
- [27] Lehr, B. und Eligehausen, R. (1998): Vorschlag eines Bemessungskonzeptes für Verbundanker. IWB-Bericht Nr. 20/25-98/6, Stuttgart 1998
- [28] Baumann, H.: Leime und Kontaktkleber, Theoretische Grundlagen, Eigenschaften - Anwendung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1967
- [29] Ranisch, E. H.: Zur Tragfähigkeit von Verklebung zwischen Baustahl und Beton – geklebte Bewehrung. Dissertation, TU Braunschweig, 1982
- [30] Rössle, M., Meszaros, J. (1998/1): „Ausziehversuche an Einzelbefestigungen mit Injektionsdübeln M16: Einfluss von Bohrlochdurchmesser und Lage der Ankerstange im Bohrloch“, IWB-Bericht Nr. 98/8-2/5, Stuttgart 1998, nicht veröffentlicht
- [31] Adolf Schnorr GmbH + Co. KG: Die Tellerfeder im Griff. Sindelfingen 2004
- [32] Adolf Schnorr GmbH + Co. KG: Tellerfedern: Diagramme. Sindelfingen 1997
- [33] DIN 976-1: Mechanische Verbindungselemente Gewindebolzen - Teil 1: Metrisches Gewinde. Ausgabe 2002
- [34] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Ausgabe 2005
- [35] DIN EN 206-1: Beton -Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe 2005
- [36] Höhler, M.T.: Behaviour and Testing of Fastenings to Concrete for Use in Seismic Applications. Dissertation, Universität Stuttgart, 2006
- [37] Davis, T.M.: Sustained Load Performance of Adhesive Anchor Systems in Concrete. Dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida, 2012

- [38] Bezečný, L.: Einfluss der Betonfeuchte auf das Tragverhalten von Verbunddübeln (Epoxidharz-System). Jahresbericht 2005/07 Activities, IWB-Mitteilung 2008/1, IWB Universität Stuttgart, 2008
- [39] Pukl, R., Ozbolt, J., Eligehausen, R.: Load-Carring Behavior of Bonded Anchors Based on FEM-Analysis. Report No.:98/3-2/3, IWB Universität Stuttgart, Oktober 1998
- [40] Burton, B.L.: Amine-Blushing Problems? No Sweat!. Huntsman Corporation, The Woodlands, Texas, 2001





EPOXY 1		Gewindestange	Versuchskörper	Temperatur				Aushärtung	Serienkennungen A: e1_105_eng_N <sub>u,m</sub> B: e1_105_eng										
				Kennung / Last [kN]	Versuchsnummer	Festigkeits- klasse	Zylinder Beton (C20/25)		d <sub>0</sub> [mm]	h <sub>ver</sub> [mm]	Setz-Temp. [°C]	Aufheizdauer [h]	Prüf-Temp. [°C]	Aushärtedauer [h]	Charge	f <sub>yk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]	N <sub>u,i</sub> [kN]	N <sub>u,m</sub> [kN]
A	1	10.9	Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C5*	1*	1*	1**	-	-	-	-	-
	2	1**																	
	3	1**																	
	4	1**																	
B-1 75,0	1		Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C2	34,9	4	0,34	0,32	105	293	56,9	
	2	0,29																	
	3	0,33																	
B-2 65,0	1		Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C2	35,5	7	0,50	0,55	200	270	100	
	2	0,58																	
	3	0,56																	
B-3 55,0	1		Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C2	34,9	4	0,30	0,29	> 8020	> 8020	-	
	2	0,28																	
	3	0,29																	
B-4 46,8	1		Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C2	34,9	4	0,16	0,17	> 9660	> 9660	-	
	2	0,20																	
	3	0,16																	
B-5 30,0	1		Zylinder	14	105	20	18	43	50	24	C2	34,9	5	0,07	0,08	> 9810	> 9810	-	
	2	0,08																	
	3	0,08																	
														▲ s <sub>0,i</sub> [mm]	▲ s <sub>0,m</sub> [mm]	▲ t <sub>u,sust,i</sub> [h]	▲ t <sub>u,sust,m</sub> (log) [h]		

\* Versuche wurden erst im Nachgang in Charge C5 durchgeführt  
 \*\* Stahlversagen

