



# HIT-SHEAR

Handbuch

Hilti Querkraftverstärkungssystem



Version 1.03  
März 2025

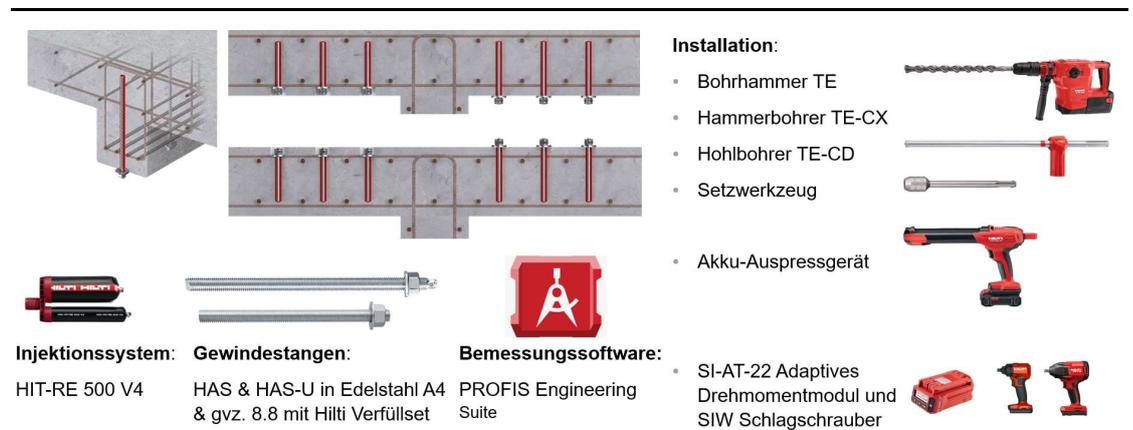
## INHALT

<b>1. EFFIZIENTE QUERKRAFTVERSTÄRKUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN MIT HIT-SHEAR .....</b>	<b>2</b>
1.1 Zusammenfassung: Die 5 wichtigsten Vorteile der HIT-Shear Systemlösung	3
<b>2. OPTIMIERTE INSTALLATIONSABLAUF DANK HILTI SYSTEMLÖSUNG .....</b>	<b>5</b>
2.1 Installationsablauf (schematisch)	7
<b>3. RÜCKBLICK: TRAGWERKSMODELL EINES BEWEHRTEN STAHLBETONBALKENS.....</b>	<b>10</b>
3.1 Anforderungen an die Querkraftbewehrung	10
<b>4. BEMESSUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN ZUR AUFNAHME VON QUERKRÄFTEN.....</b>	<b>12</b>
4.1 Allgemeine Prinzipien	12
4.2 Nachweis ohne Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 & SIA 262:2013	12
4.3 Nachweis mit Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 & SIA 262:2013	13
4.4 Optimierung der Querkraftbemessung durch Anpassung des Druckstrebenwinkel $\theta$	15
<b>5. FRAGEN UND ÜBERLEGUNGEN FÜR DIE WAHL DER PASSENDEN VERSTÄRKUNGSMAßNAHME .....</b>	<b>17</b>
<b>6. Eignungsnachweise für HIT-Shear .....</b>	<b>19</b>
6.1 Testprogramm zur Bewertung des HIT-Shear Systems	19
6.2 HIT-Shear durch das DIBt zugelassen	19
<b>7. Bemessungs- und Detaillierungsansatz mit Hilti HIT-Shear .....</b>	<b>20</b>
7.1 Nachweis der Druckstrebe	20
7.2 Zusätzliche Zugkraft in der Längsbewehrung aufgrund der Querkraftbemessung	22
7.3 Nachweis der Querkraftbewehrung	22
7.4 Zusätzliche Anforderung an das HIT Shear System	25
<b>8. Bemessungsbeispiel.....</b>	<b>28</b>
<b>9. Bemessung mit dem Querkraftverstärkungsmodul von Profis Engineering .....</b>	<b>31</b>
<b>10. Zusammenfassung .....</b>	<b>32</b>
<b>11. Literatur .....</b>	<b>33</b>

# 1. EFFIZIENTE QUERKRAFTVERSTÄRKUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN MIT HIT-SHEAR

Viele bestehende Bauwerke und Brückenbauteile erfüllen heute rechnerisch nicht mehr die Anforderungen an die Querkrafttragfähigkeit gemäß Eurocode 2. Um deren Sicherheit und Langlebigkeit zu gewährleisten, ist eine dauerhafte Verstärkung notwendig. Unser Querkraftverstärkungssystem bietet hierfür eine bauaufsichtlich zugelassene und nachhaltige Lösung.

Mit unserem HIT-Shear Querkraftverstärkungssystem realisieren Sie höhere Tragfähigkeiten norm- und zulassungskonform für Hoch-, Tief- und Ingenieurbau (Bild 1).



