

AUFBETON

Bemessung der Verbundfuge von Aufbeton nach EOTA TR066

Die aktuelle europäische Norm für die Bemessung von Stahlbetontragwerken EN 1992-1-1 (EC2) [1] enthält Regeln für die Bemessung der Schubtragfähigkeit von Beton/Beton-Fugen von Halbbetonfertigteilen. Für die Bemessung von bewehrten Verbundfugen mit nachträglich installierten Schubverbindern ist hingegen EOTA TR 066 [2] der geeignete Bemessungsansatz.

In diesem Artikel wird die Thematik Aufbeton umfassend beleuchtet. Es wird die aktuelle Bemessungsvorschrift für Aufbeton näher betrachtet und auf die einzelnen Traganteile, die den Tragwiderstand einer Verbundfuge von Aufbeton beschreibt eingegangen. Darüber hinaus werden Hinweise zur Vorbereitung der Fugenoberfläche und Einbau der nachträglich installierten Schubverbinder auf Basis von TR 066 [2] gegeben. Schließlich werden Lösungswege aufgezeigt, wie eine Bemessung gesamthaft modelliert und berechnet werden kann. Hierbei verweisen wir auf das Aufbeton Modul der Hilti Bemessungssoftware PROFIS Engineering.



Abbildung 1 Eine typische Anwendung von Aufbeton im Hoch- und Tiefbau ist die Verstärkung oder Instandsetzung von Industriefußboden

Inhalt

1. Kurzfassung
2. Umsetzung einer Aufbeton Anwendung
3. Tragverhalten der Verbundfuge
4. Bemessung der Verbundfuge nach EOTA TR 066
5. Ein Schlüsselparameter - die Rautiefe R_t
6. Bemessungshilfen - Unterschiede zwischen EN 1992-1-1 und EOTA TR 066
7. Zusammenfassung

1 Kurzfassung

Der Einbau von neuen, nachträglichen Betonschichten (Aufbeton) gewinnt aufgrund des zunehmenden Bedarfs an Instandsetzung und Verstärkung bestehender Bauwerke immer mehr an Bedeutung.

Brückenquerschnitte, die durch eine neue Betonschicht verstärkt werden, sowie die Instandsetzung und Verstärkung bestehender Betonbauteile durch eine neue Betonschicht sind typische Beispiele für den Einsatz von Aufbeton, siehe Abbildung 2. Wenn die Schubspannungen in der Verbundfuge zwischen den Betonschichten, die zu unterschiedlichen Zeiten betoniert wurden, nicht ausreichend übertragen werden, ist die statische Tragsicherheit gefährdet.



a) Verstärkung oder Instandsetzung von Industrieböden



b) Instandsetzung einer Decke



c) Instandsetzung und Verstärkung einer Brückenfahrbahn

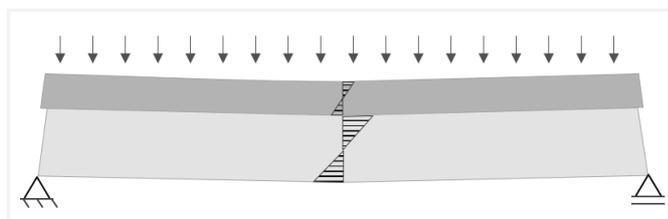
Abbildung 2 Eine typische Anwendung von Aufbeton im Hoch- und Tiefbau

Abbildung 3a zeigt den Spannungszustand eines Balkens ohne die Aktivierung von Schubspannungen zwischen den Betonlagen (unbewehrte Verbundfuge). In diesem Fall verhalten sich die Betonlagen unabhängig voneinander.

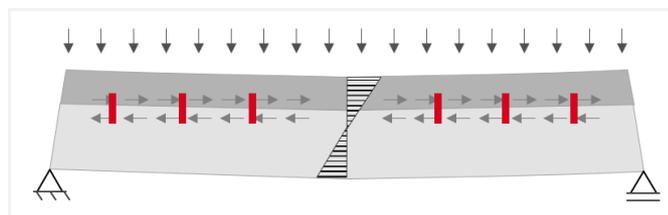
Dies ist eine Vereinfachung, da auch im Falle einer unbewehrten Verbundfuge ein Haftverbund zwischen den Betonschichten wirkt.

Der Haftverbund wird jedoch bereits bei relativen Verformungen von 0,03 mm bis 0,05 mm durch Rissbildung in der Verbundfuge beeinträchtigt.

Um eine monolithische Verbindung zu erzielen, werden in der Regel nachträglich installierte Schubverbinder vorgesehen. Dadurch können z.B. Biegedruck- und/oder Biegezugzonen vergrößert (konstruktive Verstärkung) oder die ursprünglichen Zonenhöhen wiederhergestellt werden (Sanierung), siehe Abbildung 3b.



a) **Ohne** die Aktivierung von Schubspannung



b) **Mit** der Aktivierung von Schubspannung

Abbildung 3 Gelenkig gelagerter Balken ohne und mit Aktivierung von Schubspannungen in der Verbundfuge

Das neue Bemessungskonzept nach EOTA TR 066 "Connector for strengthening of existing concrete structures by concrete overlay" [2] ermöglicht die Bemessung und Dimensionierung dieser Verbindungen und der Verbundfuge unter Berücksichtigung aller tragenden Komponenten (Kohäsion/Reibung, Verzahnung und Dübelwirkung) und weiterer produkt-spezifischer Faktoren.

Damit spiegelt EOTA TR 066 [2] den aktuellen Stand der Technik bei der Bemessung von Aufbeton Anwendungen mit nachträglich installierten Schubverbindern wider. Demgegenüber steht der EN 1992-1-1 (EC2) [1], der das individuelle Tragverhalten nachträglich installierter Schubverbinder nicht berücksichtigt.

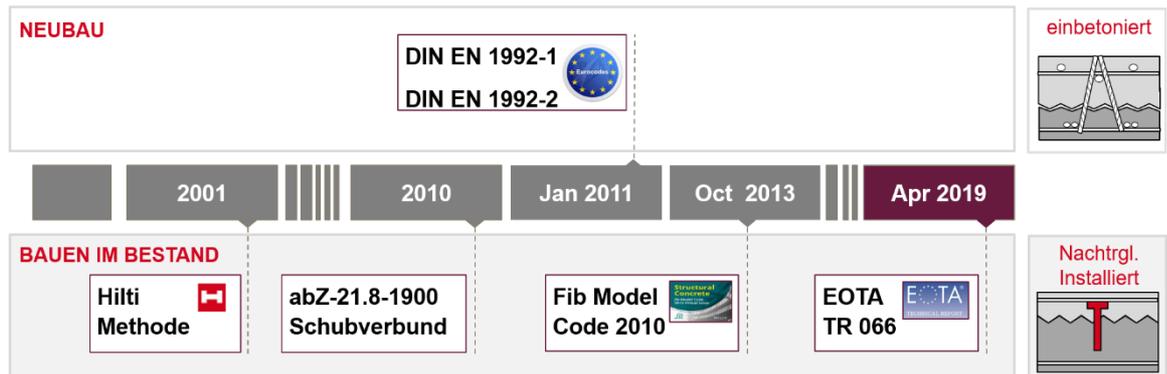


Abbildung 4 Der "lange Weg" von nachträglich installierten Schubverbindern bis zur Bemessung nach EOTA TR 066 [2]

Abbildung 4 zeigt den "langen Weg" von der Bemessung von nachträglichen installierten Schubverbindern mit der Hilti-Methode (2001) über die allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (2010) bis zum "fib Model Code" 2010 [3] und schließlich der EOTA TR 066 [4] im Jahr 2019.