**Tabelle A-1.3:** Parameterübersicht, Versuchsreihe e1\_105\_eng



VINYL 1		Gewindestange		Versuchskörper		Temperatur		Aushärtung		Serienkennungen A: v1_base_N <sub>u,m</sub> B: v1_base										
▼ Kennung / Last [kN]	▼ Versuchsnummer	10,9 Festigkeits- klasse	12,9	Zylinder Beton (C20/25)	d <sub>0</sub> [mm]	h <sub>ver</sub> [mm]	Setz-Temp. [°C]	Aufheizdauer [h]	Prüf-Temp. [°C]	24 Aushärtedauer [h]	▼ Charge	▼ f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	▼ B-Alter [M]	▼ N <sub>u,i</sub> [kN]	▼ N <sub>u,m</sub> [kN]	▼ COV	▼ s <sub>u,i</sub> [mm]	▼ s <sub>u,m</sub> [mm]		
A	1										C2	34,9	3	62,5	66,0	3,98	0,71	0,84		
	2													68,7						0,94
	3													65,9						0,77
	4													67,1						0,93
B-1 33,0	1										C2	35,5	8	0,11	0,13	58	134			
	2													0,16				192		
	3													0,11				219		
B-2 30,0	1										C2	34,9	3	0,13	0,23	> 5451	86			
	2													0,26				1359		
	3													0,31				5,5		
B-3 27,2	1										C2	35,5	8	0,11	0,12	> 6789	-			
	2													0,10				> 6789		
	3													0,16				691		
B-4 15,0	1										C2	34,9	3	0,10	0,09	> 7561	-			
	2													0,09				> 7561		
	3													0,08				> 7561		
														▲ s <sub>0,i</sub> [mm]	▲ s <sub>0,m</sub> [mm]	▲ t <sub>u,sust,i</sub> [h]	▲ t <sub>u,sust,m</sub> (log) [h]			

Tabelle A-1.5: Parameterübersicht, Versuchsreihe v1\_base

VINYL 2		Gewindestange	Versuchskörper		Temperatur				Aushärtung	Serienkennungen A: v2_base_N <sub>u,m</sub> B: v2_base									
▼ Kennung / Last [kN]	▼ Versuchsnummer	10.9 Festigkeits- klasse 12.9	Zylinder Beton (C20/25)	d <sub>0</sub> [mm] 14	h <sub>erf</sub> [mm] 80	Setz-Temp. [°C] 20	Aufheizdauer [h] 18	Prüf-Temp. [°C] 43	50	24 Aushärtedauer [h]	Charge	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]	N <sub>u,i</sub> [kN]	N <sub>u,m</sub> [kN]	COV	s <sub>u,i</sub> [mm]	s <sub>u,m</sub> [mm]	
A	1										C2	34,9	4	55,3	56,8	4,61	0,54	0,63	
	2												59,8						0,57
	3												54,0						-*
	4												58,0						0,77
B-1 42,6	1										C2	34,9	4	0,27	-	13	< 1,1		
	2												0,29			3,2			
	3												-**			< 0,033			
B-2 39,7	1										C2	34,9	5	0,24	0,26	152	127		
	2												0,26			104			
	3												0,28			131			
B-3 36,9	1										C2	34,9	5	0,26	0,22	66	-		
	2												0,19			> 9431			
	3												0,21			> 9431			
B-4 23,4	1										C2	35,5	8	0,14	0,13	> 6730	-		
	2												0,13			> 6730			
	3												0,13			> 6730			
													▲ s <sub>0,i</sub> [mm]	▲ s <sub>0,m</sub> [mm]	▲ t <sub>u,sust,i</sub> [h]	▲ t <sub>u,sust,m</sub> (log) [h]			

\* Messwert fehlerhaft

\*\* Ausfall während der ersten zwei Versuchsminuten

Tabelle A-1.6: Parameterübersicht, Versuchsreihe v2\_base

EPOXY 1		Gewindestange			Versuchskörper				Temperatur			Aushärtung	Serienkennungen								
		Kennung / Last [kN]	Versuchsnummer			Festigkeits- klasse	Beton (C20/25)	d <sub>0</sub> [mm]			h <sub>er</sub> [mm]	Setz-Temp. [°C]	Aufheizdauer [h]	Prüf-Temp. [°C]	Aushärtedauer [h]	Charge	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]			
		▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▲	▲	
		10.9	12.9	14.9	Zylinder	13	14	18	24	80	20	18	43	24	Charge	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]	s <sub>0,i</sub> [mm]	s <sub>0,m</sub> [mm]		
A 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C4	39,0	6	0,22	0,22		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕				0,22			
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕				0,22			
B 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C1	> 38,4	43	0,19	0,21		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,21				
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,25				
C 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C1	> 38,4	43	0,23	0,20		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,18				
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,20				
D 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C1	> 38,4	31	0,17	0,16		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,16				
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,14				
E 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C5	'*	'*	0,16	0,17		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,20				
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,16				
F 50,0	1	✕			✕					✕	✕	✕	✕	✕	C5	'*	'*	0,13	0,13		
	2	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,13				
	3	✕			✕					✕	✕	✕	✕				0,14				
																		▲	▲		
																		s <sub>0,i</sub>	s <sub>0,m</sub>	[mm]	[mm]