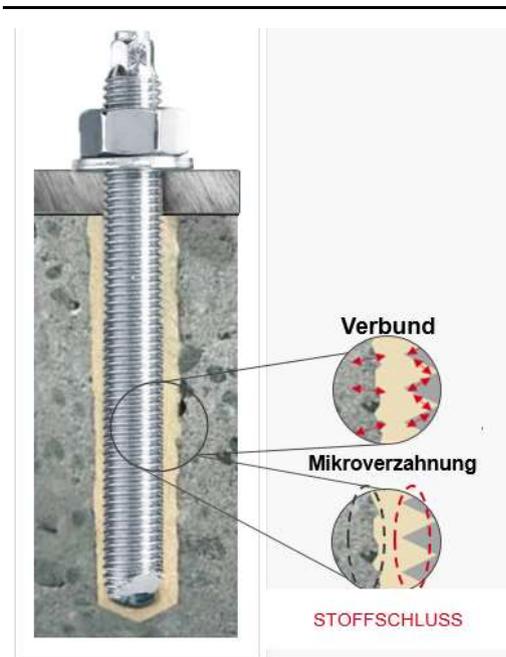
**Bild 1: Hilti HIT-Shear Querkraftverstärkungssystem, Hauptkomponenten**

Das System basiert auf hochfesten Gewindestangen, die vertikal in das bestehende Bauteil eingemörtelt werden (HIT-Shear Elemente), um die Querkraft aufzunehmen. Die Bemessung erfolgt dabei normgerecht nach EN 1992-1 und der nationalen Zulassung.

Die Gewindestangen wirken als Bewehrungselemente und werden mit dem bewährten Hilti Hochleistungsmörtel HIT-RE 500 V4 sicher im Beton verankert. Die Lastübertragung zwischen Gewindestange und Mörtel erfolgt durch Formschluss, während die Kräfte vom Mörtel in den Beton durch Mikroverzahnung, Reibung und Stoffschluss weitergeleitet werden (Bild 2). Diese Vorgehensweise basiert auf praxiserprobten Verfahren aus der Befestigungstechnik, die sich seit Jahrzehnten bewährt haben.

Die HIT-Shear Querkraftverstärkung funktioniert ähnlich wie eine Bügelbewehrung. Entscheidend ist die optimale Positionierung der Verstärkung: Sie sollte so nah wie möglich bis zur Höhe der Längsbewehrung in der Druckzone reichen und zugleich möglichst nah an der Zugseite verankert werden.

Diese Anordnung simuliert den von Eurocode 2 geforderten Bügelhaken bestmöglich. Durch diese Positionierung erstreckt sich die Querkraftbewehrung über die gesamte Querschnittshöhe, was die maximale Wirksamkeit sicherstellt. Eine sorgfältige Planung und der Einsatz von semi-automatischen Bohrständen berücksichtigt diesen Ansatz und gewährleistet somit optimale Ergebnisse.



Die Hilti Querkräftbewehrung ist vielseitig einsetzbar und kann in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen aus Normalbeton der Festigkeitsklassen C20/25 bis C50/60 verwendet werden.

Sie ist sowohl für statische als auch quasistatische und Ermüdungsbeanspruchungen geeignet. Das zu verstärkende Bauteil muss dabei eine Mindestbauteildicke von  $h_{\min} = 200$  mm aufweisen, wobei die maximale Bauteildicke der Querkräftverstärkung bei  $h_{\max} = 2200$  mm liegt.

Für unterschiedliche Projektanforderungen stehen die Gewindestangen in den Größen M12 bis M24 zur Verfügung, wahlweise als galvanisch verzinkte oder Edelstahlvarianten, um maximale Flexibilität zu gewährleisten.

Bild 2: Einleitung der Lasten in den Untergrund durch Stoffschluss

Unsere Systemlösung deckt den gesamten Prozess ab:

- Die PROFIS Engineering Suite unterstützt Sie dabei, präzise und effizient zu planen.
- Detektion der Bestandsbewehrung mit modernen Betonscannern
- Setzen und Reinigen der Bohrlöcher in nur einem Schritt mit halbautomatischen Bohreinrichtungen
- Schnelles und genaues Verfüllen der Bohrlöcher mit Auspressgeräten

Es entfällt dabei der Aufwand für Stufenbohrungen, Bohrerwechsel und spezifische Drehmomente, was die Einbauzeit erheblich reduziert.

Gerne beraten wir Sie individuell, wie Sie die Querkräftverstärkung von Stahlbetonbauteilen optimal planen und in Ausschreibungen aufnehmen können. Kontaktieren Sie uns – unser Fachwissen und unsere Erfahrung stehen Ihnen zur Verfügung!