2 Umsetzung einer Aufbeton Anwendung

Die Umsetzung einer Baumaßnahme mit Aufbeton kann grob vereinfacht in mehrere Arbeitsschritte unterteilt werden: Den Abbruch oder das Freilegen der vorhandenen, geschädigten Betonschicht, das Aufräumen der Oberfläche, den Einbau der nachträglich installierten Schubverbinder, das Einlegen der neuen Bewehrung und schließlich das Einbringen der neuen Betonschicht (Abb. 5).

Bevor wir auf den Bemessungsansatz von EOTA TR 066 [2] eingehen, geben wir einige wichtige Hinweise zur Oberflächenvorbereitung und zum nachträglichen Einbau von Schubverbindern, wie sie teilweise in der EOTA TR 066 [2] zu finden sind.

Je nach Land sind jedoch zusätzliche technische Richtlinien (z.B. ZTV-ING (Deutschland)), technische Baubestimmungen (z.B. EiT (EBA, Deutschland), technische Handbücher (z.B. Tunnel/ Geo-technik (Schweiz) oder Richtlinien und Vorschriften (z.B. RVS (Österreich)) in Verbindung mit nationalen Richtlinien und Normen zu berücksichtigen.

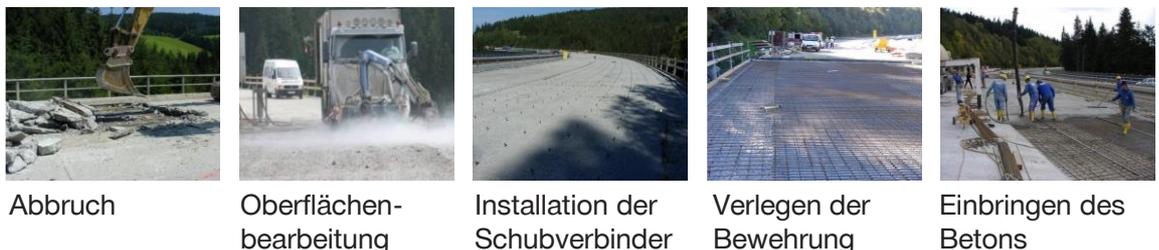


Abbildung 5 Vereinfachte Übersicht über die Ausführungsschritte einer Baumaßnahme mit Aufbeton

2.1 Vorbereitung der Fugenoberfläche und Einbau der nachträglich installierten Schubverbinder

Das Aufräumen der Fuge wird in der Regel durch Hochdruckwasserstrahlen durchgeführt. Andere Verfahren als das Hochdruckwasserstrahlen sind je nach örtlichen oder zusätzlichen Richtlinien nicht zulässig. Dies liegt daran, dass z. B. beim Aufräumen durch Fräsen Mikrorisse entstehen können und somit das Betongefüge zerstört werden kann. Es müssen freiliegende Zuschläge, die gut im Beton verankert sind, deutlich sichtbar sein [2]. Die geforderte, mittlere Rautiefe R_f muss dem spezifizierten Mindestwert entsprechen.

Die mittlere Rautiefe selbst kann nach dem Kaufmannschen Sandflächenverfahren oder mittels einer elektronischen, optischen Messung bestimmt werden [2]. Die prinzipielle Eignung des aufgerauten Altbetons ist durch Messung der Haftfestigkeit senkrecht zur Grenzfläche (Abreißfestigkeit) f_h zu überprüfen, wobei mindestens der Wert von $f_h \geq \min(1,5 \text{ N/mm}^2; f_{ctm})$ erreicht werden muss [2]. Der Prüfumfang für die Messung der Rautiefe und der Zugfestigkeit hat nach EOTA TR 066 [2] unter Berücksichtigung zusätzlicher Richtlinien, Baubestimmungen oder Vorschriften zu erfolgen, wobei insbesondere für die Messung der Rautiefe die offensichtlich am wenigsten aufgerauten Bereiche zu verwenden sind.

2.1.1 Anforderungen an die Sauberkeit der Fugenoberfläche

Der Arbeitsablauf muss so gestaltet werden, dass die Fugenoberfläche vom Zeitpunkt des Aufrauens bis zum Einbringen des Betons immer sauber bleibt [2]. Reifenabrieb und Verunreinigungen der Fugenoberfläche sind weitestgehend zu vermeiden. Besonders zu beachten ist, dass der Bohrstaub während des Bohrvorgangs ausnahmslos abgesaugt werden muss [2]. Wenn die Fugenoberfläche mit Druckluft gereinigt werden soll, muss der Luftstrom frei von Öl sein [2].

2.1.2 Nachbehandlung der aufgerauten Oberfläche

Die saubere Fugenoberfläche muss mehrere Tage vor dem Einbringen des Betons feucht gehalten werden. Am Tag des Betonierens sind Wasserpfützen, unabhängig von ihrer Größe, abzusaugen [2]. Zum Zeitpunkt des Betonierens muss die Oberfläche leicht trocken sein (seidenmatt) [2] um die Hydratation des Frischbetons im Bereich der Fugenoberfläche zu unterstützen.

2.1.3 Nachträglich installierte Schubverbinder

Es gibt ein breites Spektrum an nachträglich installierten Schubverbindern. Es kann zwischen Betonschrauben- und Mörtelsystemen unterschieden werden. Die Installation des Schubverbinder-Typus „Betonschraube“, z.B. Hilti HCC-HUS3, erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird ein Bohrloch im Bestandsbeton idealerweise staubfrei mit einem Hohlbohrer z.B. Hilti Hollow Drill Bit (Hohlbohrer) erstellt. Das Standard Hammerbohrverfahren mit entsprechender ETA konformer Reinigung kann auch zur Ausführung kommen.

Die ETA beschreibt auch Einbausituationen wo die Bohrlochreinigung mit Hilti Schubverbindern komplett entfallen darf. Anschließend wird die Betonschraube mit einem speziellen Schlagschrauber drehend eingeschlagen. Die Bohrtiefe wird typischerweise etwas größer als die Einschraubtiefe gewählt, um Platz für die Nebenprodukte des Gewindeschneidprozesses im Beton zu schaffen.

Das Zugtragverhalten von diesem System hängt von der Toleranz des Bohrlochs ab, die in der ETA für das Produkt geregelt ist. Durch das in den Beton geschnittene Gewinde ist dieser Schubverbinder bis zu einem gewissen Grad in der Höhe verstellbar (Abbildung 6).