\* keine Angaben verfügbar

**Tabelle A-1.7:** Parameterübersicht, Versuchsreihe e1\_RS

EPOXY 1		Gewindestange			Versuchskörper								Temperatur				Aushärtung	Serienkennungen A: e1_RS14_SiS_N <sub>u,m</sub> B: e1_RS14_SiS C: e1_RS15_SiS D: e1_RS19_SiS										
		▼ Kennung / Last [kN]	▼ Versuchsnummer	▼ 10.9	▼ 12.9	▼ 14.9	▼ Zylinder	▼ Würfel	▼ Zylinder	▼ 14	▼ 15	▼ 19	▼ 80	▼ 66	▼ 55	▼ 45	▼ 34	▼ 20	▼ 18	▼ 43	▼ 24	▼ N <sub>u,i</sub> [kN]	▼ N <sub>u,m</sub> [kN]	▼ COV	▼ s <sub>0,i</sub> [mm]	▼ s <sub>0,m</sub> [mm]		
A-1	1																				62,4	61,3	2,87	-	-			
	2																				59,3						-	
	3																				62,3						-	
A-2	1																				76,5	77,7	5,94	-	-			
	2																				82,8						-	
	3																				73,8						-	
A-3	1																				97,0	98,0	1,45	-	-			
	2																				97,3						-	
	3																				99,6						-	
A-4	1																				104,2*	-	-	-	-			
	2																				103,8*						-	
	3																				105,5*						-	
B-1 50,0	1																				0,12	0,11		-				
	2																				0,11						-	
	3																				0,10						-	
B-2 70,0	1																				0,23	0,22		-				
	2																				0,21						-	
	3																				0,24						-	
B-3 80,0	1																				0,32	0,32		-				
	2																				0,30						-	
	3																				0,33						-	
C 50,0	1																				0,13	0,12		-				
	2																				0,11						-	
	3																				0,11						-	
D 50,0	1																				0,12	0,12		-				
	2																				0,11						-	
	3																				0,13						-	
																					▲ s <sub>0,i</sub> [mm]	▲ s <sub>0,m</sub> [mm]						

\* Abbruch vor Stahlversagen

**Tabelle A-1.8:** Parameterübersicht, Versuchsreihe e1\_RS\_SiS

EPOXY 1		Gewindestange			Versuchskörper				Temperatur				Aushärtung				Feuchte- konditionierung				Serienkennungen A: e1_FE_zyl_SL_tast B: e1_FE_zyl_SL C: e1_FE_würfel_N <sub>u,m</sub> D: e1_FE_zyl_N <sub>u,m</sub> E: e1_FE_RS18																					
Kennung / Last [kN]	Versuchsnummer	10.9	12.9	14.9	Zylinder	Würfel	14	18	80	50	20	17	10	36	18	24	43	168	144	24	9	5	keine	96	48	24	430	96	72	24	8	4	Charge	f <sub>yk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]	N <sub>u,i</sub> [kN]	N <sub>u,m</sub> [kN]	COV				
		Festigkeits- klasse	Beton (C20/25)	d <sub>s</sub> [mm]	h <sub>sp</sub> [mm]	Setz-Temp. [°C]	Aufheiz- dauer [h]	Prüf-Temp. [°C]	Aushärte- dauer [h]	Wässerungs- dauer [h]	Trocknungs- dauer [h]	Change	f <sub>yk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	B-Alter [M]	N <sub>u,i</sub> [kN]	N <sub>u,m</sub> [kN]	COV																									
A	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
B-1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
B-2	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
B-3	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
C-1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	C5	-*	-*	48,4	49,5	1,98			
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	50,1						
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	50,1							
C-2	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
C-3	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
C-4	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D-1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D-2	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

\* keine Angaben verfügbar  
 \*\* Wässerung nach dem Setzen des Dübels

**Tabelle A-1.9: Parameterübersicht, Versuchsreihe e1\_FE**