## 1.1 Zusammenfassung: Die 5 wichtigsten Vorteile der HIT-Shear Systemlösung

1. Bauaufsichtlich zugelassene Lösung
  - Zuverlässig und regelkonform mit geprüften Systemen arbeiten.
2. Ganzheitliche Systemlösung für die Querkräftverstärkung  
Der Arbeitsprozess umfasst:
  - Planung und Bemessung
  - Detektion der Bestandsbewehrung mit Betonscannern

- Präzise Berechnung der Mörtelmenge
  - Setzen und Reinigen der Bohrlöcher in nur einem Schritt mit halbautomatischen Bohreinrichtungen
  - Schnelles und genaues Verfüllen der Bohrlöcher mit Auspressgeräten
3. Einfache und sichere Bemessung mit der PROFIS Engineering Software
- Kostenlose Nutzung
  - Konform mit EN 1992-1 und nationalen Zulassungen
  - Ermöglicht die Aufteilung des Bauteils in Querkraftbereiche
4. Vermeidung ungeplanter Biegemomente
- Durch den Einsatz des Hilti Verfüllsets, auch bei Neigung der Gewindestangen zur Oberfläche (z. B. im Brückenbau).
5. Variabler Druckstrebenwinkel
- Flexibilität durch Winkel von  $18,4^\circ$  bis  $45^\circ$ .

## 2. OPTIMIERTE INSTALLATIONSABLAUF DANK HILTI SYSTEMLÖSUNG

Bei der Planung von Verstärkungsmaßnahmen ist es wichtig, den engen Zusammenhang zwischen Planung und Ausführung zu erkennen, denn die Ausführung ist die Umsetzung eines Entwurfs, der realisierbar sein muss.

„Systemlösungen für Verstärkungsmaßnahmen funktionieren dabei immer besser als einzelne Produktlösungen.“

Hilti hat deshalb für alle genannten Verstärkungsmaßnahmen speziell abgestimmte Systeme entwickelt, die Sie in allen Arbeitsschritten unterstützen. So können Sie Verstärkungsmaßnahmen schneller, sicherer und kostengünstiger durchführen.

Unsere Systemlösungen decken nahezu alle Einbauschritte ab, um ein wirklich integriertes System zu realisieren.

### 1. Planung und Bemessung

Mit der PROFIS Engineering Suite Software planen, bemessen und dokumentieren Sie Verstärkungsmethoden flexibel, effizient und unter Berücksichtigung aktueller Regelwerke und Normen.

### 2. Detektion des Untergrundes

Erhalten Sie Einblicke in Böden, Wände und Decken. Hilti Detektionssysteme bieten individuelle Stärken für Ihre Anforderungen: von der tiefgehenden Erkennung von Bewehrungsseisen bis zur präzisen Leitungssuche für zerstörungsfreie Bohrungen. Unsere Systeme im Überblick:

- **Ferrosan System PS 300:**

Perfekt für die präzise Erkennung von Bewehrungsstäben, die Schätzung des Bewehrungsdurchmessers und der Betonüberdeckung – zuverlässig und präzise.

- **Beton-Detektionsgerät PS 1000 X-Scan:**

Ideal für effizientes Scannen großer Flächen, das Auffinden von Metallobjekten, spannungsführenden Leitungen und Vorspannkabeln in mehreren Betonschichten – schnell und einfach.

Finden Sie das optimale System für Ihren Einsatzzweck und profitieren Sie von modernster Technologie für maximale Effizienz und Genauigkeit.

### 3. Weniger Arbeitsschritte dank abgestimmter Installationssysteme

Mit ETA-zugelassenen Hohlbohrern als festen Bestandteil der Systemkette wird die Bohrlochreinigung automatisch während des Bohrens durchgeführt. Dadurch sparen Sie bis zu 50 % Arbeitszeit. Gleichzeitig werden Montagefehler durch unzureichende Bohrlochreinigung auf ein Minimum reduziert, und die Ausführenden profitieren von einem wirksamen Schutz vor Staubbelastung.

Zusätzlich sorgen akkubetriebene Bohr- und Meißelhämmer mit Schnellabschaltung (ATC) für die Sicherheit der Mitarbeitenden, indem Verletzungsrisiken minimiert werden. Für besonders präzises Bohren unter schwierigen Bedingungen stehen Ihnen halbautomatische Bohrvorrichtungen zur Verfügung, s. Bild 3.

### 4. So sparen Sie

Mit unserer innovativen Lösung optimieren Sie Ihre Bohrlochverfüllung effizient und sicher:

Exakte Mörtelberechnung:

Unsere App ermöglicht Ihnen, die benötigte Mörtelmenge präzise im Voraus zu berechnen. So planen Sie Ihr Instandsetzungsprojekt mit höchster Genauigkeit und vermeiden Materialverschwendung.

**Präzises Arbeiten:**

Dank der präzisen Akku-Mörtel-Auspressgeräte mit Dosierfunktion können Sie die exakt berechnete Menge mühelos und ermüdungsarm auspressen – ohne einen Tropfen zu viel.

Das Ergebnis? Bis zu 20 % weniger Mörtelverbrauch und damit erhebliche Kosteneinsparungen. Profitieren Sie von smarter Technologie, die Ihre Arbeit schneller, sicherer und kosteneffizienter macht!

**5. Wir sind für Sie da**

Auf die Hilti Ingenieure, Techniker und Berater können Sie sich jederzeit verlassen. Gemeinsam mit Ihnen arbeiten wir – wenn Sie es wünschen – am Erfolg Ihres Instandsetzungsprojekts. Wir unterstützen Sie bei der detaillierten Planung, Berechnung und Kalkulation und stehen Ihnen vor Ort zur Seite, um Ihre Herausforderungen auf der Baustelle erfolgreich zu meistern.