HCC-HAS-U

HCC-K

HCC-HUS3

HCC-B

Abbildung 6 Einbau von Hilti HCC Schubverbindern mit und ohne aufliegende Bewehrungslage

Bei den nachträglich eingebauten Schubverbindern vom Typ „Verbundanker“ handelt es sich um Sonderelemente oder um Standardelemente, die mit zusätzlichem Zubehör ausgestattet sind, z.B. HCC- B (Sonderelement, optimiert für die Positionierung der Bewehrung und den Einbau (Abbildung 6)), HCC-K (Bewehrungsstab mit aufgestauchtem Kopf (Sonderelement)) und HCC-HAS U (Gewindestange mit Scheibe und Mutter (Standardelement)).

Unabhängig vom Element wird ein Bohrloch im Bestandsbeton gebohrt, wobei der Bohrstaub während des Bohrens wie oben beschrieben entfernt werden muss. Daher bietet Hilti die SAFEset-Technologie an, bei der der Staub während des Bohrvorgangs automatisch abgesaugt und das Bohrloch zusätzlich ETA konform gereinigt wird. Die Injektion des Mörtels in das Bohrloch erfolgt mit einem automatischen oder pneumatischen Auspressgerät, bevor das Element in das Bohrloch eingebracht wird.

Beim Schubverbinder HCC-B hingegen kann das Element vor der Injektion des Mörtels in das Bohrloch automatisiert eingehämmert werden. Dadurch bietet der Hilti Schubverbinder HCC-B die Möglichkeit den Mörtel nach allen notwendigen Nivellierungsmaßnahmen durch den einzigartigen Hohlquerschnittes zu injizieren. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die verschiedenen Hilti Schubverbinder und deren technische Eigenschaften und Anwendungsbreite.

	HCC-B	HCC-K	HCC-HAS U	HCC-HUS3
Belastungsart?	• statisch + dynamisch	• statisch	• statisch	• statisch, seismisch
Justierbarkeit Höhe?	• nivellierbar über Rippen	• nivellierbar über Länge	• nivellierbar über Länge	• nivellierbar
Belastbarkeit/Zeitpunkt?	• sofort belastbar (1kN)	• nach Aushärtung Mörtel	• nach Aushärtung Mörtel	• sofort belastbar
Durchmesser?	• 14	• 10, 12, 14, 16	• 8 bis 30	• 8, 10, 14
ETA?	• ja (auch Ermüdung)	• ja	• ja	• ja
Mörtel?	• RE500 V4	• RE500 V4, HY200-R V3	• RE500 V4, HY200-R V3, HY170	• nicht notwendig
Min. Dicke Bestandsbeton	• 127mm	• 100 mm ($\varnothing = 10\text{mm}$)	• 100mm ($\varnothing = 10\text{mm}$)	• 100mm ($\varnothing = 8\text{mm}$)
Min. Dicke Aufbeton	• $\geq 75\text{mm}$	• $\geq 42\text{mm} + c_{\text{nom}}$ (min h_{ef} , $\varnothing = 10\text{mm}$)	• $\geq 44\text{mm} + c_{\text{nom}}$ (min h_{ef} , $\varnothing = 8\text{mm}$)	• $\geq 48\text{mm} + c_{\text{nom}}$ (min h_{ef} , $\varnothing = 8\text{mm}$)

Abbildung 7 Übersicht der Hilti Schubverbinder HCC (Hilti Concrete Connector) und deren technischen Eigenschaften für die Bemessung der Schubtragfähigkeit von Verbundfugen nach EOTA TR 066 [2]

3 Tragverhalten der Verbundfuge

Das Verhalten von Verbundfugen, die Schubspannungen in Längsrichtung ausgesetzt sind, kann mit Hilfe der „shear-friction theory“ (Schubreibungstheorie) beschrieben werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Bezeichnung „shear-friction theory“ möglicherweise irreführend ist, da sie mehrere verschiedene Entwicklungsschritte umfasst.

Die ursprüngliche „shear-friction theory“ geht davon aus, dass der Übertragungsmechanismus von Schubspannungen in einer Verbundfuge, die gleichzeitig Schub- und Druckkräften ausgesetzt ist, nur durch Reibung gewährleistet ist. Im Allgemeinen wird ein einfaches Sägezahnmodell verwendet, um die Grundprinzipien dieser Theorie zu veranschaulichen (Abbildung 8).

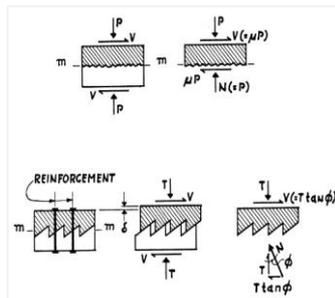


Abbildung 8 Shear-friction Theorie“ als Sägezahnmodell 1960 von Birkeland und Birkeland [5]

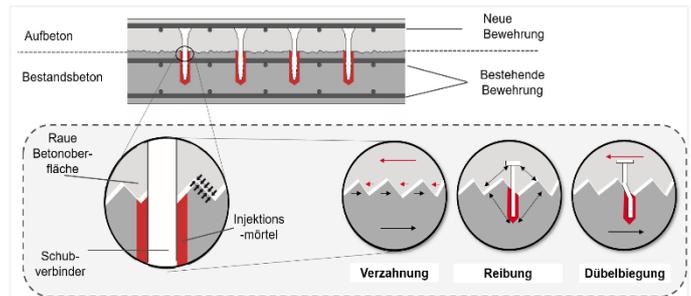


Abbildung 9 Schubübertragung in der bewehrten Verbundfuge: Kohäsion / Verzahnung, Reibung und Dübelwirkung am Beispiel des Schubverbinders HCC-K

Diese Theorie wurde um 1960 von Birkeland und Birkeland [5] entwickelt. Im Jahr 1972 wurde diese von Mattock und Hawkins [6] um den Traganteil der Kohäsion erweitert. Im Jahr 1978 wurde die Betondruckfestigkeit in die Theorie einbezogen, wie von Loov [7] vorgeschlagen. Schlussendlich beschreibt Randl [8], dass die Schubübertragung in der bewehrten Verbundfuge aus drei Hauptmechanismen besteht: Kohäsion, Reibung und Dübelwirkung. Die drei Hauptmechanismen können anhand von Abbildung 9 anschaulich beschrieben werden. Abbildung 10 zeigt die Schubspannungskurve als Funktion der Relativverschiebung der einzelnen Tragmechanismen (Adhäsion/Interlock τ_{adh} , Reibung τ_{sf} und Schubbewehrung τ_{sr} (Zilch und Reinecke [9])).

Die Adhäsionskomponente τ_{adh} entsteht durch chemische Haftverbindungen zwischen den Teilchen des alten und des neuen Betons. Wenn die maximale Tragfähigkeit der Haftverbindung erreicht ist, kommt es an der Grenzfläche zwischen den Betonlagen zu einer Ablösung, und die Schubspannungen werden durch mechanische Verzahnung aufgrund der Oberflächenrauigkeit übertragen.