**Bild 3: Hilti semi-automatische Bohreinrichtungen**

## 2.1 Installationsablauf (schematisch)



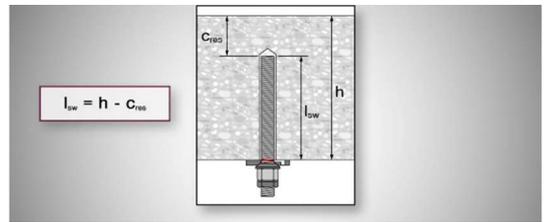
Alle Produkte sind entsprechend den Vorgaben von Hilti zu verwenden und anzuwenden (siehe technische Instruktionen, Gebrauchsanleitungen, Setz- und Installationsanleitungen etc.).



Schritt 1: Lokalisation und Kennzeichnung vorhandener Bewehrungsstäbe, Bügel sowie weiterer Einbauten auf der Betonoberfläche gemäß Spezifikation



Schritt 2: Schritt 2: Anzeichnen der Bohrposition auf der Betonoberfläche entsprechend der Spezifikation oder Detailplanung



Schritt 3: Die erforderliche Bohrtiefe  $l_{sw}$  ist in Abhängigkeit von der Bauteilhöhe  $h$  und der verbleibenden Betondeckung  $c_{res}$  gemäß Spezifikation, Detailplanung oder Installationsanleitung zu bestimmen.

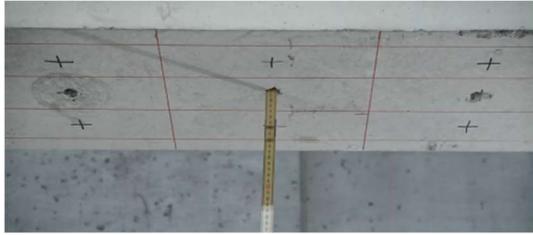
	HAS / HAS-U			
	M12	M16	M20	M24
d [mm]	12	16	20	24
d <sub>s</sub> [mm]	14	18	22	28
c <sub>res</sub> [mm]	35	35	40	60
h <sub>min</sub> [mm]	200	200	400	600
l <sub>sw</sub> [mm]	h - c <sub>res</sub>			

560 mm  $l_{sw} = h - c_{res}$

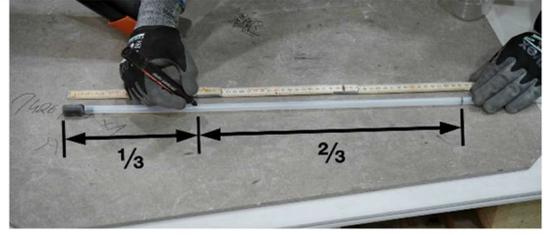
Beispiel zur erforderlichen Bohrlöchertiefe nach Installationsanleitung und nationaler Zulassung (abG).



Schritt 4: Die Bohrlocherstellung ist gemäß der Spezifikation und Detailplanung mit dem jeweils festgelegten Bohrverfahren (Hohlbohrer, Hammerbohrer oder Diamantbohrer) an der Bohrposition bis zur Tiefe  $l_{sw}$  durchzuführen.



**Schritt 5:** Überprüfung der Ist-Bohrlochtiefe mit der Soll-Bohrlochtiefe und Dokumentation, sofern gefordert.



**Schritt 6:** Kennzeichnung der Soll-Bohrlochtiefe am Verlängerungsschlauch und Aufteilung der Gesamtlänge im Verhältnis 1/3 zu 2/3, ausgehend vom Ende des Stauzapfens.



**Schritt 7:** Vorbereitung der Gewindestange zur Positionierung und Arretierung im Bohrloch.



**Schritt 8:** Vorbereitung des spezifizierten Injektionssystems einschließlich sämtlichen erforderlichen Zubehörs.



**Schritt 9:** Verwurf der ersten Hübe nach Vorgabe der Installationsanleitung zur Sicherstellung der ordnungsgemäßen Durchmischung von Harz und Härter.



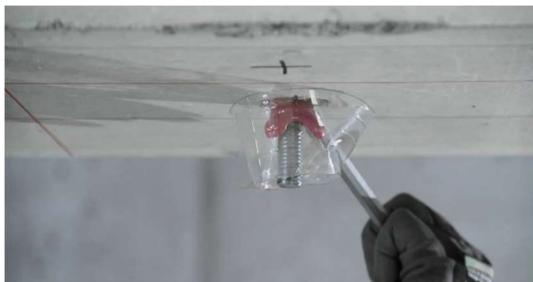
**Schritt 10:** Injektion des Bohrlochs vom Bohrlochgrund aus innerhalb der Verarbeitungszeit mit geeignetem Zubehör zur Sicherstellung einer blasenfreien Verfüllung und ausreichenden Mörtelmenge.



**Schritt 11:** Einschieben der Gewindestange bis zum Bohrlochgrund mit anschließender optischer Kontrolle, ob eine ausreichende Mörtelmenge durch Austritt am Bohrlochmund erkennbar ist.



**Schritt 12:** Ausrichten und Fixieren der Gewindestange mit Hilti Keil HIT-OHW.



**Schritt 13:** Entfernen der Tropfscheibe sowie des Überschussmörtels am Bohrlochmund nach der in der Installationsanleitung angegebenen Aushärtezeit.



**Schritt 14:** Installation des Hilti Verfüllsets manuell oder mit dem SI-AT-22 Adaptiven Drehmomentmodul unter Beachtung aller Komponenten und des maximalen Drehmoments.



**Schritt 15:** Sicherungsmutter handfest anziehen.



**Schritt 16:** Verfüllung der Hilti Dichtscheibe mit geeignetem Hilti Injektionsmörtel durch 1–3 Hübe, entsprechend der Vorgaben in der Installationsanleitung.

**Hinweis:** In Abhängigkeit von der jeweils geltenden Landesbauordnung, bauordnungsrechtlichen Vorgaben oder anderen Regelungen des geografischen Landes ist unter Umständen für jedes Querkraftelement ein Montageprotokoll über die Ausführung anzufertigen und aufzubewahren, sofern gesetzliche oder vertragliche Regelungen dies erfordern.

### 3. RÜCKBLICK: TRAGWERKSMODELL EINES BEWEHRTEN STAHLBETONBALKENS

Ein Stahlbetonbalken mit Längs- und Querkraftbewehrung wird durch vier Hauptelemente des Tragwerksmodells charakterisiert (siehe Bild 4):

1. Ein Druckgurt aus Beton aufgrund der Biegung,
2. Ein Zuggurt aus Längsbewehrung aufgrund der Biegung,
3. Druckstreben aus Beton,
4. Vertikale Zugstreben aus Querkraftbewehrung, die den Druck- und Zuggurt verbinden.

Diese Elemente formen ein Tragwerksmodell, das analog zu einem Fachwerk funktioniert. Dieses Modell wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von Mörsch und Ritter entwickelt und hilft Ingenieuren, die Lastpfade innerhalb des Trägers zu visualisieren.

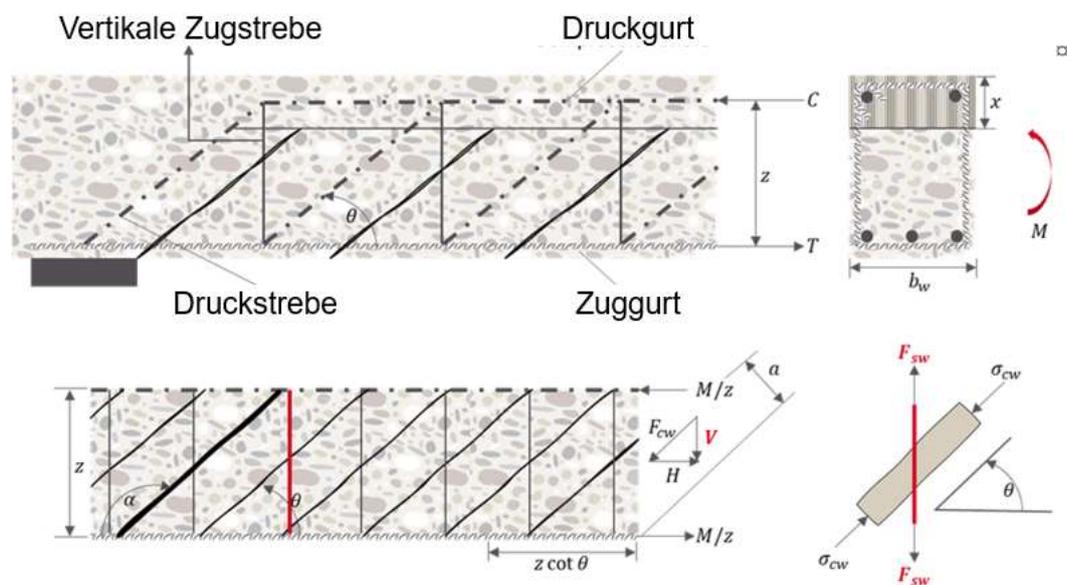


Bild 4: Ein Stahlbetonbalken mit Querkraftbewehrung, dargestellt durch das Mörsch-Ritter-Fachwerk mit Druck- und Zuggurt, der geneigten Druckstrebe und der vertikalen Zugstrebe [5] & [6]

#### 3.1 Anforderungen an die Querkraftbewehrung

Damit das Fachwerkmodell bei der Aufnahme von Querkraften zuverlässig funktioniert, muss die Querkraftbewehrung den Druckgurt umschließen (oder einhaken), um als Zugband die Kraftübertragung im Knotenpunkt zu ermöglichen.

In der Praxis kann diese Anforderung durch den Verbund zwischen Beton und Bewehrung, durch die Zugfestigkeit des Betons oder – am häufigsten – durch eine direkte Verbindung erfüllt werden. Letztere wird durch Querkraftbewehrung mit Endaufbiegung realisiert, entweder mit oder ohne zusätzliche Längsbewehrung in der Druckzone.