Mit zunehmender Relativverschiebung zwischen den Betonschichten werden die Schubverbinder, die die Verbundfuge rechtwinkelig kreuzen, belastet und die Schubverbinder können durch Fließen, Herausziehen oder andere mögliche Brucharten versagen. Infolge des Widerstandes der Schubverbinder wird die Verbundfuge auf Druck beansprucht und die Schubkräfte werden durch Reibung übertragen (τ_{sf}). Aufgrund der Relativverschiebung der Betonschichten wird der nachträglich installierte Schubverbinder auch auf Querkraft beansprucht, was gewöhnlich als Dübelwirkung bezeichnet wird (τ_{sr}).

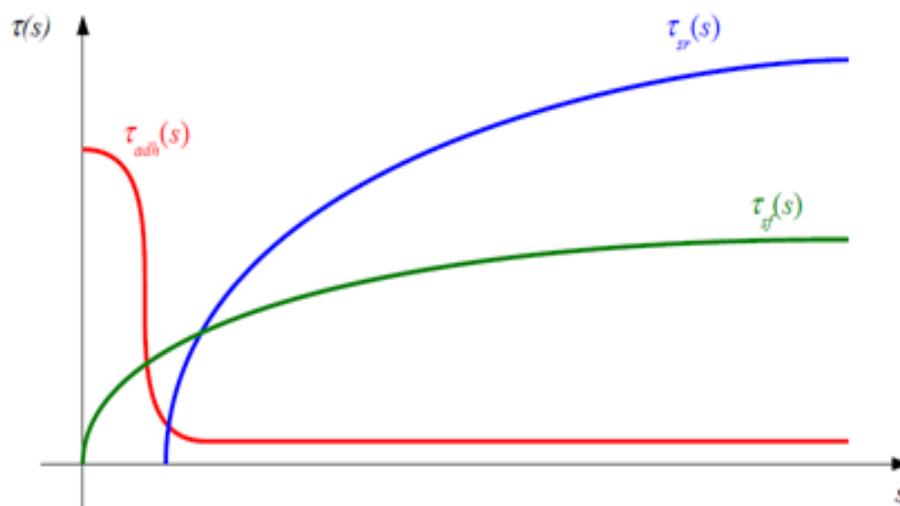


Abbildung 10 Schubspannungskurve als Funktion der relativen Verschiebung für die einzelnen Tragmechanismen (Adhäsion/Interlock τ_{adh} , Reibung τ_{sf} und Schubbewehrung τ_{sr} (Dübelwirkung) (Zilch und Reinecke [9]).

Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit erhöhen sich der Schubwiderstand und die Schubsteifigkeit der Verbundfuge erheblich. Zusätzlich ändert sich die Verteilung des Gesamtwiderstandes zwischen den drei Traganteilen. Im Extremfall, wenn die Fugenoberfläche sehr rau ist, werden die Verbinder an der Verbindungsstelle hauptsächlich auf Zug beansprucht, während bei einer glatten Fugenoberfläche die Dübelbeanspruchung der Verbinder auf Schub überwiegt.

4 Bemessung der Verbundfuge nach EOTA TR 066

4.1 Einwirkungen

4.1.1 Statisch und Quasi-statische Einwirkung

4.1.1.1 Äußere Kräfte

Zur Ermittlung der einwirkenden Schubspannung wird die aufgebrachte äußere Schubkraft $V_{Ed,i}$ durch die folgende Gleichung in eine Schubspannung $\tau_{Ed,i}$ umgerechnet, die parallel zur Grenzfläche in einem bestimmten Abschnitt i wirkt:

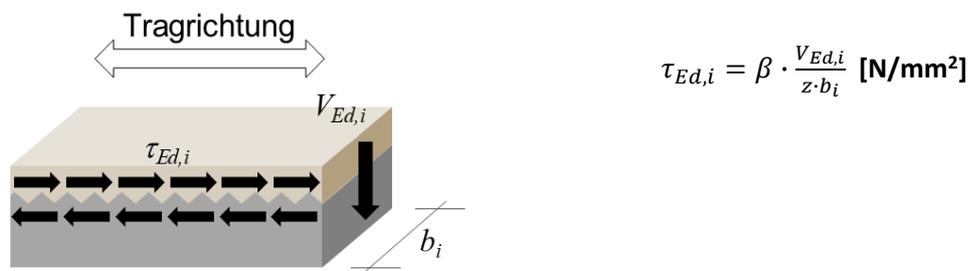


Abbildung 11 Umrechnung der äußeren Querkraft $V_{Ed,i}$ in eine Schubspannung $\tau_{Ed,i}$ die parallel in der Grenzfläche der Verbundfuge wirkt

β = Verhältnis zwischen der Längskraft im neuen Beton und der Gesamtlängskraft entweder in der Druck- oder in der Zugzone, für den betrachteten Abschnitt, siehe Abbildung 12

$V_{Ed,i}$ = einwirkende äußere Querkraft

b_i = Breite der betrachteten Zone

z = Hebelarm der inneren Kräfte

Diese Bereiche oder Zonen der Länge l_i können aufgrund der Schubspannungsverteilung infolge äußerer Belastung (Querkräfteverteilung) definiert werden, wobei die maximale Schubspannung innerhalb der Zone entscheidend ist. Das Verhältnis der Längskräfte bezogen auf die Gesamtlängskraft b ist abhängig von der Höhe der neuen Betonschicht bezogen auf die Höhe der Betondruckzone (positives Biegemoment, siehe Abbildung 12).

Dabei ist x die Höhe der Betondruckfläche, $A_{s,N}$ die Querschnittsfläche der Bewehrung in der neuen Betonschicht, $A_{s,E}$ die Querschnittsfläche der Bewehrung im Bestandsbeton, h_N die Höhe der neuen Betonlage und h_E die Höhe des bestehenden Betons ("alt") ist.

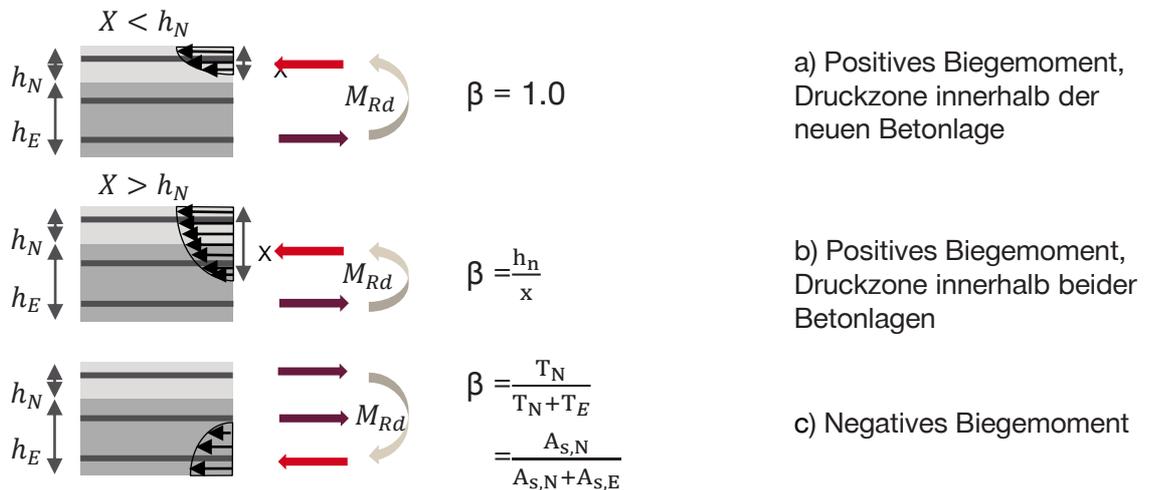


Abbildung 12 Bestimmung des Verhältnisses der Längskraft im neuen Beton zur Gesamtlängskraft (b) unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen

4.1.1.2 Zwangskräfte

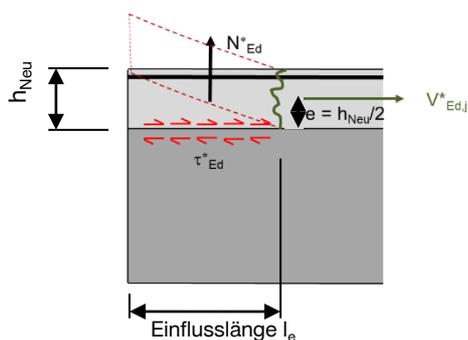


Abbildung 13 Abhebekräfte aufgrund von Schwinden gemäß EOTA TR066 [2], schematisch

Die EOTA TR 066 [2] berücksichtigt bei statischen und quasi-statischen Betrachtungen auch Zwangskräfte am Rand der Betonlage infolge Schwindens. Diese erzeugt Schubspannungen parallel zur Verbundfuge τ^*_{Ed} und Abhebekräfte $N^*_{Ed,j}$ (Abb. 13). Diese Abhebekräfte werden innerhalb einer bestimmten Einflusslänge l_e entlang des Randbereichs in Abhängigkeit von der und der Höhe der neuen Oberflächenrauigkeit Betonschicht berücksichtigt.

Diese müssen kleiner sein als die Zugtragfähigkeit des Schubverbinders unter Berücksichtigung des maßgebenden Versagensmodus N_{Rd} . Je höher die neue Betonschicht ist und je rauer die Betonoberfläche, desto größer ist die Länge l_e , die berücksichtigt werden muss.

Es ist zu beachten, dass in der EOTA TR 066 [2] die Zwangskräfte nicht mit den einwirkenden Kräften aus äußerer Belastung überlagert werden, sondern der geforderte Nachweis getrennt durch einen Nachweis gegen äußere Einwirkungen und einen Nachweis gegen Zwangskräfte geführt wird. Für den Nachweis gegen Zwangskräfte wird entweder die Schubspannung aus den Zwangskräften oder die aufgebrauchte Schubspannung aus äußeren Einwirkungen in der Verbundfuge berücksichtigt, wobei der Maximalwert der aufgebrauchten Schubspannung maßgeblich ist: $(\tau_{Ed} = \max.(\tau_{Ed,i}; \tau_{Ed}^*))$

4.1.2 Vorwiegend nicht-ruhende Einwirkung (Ermüdung)

Die Ermüdungsbeständigkeit von Werkstoffen oder Bauteilen wird im Allgemeinen experimentell mit zyklischen Belastungsversuchen ermittelt, bei denen eine reine Ermüdungseinwirkung ohne statische Einwirkungen aufgebracht wird. In Fällen, in denen Einwirkungen aus einer Kombination von Ermüdung und statischer Einwirkung besteht, ist es notwendig, dies zu berücksichtigen, da diese einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Verbundfuge hat. Folglich kategorisiert EOTA TR 066 [2] die Ermüdungseinwirkung, die eine zyklische Belastung in der Verbundfuge erzeugt, durch 3 Situationen (Abbildung 14):

Situation 1

Die einwirkende zyklische Schubspannung $\Delta\tau_{Ed}$ basiert auf einer Ermüdungseinwirkung ohne statischen Anteil (puls. Einwirkung).
Die untere zykl. Spannung nimmt den Wert Null an ($\Delta\tau_{Ed, \min} = 0$).

Situation 2

Die einwirkende zyklische Schubspannung $\Delta\tau_{Ed}$ basiert auf statischer Einwirkung (puls. Einwirkung) und Ermüdungseinwirkung.
Die untere zykl. Spannung nimmt einen Wert grösser als Null an ($\Delta\tau_{Ed, \min} > 0$).

Situation 3

Die einwirkende zykl. Schubspannung $\Delta\tau_{Ed}$ erfolgt mit wechselnden Vorzeichen.

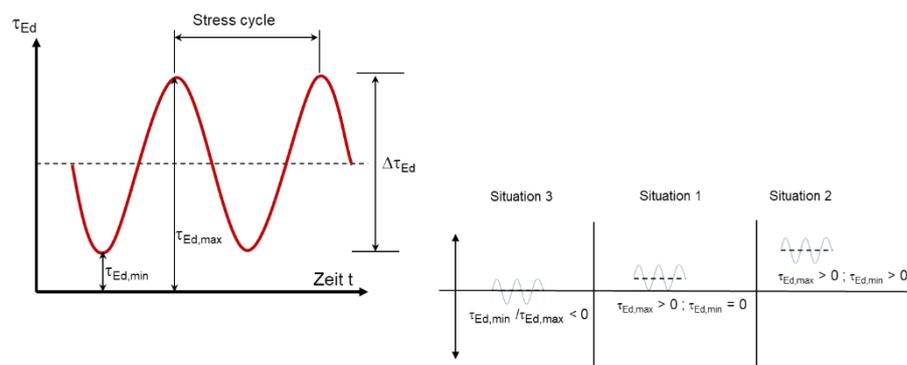


Abbildung 14 Bezeichnung und Kategorisierung der zyklischen Einwirkung nach EOTA TR 066

4.1.3 Erdbebeneinwirkung

Bei der Bemessung unter Erdbebeneinwirkung wird die Verbundfuge für die maximale Belastung bemessen, die sich im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) aus den Lastkombinationen mit Erdbebenlasten $V_{Ed,i,seis}$ nach EN 1998-1:2004 [10] ergibt. Zusätzliche Randbedingungen hinsichtlich Ausführung als auch Anwendungsspezifische Randbedingungen der Verstärkungsmaßnahme (Platte, Wand, Balken, Rahmentragwerk) sind bei der Ermittlung der auf die bewehrte Verbundfuge einwirkenden Erdbebenlast zu berücksichtigen.

4.2 Widerstand in der Verbindungsfuge

4.2.1 Statisch, quasi-statischer Widerstand

Für die Berechnung der Schubfestigkeit der Verbundfuge R_d werden zwei Anwendungsbedingungen definiert:

4.2.1.1 Schubtragfähigkeit der Verbundfuge ohne Schubverbinder (starrer Verbund)

Anwendungsbedingung 1 gilt für starren Verbund ohne nachträglich installierte Schubverbinder, bei denen ein guter Haftverbund angenommen werden kann und keine Zugspannungen senkrecht zur Verbundfuge auftreten. In diesem Fall erfolgt die Bemessung des Schubwiderstandes der Verbundfuge über den Haftverbund (Nr.1 in Abb. 15) und Reibung infolge äußerer Normalspannungen (Nr.2 in Abb. 15) ohne die Berücksichtigung von Schubverbindern. Die entsprechenden Koeffizienten sind von der Beschaffenheit und Rauheit der Fuge abhängig und sind in der EOTA TR 066 [2] angegeben.

Die Schubfestigkeit wird durch die Betondruckstrebe (Nr. 3 in Abb. 15) begrenzt. Die maximale Schubfestigkeit der Verbundfuge entspricht in etwa 30 % des Bemessungswertes der Zylinderdruckfestigkeit des Betons.

$$\tau_{Rd} = \underbrace{c_a \cdot f_{ctd}}_1 + \underbrace{\mu \cdot \sigma_n}_2 \leq \underbrace{0,5 \cdot \nu \cdot f_{cd}}_3$$

Abbildung 15 Anwendungsbedingung I: Schubtragfähigkeit der Verbundfuge ohne Schubverbinder (starrer Verbund)

Wenn die Bedingung $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$ erfüllt ist, sind nachträglich installierte Schubverbinder nur am Rand infolge Schwindens erforderlich (vgl. Kapitel 4.1.1.2). Ist die Bedingung $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$ nicht erfüllt, sind nachträglich installierte Schubverbinder im Randbereich und entlang der Verbundfuge rechnerisch erforderlich.

4.2.1.2 Schubtragfähigkeit der Verbundfuge mit Schubverbinder (bewehrte Verbundfuge)

Anwendungsbedingung 2 gilt für nicht starren Verbund, bei der ein Relativverschiebung in der Verbundfuge zulässig ist und Schubverbinder verwendet werden. Folglich umfasst die Bemessung der Schubtragfähigkeit der Verbundfuge die Mechanismen Verzahnung (Nr. 1 in Abb. 16), Reibung (Nr. 2 in Abb. 16) und Dübelwirkung (Nr. 3 in Abb.16).

$$\tau_{Rd} = \underbrace{c_r * f_{ck}^{\frac{1}{3}}}_{\text{1 Verzahnung}} + \underbrace{\mu * (\sigma_n + \kappa_1 * \alpha_{\kappa 1} * \rho * \sigma_s)}_{\text{2 Reibung}} + \underbrace{\kappa_2 * \alpha_{\kappa 2} * \rho * \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\gamma_s} * \frac{0,85 * f_{ck}}{\gamma_c}}}_{\text{3 Dübelbiegung}} \leq \beta_c * v * \frac{0,85 * f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{4 Druckstrebe}$$

1 Verzahnung

2 Reibung

3 Dübelbiegung

4 Druckstrebe

Abbildung 16 Anwendungsbedingung II: Schubfestigkeit der bewehrten Verbundfuge nach EOTA TR 066 [2]

Mechanische Verzahnung nicht Adhäsion wird durch den Ausdruck " $c_r \cdot f_{ck}^{1/3}$ " im Falle von Verbundfugen mit Schubverbindern beschrieben und berücksichtigt die Betondruckfestigkeit und die Oberflächenrauigkeit. Für eine bewehrte Verbundfuge nimmt der Koeffizient c_r Werte zwischen 0 und 0,2 an. Zu beachten ist, dass im Vergleich zur Anwendungsbedingung 1, der Haftverbundwiderstand c_a durch einen Koeffizient für mechanische Verzahnung c_r ersetzt wird.

Mit zunehmender Relativverschiebung der Betonschichten wollen sich die Betonschichten weiter Trennen. Die nachträglich eingebauten Schubverbinder wirken dieser Trennung entgegen und werden auf Zug beansprucht, wodurch sich Druckkräfte zwischen den Oberflächen entwickeln, die zu Reibung führen. Darüber hinaus können die Druckkräfte auch durch äußere Kräfte verursacht werden, die durch σ_N berücksichtigt werden. Die nachträglich eingebauten Schubverbinder können jedoch nur bis zu dem Punkt belastet werden, an dem sie auf Zug versagen. Die Versagensart mit den geringsten Widerstandswerten bestimmt die Stahlspannung σ_s (Abb. 17).

Der Koeffizient α_{k1} berücksichtigt den prozentualen Anteil der auf den Schubverbinder wirkenden Zugkraft. Für glatte Oberflächen gilt $\alpha_{k1} = 0$. Die Dübelwirkung entsteht durch die Relativverschiebung beider Betonlagen. Unter diesen Bedingungen und in Abhängigkeit des Wertes der Relativverschiebung sind die Schubverbinder Schubspannungen (zusätzlich zu den Zugspannungen aufgrund Reibung) und Biegespannungen ausgesetzt. Mit zunehmender Belastung wird der oberflächennahe Beton innerhalb der Verbundfuge beschädigt, so dass die Resultierende des Widerstandes tiefer in den Beton umgelagert wird. Dadurch erhöht sich die Exzentrizität zwischen der Schubkraft und der resultierenden Pressung am Schubverbinder, was zu Biegespannungen im Schubverbinder führt. Der Faktor α_{k2} berücksichtigt dies als produkt-spezifische Biegetragfähigkeit des Schubverbinders.

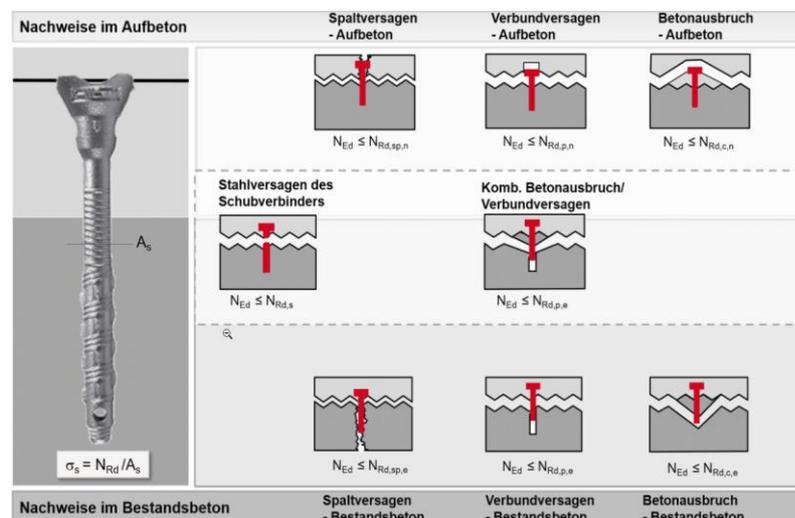


Abbildung 17 Spezifischer Widerstand des Schubverbinders σ_s unter Zug in Abhängigkeit aller möglichen Versagensarten

4.2.2 Vorwiegend nicht-ruhender Widerstand (Ermüdung)

Die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit der Verbundfuge nach EOTA TR 066 [2] basiert auf mehreren Bedingungen. Ein Ermüdungsnachweis ist nur möglich, wenn die Oberfläche als sehr rau ($R_f \geq 3,0\text{mm}$) eingestuft wird, die neue Betonschicht eine Betonfestigkeitsklasse von mindestens C40/50 aufweist, während die bestehende Betonschicht mindestens der Betonfestigkeitsklasse C30/37 entspricht.