Das HIT-Shear-System erfüllt all diese Anforderungen durch die indirekte Verbindung und bietet eine einfache und effiziente Lösung, um Querkräfte sicher aufzunehmen und die Tragfähigkeit von Trägern zuverlässig zu gewährleisten.

## 4. BEMESSUNG VON STAHLBETONBAUTEILEN ZUR AUFNAHME VON QUERKRÄFTEN

### 4.1 Allgemeine Prinzipien

Nach Eurocode 2 (EN 1992-1-1) wird zwischen Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung unterschieden. Eine Querkraftbewehrung kann vernachlässigt werden, wenn die aufgebrachte Querkraft kleiner als die Querkrafttragfähigkeit des ungerissenen Betons ist, das heißt, wenn der Beton alleine in der Lage ist, die vorhandenen Kräfte sicher aufzunehmen.

Nach Eurocode 2 ist dies insbesondere der Fall bei:

- Leicht belasteten Bauteilen, wie Deckenplatten oder großflächigen Fundamenten, die durch ihre breite Querschnittsfläche und die geringen Belastungen keine zusätzliche Querkraftbewehrung benötigen.
- Bauteilen ohne konzentrierte Lasten, bei denen die Querkraft gleichmäßig verteilt ist und keine kritischen Spannungen auftreten, die Risse verursachen könnten.

Eine Querkraftbewehrung wird jedoch notwendig, wenn:

- Konzentrierte Lasten auftreten, wie bei Unterzügen, Stützenauflagerbereichen oder Brückenbalken, da hier erhöhte Schubspannungen auftreten, die den Beton ohne Bewehrung überlasten könnten.
- Die Querkrafttragfähigkeit des ungerissenen Betons überschritten wird, wodurch schräge Risse entstehen können, die die Tragfähigkeit des Bauteils gefährden.
- Eine ausreichende Duktilität erforderlich ist, um nach dem Auftreten von Rissen die Kräfte sicher abzuleiten.

### 4.2 Nachweis ohne Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 & SIA 262:2013

Die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung wird in verschiedenen Normen, wie EN 1992-1-1 und der SIA-Norm (Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins), unterschiedlich formuliert. Diese Unterschiede ergeben sich aus den nationalen Traditionen und den zugrunde liegenden lokalen Prüfmethode, die über Jahrzehnte entwickelt wurden.

Obwohl die zugrunde liegenden Gleichungen und Ansätze variieren, führen sie in der Praxis oft zu vergleichbaren Ergebnissen, da die grundlegenden Prinzipien der Querkraftbemessung ähnlich sind.

- Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung (EN 1992-1-1):

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w \cdot d \quad (1)$$

In der SIA 262:2013 gibt es kleinere Unterschiede bei der Bemessung der Tragfähigkeit von Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung:

- Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung (SIA 262:2013):

$$V_{Rd} = k_d \tau_{cd} d_v b_w \quad (2)$$

### 4.3 Nachweis mit Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 & SIA 262:2013

Ein zentrales Merkmal moderner Bemessungsnormen ist die Annahme, dass die vorgesehene Querkraftbewehrung (siehe Bild 5) sämtliche verbleibenden Querkräfte aufnehmen muss, wenn der Beton allein nicht in der Lage ist, alle auftretenden Querkräfte zu tragen. Ähnlich wie bei den diagonalen Druckstreben eines offenen Fachwerks spielt der Neigungswinkel  $\theta$  der Druckstreben dabei eine entscheidende Rolle. Dieser Winkel beeinflusst:

- den maximalen Widerstand der Betondruckstrebe vor dem Versagen der Druckstrebe ( $V_{Rd,max}$ )
- als auch den Widerstand der Querkraftbewehrung vor dem Versagen durch Fließen ( $V_{Rd,s}$ ).

Die kleinere dieser beiden Größen bestimmt die Gesamtquerkrafttragfähigkeit  $V_{Rd}$  des Bauteils.

Wenn eine Bemessung eine Querkraftbewehrung erfordert, sind drei Kriterien maßgeblich, um deren notwendige Menge zu bestimmen:

1. Mindestquerschnitt  $A_{sw,min}$ : Es muss ausreichend Querkraftbewehrung vorhanden sein, damit die Bewehrung nicht fließt, sobald die ersten Schubrisse auftreten.
2. Erforderlicher Querschnitt  $A_{sw}$ : Die Menge an Querkraftbewehrung muss ausreichen, um die aufgebrachte Bemessungslast sicher zu tragen.
3. Bewehrungsverhältnis  $\rho_w$ : Das Verhältnis zwischen der Querkraftbewehrung und dem Betonquerschnitt muss so gewählt sein, dass das Fließen der Bewehrung sichergestellt wird, während ein sprödes Versagen der Druckstrebe vermieden wird.