Wenn diese Randbedingungen erfüllt sind, kann die Schubtragfähigkeit unter Ermüdungsbeanspruchung durch Multiplikation des Widerstands unter statischer Belastung mit einem Abminderungsfaktor η_{sc} und zusätzlichen mathematischen Ausdrücken in Abhängigkeit von der Klassifizierung der Ermüdungsbeanspruchung ermittelt werden, siehe Abschnitt 4.1.2. Das folgende Beispiel gilt für den Fall einer reinen Ermüdungsbelastung (vgl. Abb. 4.1.2).

$$\Delta T_{Rd} = \eta_{sc} \cdot T_{Rd} \quad \text{bzw.} \quad \Delta T_{Ed} \leq \eta_{sc} \cdot T_{Rd}$$

Für Situationen, in denen eine ermüdungsrelevante Einwirkung mit einer statischen Einwirkung überlagert wird, erfolgt die Abminderung nach dem Goodman-Diagramm, das in der EOTA TR 066 [2] angegeben ist. Das Goodman-Diagramm berücksichtigt den Einfluss einer statischen Belastung auf die Ermüdungsfestigkeit. Weitere Einzelheiten können [2] entnommen werden.

4.2.3 Erdbebenwiderstand

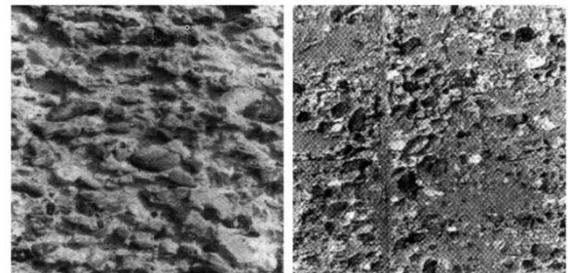
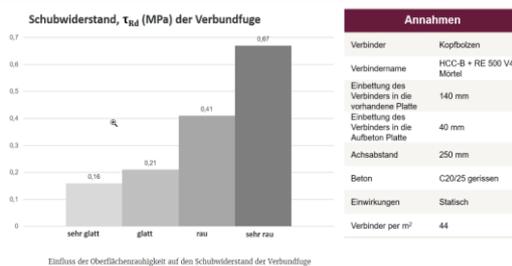
Die Bestimmung des Erdbebenwiderstand der Verbundfuge basiert auf mehreren Randbedingungen. Unbewehrte Verbundfugen unter seismischer Einwirkung werden von der EOTA TR 066 [2] nicht erfasst, außerdem ist eine sehr glatte Oberfläche nach [2] nicht zulässig. Der Bemessungsnachweis der nachträglich eingebauten Schubverbinder muss in Abhängigkeit von der Seismizität und der Signifikanzklasse des Bauwerks geführt werden, siehe EN 1992-4 [11].

Außerdem muss eine Beziehung zwischen der maßgebenden Versagensart und dem gewünschten Verhalten der Verbundfuge hergestellt werden (duktile Versagensarten vs. spröde Versagensarten). Der Schubwiderstand unter seismischer Einwirkung wird durch die gleichen Parameter (jedoch mit anderen Werten) beschrieben wie unter quasi-statischer Einwirkung. Zusätzlich wird die tragende Komponente aus Kohäsion/ Verzahnung vernachlässigt und der Gesamtschubwiderstand der Fuge wird durch einen produktabhängigen Faktor α_{seis} weiter reduziert. Dieser Faktor ist in der produktbezogenen ETA angegeben. Weitere Informationen zum Erdbebenwiderstand sind in [2] zu finden.

5 Ein Schlüsselparameter, der die Schubtragfähigkeit der Verbundfuge beeinflusst: die Rautiefe R_t

Abbildung 18a zeigt den Schubwiderstand einer bewehrten Verbundfuge, berechnet nach EOTA TR 066 [2], in Abhängigkeit von der klassifizierten Oberflächenrauigkeit bzw. Rautiefe. Die monolithische Verbindung der beiden Betonschichten wird mit dem Hilti Schubverbinder HCC-B in Kombination mit dem Hilti Injektionssystem HIT-RE 500 V4 hergestellt.

Das Injektionssystem und der Schubverbinder verfügen über die erforderlichen Bewertungsdokumente (ETA). Durch die Änderung der Fugenklassifizierung von "glatt" auf "rau" verdoppelt sich in etwa der Schubwiderstand der Verbundfuge ($0,21 \text{ N/mm}^2$ auf $0,41 \text{ N/mm}^2$). Für die Fugenklassifizierung "sehr rau" beträgt der berechnete Schubwiderstand der Verbundfuge mehr als das Vierfache des ursprünglichen Schubwiderstandes (sehr glatt).



a) Schubwiderstand in der Verbundfuge

b) Wasserstrahlen
1500 bar = $R_t = 3.3$
mm (sehr rau)

c) Wasserstrahlen
1500 bar = $R_t = 0.8$
mm (glatt)

Abbildung 18 Schubwiderstand der bewehrten Verbundfuge in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit und unterschiedlicher Rautiefen mit identischen Aufrauverfahren (Wasserstrahlen)

Weiterhin erfordert der Nachweis bestimmter Einwirkungen bestimmte Oberflächenrauigkeiten bzw. Rautiefen. Leider reicht die Angabe der Bearbeitungsmethode nicht zwingend aus, um die geforderte Rautiefe zu garantieren. Abbildung 18a und 18b zeigt die Ergebnisse hinsichtlich gemessener Rautiefe für identische Aufrauverfahren. Folglich kann gesagt werden, dass nicht die Methode, sondern die Rautiefe R_t als maßgebender Parameter in der Leistungsposition angegeben werden sollte.

6 Praktische Bemessungshilfen: die wichtigsten Unterschiede zwischen EN 1992-1-1 und EOTA TR 066

Nicht alle nachträglich installierten Schubverbinder können für alle Randbedingungen verwendet werden, siehe Abbildung 8. Die Auswahl des richtigen Produkts kann unter Umständen als schwierig angesehen werden. Der einfachste Weg, das richtige Produkt auszuwählen, ist die Verwendung der Hilti Bemessungssoftware Hilti PROFIS Engineering in Verbindung mit dem Aufbeton Modul welches in der kostenfreien Standard, sowie Premiumversion verfügbar ist.