Normen wie EN 1992-1-1:2004 und SIA 262:2013 verwenden zur Bestimmung der erforderlichen Querkraftbewehrung das Fachwerkmodell oder das Spannungsfeldmodell. Dabei greifen sie auf eine konsistente Bemessungsformel zurück, die sich nur geringfügig in den Grenzwerten für den Druckstrebenwinkel  $\theta$  unterscheidet.

Somit wird ein einheitlicher Ansatz gewährleistet, der die sichere Bemessung von Bauteilen mit Querkraftbewehrung ermöglicht.

- Fließkraft pro Bügel: 
$$F_{wi} = A_{sw} \cdot f_{ywd} \quad (3)$$

- Anzahl der Bügel innerhalb  $\Delta x$ : 
$$n = \frac{z \cdot \cot(\alpha)}{s} \quad (4)$$

- Alle Bügelkräfte innerhalb  $\Delta x$ : 
$$V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \frac{z \cdot \cot \theta}{s} \quad (5)$$

- Wenn die Bügel geneigt sind ( $\alpha \neq 90^\circ$ ): 
$$V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw} \cdot z}{s} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

- Nach EN 1992-1-1:2004 beträgt die Bügelneigung  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , der minimale Querkraftbewehrungsgrad: 
$$\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (7)$$

- Nach SIA 262:2013 beträgt die Bügelneigung  $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , der minimale Querkraftbewehrungsgrad 
$$\rho_{w,min} = 0,001 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{30}} \cdot \frac{500}{f_{sk}} \quad (8)$$

Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft aufgrund der Betondruckstrebe:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (9)$$

Aus demselben Modell wird die maximal wirksame Menge an Querkraftbewehrung mit der folgenden Gleichung berechnet (unter der Annahme  $\cot \theta = 1$ ):

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad (10)$$

Annahme eines variablen Druckstrebenwinkels:  $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{max} \leq \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} \cdot b_w \cdot \sin^2 \theta \quad (11)$

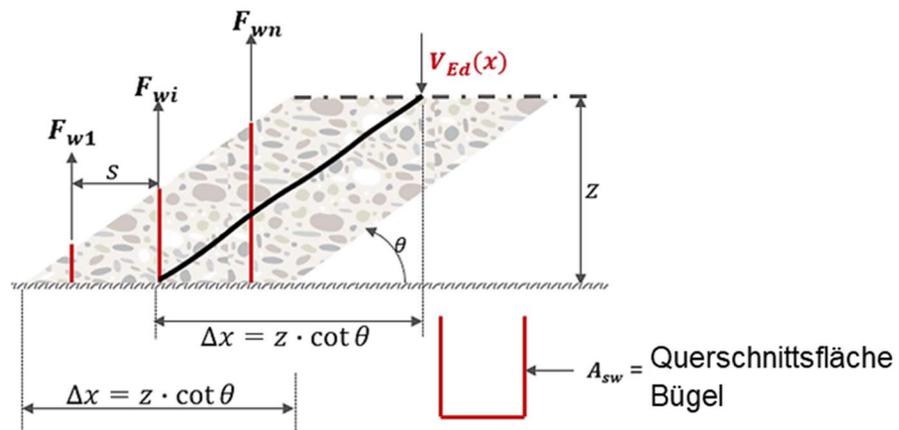
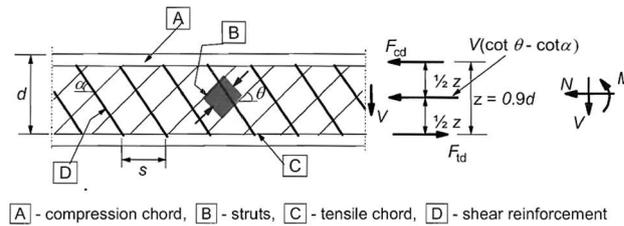
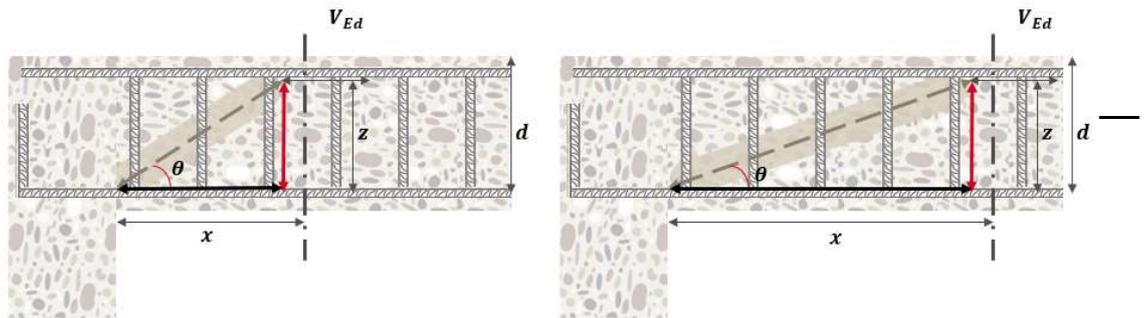


Bild 5: Bemessungsmodell für die Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung: (oben) Fachwerkmodell aus EN 1992-1-1:2004 [8]; (unten) Skizze mit vertikalen Bügeln.