In dieser Software können die individuellen Konstruktionsanforderungen mit den Anforderungen der Bemessung nach EOTA TR 066 [2] und den technisch richtigen Produkten in den richtigen Zusammenhang gebracht werden. Darüber hinaus bietet PROFIS Engineering folgende zusätzliche Vorteile bei der Bemessung von Aufbeton nach EOTA TR 066 [2]:

- PROFIS Engineering optimiert automatisch Ihre Ergebnisse. Sie entscheiden, ob Sie Ihr Projekt hinsichtlich der Mindestanzahl der nachträglich eingebauten Schubverbinder oder deren Mindesteinbindetiefe optimieren möchten.
- PROFIS Engineering berücksichtigt statische Einwirkungen, Ermüdungseinwirkungen und seismische Einwirkungen gemäß EOTA TR 066 [2]
- PROFIS Engineering liefert einen übersichtlichen und verständlichen Bemessungsbericht und Informationen über die Lage der nachträglich eingebauten Schubverbinder in Tabellenform.



a) PROFIS Engineering, Aufbeton Modul

Mittlerer Zonenbereich

s_x : Spacing in x-direction between 2 connectors for a given zone
 s_y : Spacing in y-direction between 2 connectors for a given zone
 c_x : Edge distance in x-direction for a given zone
 c_y : Edge distance in y-direction for a given zone
 l_x : Edge width
 l_y : Length of a given zone
 l_z : Height of a given zone

Zone	Zone length l_x [mm]	Zone width l_y [mm]	Spacing in x-direction s_x [mm]	Spacing in y-direction s_y [mm]	Edge distance in x-direction c_x [mm]	Edge distance in y-direction c_y [mm]	Number of connectors
Z1	5.000	1.500	0,1	205	1.350	1.440	16
Z2	5.000	900	305,1	352,8	1.790	1.501,5	14
Z3	5.000	600	213,4	381,7	2.093,3	1.545,8	12
Z1'	5.000	1.500	0,1	205	1.350	1.440	9
Z2'	5.000	900	305,1	352,8	1.790	1.501,5	14
Z3'	5.000	600	213,4	381,7	2.093,3	1.545,8	12
Total no. of connectors							78

b) Bemessungsbericht (Auszug)

Abbildung 19 Umsetzung von EOTA TR 066 in PROFIS Engineering

Erhalten Sie Zugang zu der kostenfreien Software – **PROFIS Engineering** >

Erfahren Sie mehr über die Software, und die **Vorteile** der **Premiumversion** >

Während EN 1992-1-1 (EC2) [1] ausschließlich Kohäsion, die äußeren Spannungen und die Reibung in Betracht zieht, berücksichtigt der neue EOTA TR 066 [2] auch die Dübelwirkung der nachträglich installierten Schubverbinder. Dies ist erforderlich, da bei einer Relativverschiebung der Betonschichten sich die Spannungen aus beiden Belastungsrichtungen im Schubverbinder überlagern und sich dadurch die nutzbare axiale Zugkraft erheblich reduziert. Dieses Verhalten ist produktabhängig.

Weiterhin geht EN 1992-1-1 (EC2) [1] von einer ausreichend verankerten Schubbewehrung, aus wie es von Halbfertigteilen aus Beton bekannt ist und aus diesem Grund Stahlfließen als maßgebende Versagensart angesehen wird. Im Gegensatz dazu betrachtet EOTA TR 066 [2] die einzelnen Versagensarten von nachträglich eingebauten Schubverbindern.

Hier wird bei der Anwendung des Schubnachweises anstelle der Streckgrenze, die aus dem Bemessungswiderstand unter Zug berechnete Stahlspannung σ_s des Schubverbinders verwendet. Der Bemessungswiderstand unter Zug ist gleich dem maßgebenden Widerstand unter Berücksichtigung aller möglichen Versagensarten die nach DIN EN 1992-4 [11] ermittelt werden. Diese Parameter werden über das Bewertungsdokument EAD 332347-00-0601 "Verbinder zur Verstärkung bestehender Betonbauwerke durch Aufbeton" bewertet und sind zwingend erforderlich, um den Bemessungsnachweis nach EOTA TR 066 [2] zu führen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass EOTA TR 066 [2] ein dem Stand der Technik entsprechendes Bemessungskonzept für die Bemessung von Verbundfugen mit nachträglich installierten Schubverbindern darstellt.

7 Zusammenfassung

Die EOTA TR 066 [2] ist ein dem Stand der Technik entsprechendes Bemessungskonzept für die Bemessung der Schubtragfähigkeit von Verbundfugen mit nachträglich installierten Schubverbindern.

EOTA TR 066 [2] berücksichtigt die drei wesentlichen Lastübertragungsmechanismen: Kohäsion/ mechanische Verzahnung, Reibung und Dübelwirkung unter statischer Einwirkung, quasi-statischer Einwirkung, Ermüdungseinwirkung und seismischer Einwirkung.

Das Tragverhalten der nachträglich installierten Schubverbinder ist produkt-spezifisch und kann nicht theoretisch bestimmt werden. Es wird in Anlehnung an das Europäische Bewertungsdokument in Abhängigkeit des Typus des Schubverbinders durch EAD 330232-00-0601 (Betonschraube als Dübel), EAD 330499-00-0601 (Verbunddübel als Dübel) und EAD 332347-00-0601 (Schubverbinder) bestimmt. Für eine Bemessung nach TR 066 reicht eine Qualifizierung als Befestigungselement bzw. Dübel somit nicht aus.

Um die Bemessung von Aufbeton zu erleichtern bietet Hilti das PROFIS Engineering Aufbeton Modul. In dieser Software können die individuellen Konstruktionsanforderungen mit den Anforderungen der Bemessung nach EOTA TR 066 [2] und den technisch richtigen Produkten verbunden werden.

Autoren:



Dr.-Ing. Jörg Appl

Senior Technical
Marketing Manager

Central Europe
Hilti Deutschland AG
Hiltistraße 2

86916 Kaufering



Julia von der Warth

Produkt Manager
Engineering Software

Central Europe
Hilti Deutschland AG
Hiltistraße 2

86916 Kaufering

Nachdem Sie nun die Gelegenheit hatten, diesen Artikel zu lesen, würden wir gerne wissen, was Sie darüber denken.

Sagen Sie uns, was Ihnen gefallen hat, ob der Artikel Ihnen das Thema nähergebracht hat, was Sie vermisst haben und was Ihnen sonst noch einfällt! Kontaktieren Sie uns direkt über:

dr.joerg.appl@hilti.com

Quellen

- [1] DIN EN1992-1-1:2020-01 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln
- [2] EOTA TR 066: EOTA Technical Report, Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers, Amended 2020
- [3] FIB ModelCode for Concrete Structures 2010
- [4] EOTA TR 066: EOTA Technical Report, Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers, April 2019
- [5] Birkeland, P.W. and Birkeland, H.W. - Connections in precast concrete construction, American Concrete Institute, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 63, No. 3, pp. 345-368, March 1966
- [6] Mattock, A.H. and Hawkins, N.M. - Shear transfer in reinforced concrete – recent research, Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 55-75, March-April 1972.
- [7] Loov, R.E. - Design of precast connections, Paper presented at a seminar organized by Compa International Pte, Ltd, 8 p., Singapore, September 1978.
- [8] Randl, N.: Untersuchung zur Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton bei unterschiedlichen Fugenrauigkeiten. Innsbruck, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Dissertation 1997
- [9] Zilch, K. and Reinecke, R. - Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks, FIB International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, USA, 25-27 September 2000
- [10] DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009
- [11] DIN EN 1992-4: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 4: Bemessung der Verankerung von Befestigungen im Beton, 2019-04