Der Neigungswinkel  $\theta$  steigt proportional zur Größe der auf ein Betonbauteil wirkenden Querkraft an. Die Bemessung ermöglicht es dem Tragwerksplaner, innerhalb eines bestimmten Bereichs einen größeren Druckstrebenneigungswinkel zu wählen.

Ein höherer Winkel erhöht den Widerstand der Druckstrebe, um höhere einwirkende Querkräfte  $V_{Ed}$  aufzunehmen. Dies verringert den Beitrag der Querkraftbewehrung, wodurch jedoch mehr Bewehrung erforderlich wird, um die Anforderungen zu erfüllen, wie in Bild 6 veranschaulicht.



- $\theta_{max} = 45^\circ \rightarrow V_{Ed}$  wird über 3 Bügel aufgenommen
- Höchster Widerstandswert  $V_{Rd,max}$
- Kleinster Widerstandswert bzw. kleinste zusätzliche Zugkraft infolge Querkraft  $V_{Rd,s}$  &  $\Delta F_{td}$

- $\theta_{min} = 18,4^\circ \rightarrow V_{Ed}$  wird über 5 Bügel aufgenommen
- Kleinster Widerstandswert  $V_{Rd,max}$
- Größter Widerstandswert bzw. größte zusätzliche Zugkraft infolge Querkraft  $V_{Rd,s}$  &  $\Delta F_{td}$

Bild 6: Schematische Darstellung des Einflusses der Neigung der Druckstrebe auf den Widerstand der Druckstrebe und der Querkraftbewehrung: (links) maximale und (rechts) minimale zulässige Neigung

#### 4.4 Optimierung der Querkraftbemessung durch Anpassung des Druckstrebenwinkel $\theta$

Wird der Neigungswinkel der Druckstreben  $\theta$  für eine einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  reduziert, ergeben sich folgende Effekte:

##### 1. Erhöhte Kräfte in den geneigten Druckstreben:

- Eine flachere Neigung führt zu einer höheren Kraft in den Druckstreben, was dazu führen kann, dass der Beton bei einer niedrigeren Querkraft  $V_{Ed}$  versagt.
- Die Querkraft, bei der die Druckstreben des Betons versagen ( $V_{Rd,max}$ ), definiert die maximale Querkrafttragfähigkeit eines Querschnitts.
- Wenn diese Grenze erreicht wird, ist ein höherer Widerstand durch zusätzliche Querkraftbewehrung ( $V_{Rd,s}$ ) nicht mehr sinnvoll, da das Versagen der Druckstreben die maßgebende Versagensart wird.

##### 2. Breitere Verteilung der Querkraftbewehrung:

- Ein flacher Druckstrebenwinkel ermöglicht den Einsatz von mehr Bügeln zur Aufnahme der Querkraft  $V_{Ed}$ .
- Dadurch sinkt die erforderliche Menge an Querkraftbewehrung, da mehrere Bügel gleichzeitig zur Tragfähigkeit beitragen können.

##### 3. Erhöhte Zugkräfte in der Längsbewehrung:

- Eine flache Druckstrebenneigung führt zu einer höheren Zugkraft  $\Delta F_{td}$  in der Längsbewehrung.
- Diese zusätzlichen Zugkräfte müssen durch eine geeignete Verankerungslänge in den Auflagerbereichen aufgenommen werden.

Durch die Optimierung des Druckstrebenwinkel  $\theta$  wird die Tragfähigkeit des Systems besser genutzt, gleichzeitig aber auch das Versagensverhalten beeinflusst. Eine sorgfältige Abwägung zwischen den

oben genannten Effekten ist entscheidend, um eine sichere und wirtschaftliche Bemessung zu gewährleisten.

## 5. FRAGEN UND ÜBERLEGUNGEN FÜR DIE WAHL DER PASSENDEN VERSTÄRKUNGSMAßNAHME

Die Auswahl der optimalen Verstärkungsmethode für ein Bauwerk erfordert eine sorgfältige Abwägung verschiedener Faktoren. Diese Überlegungen helfen, eine fundierte Entscheidung zu treffen, die sowohl technisch als auch wirtschaftlich sinnvoll ist.

### Grund und Ziel der Verstärkung:

- Warum ist eine Verstärkung erforderlich?  
Beispiel: Ist die Verstärkung notwendig, um eine zusätzliche Etage aufzubauen, die Belastung durch neue Maschinen zu tragen oder Schäden durch Korrosion zu beheben?
- Welches Bauteil soll verstärkt werden?  
Beispiel: Handelt es sich um eine Stütze, einen Träger, eine Decke oder ein Fundament?  
Unterschiedliche Bauteile erfordern spezifische Maßnahmen.

### Erforderliche Tragfähigkeitszunahme:

- Wie viel zusätzliche Tragfähigkeit wird benötigt?

Beispiel: Soll die Tragfähigkeit um 20 % erhöht werden, um höhere Verkehrslasten zu tragen, oder wird eine Verdopplung benötigt, z. B. bei der Umnutzung eines Gebäudes?

### Entlastung des Bauteils vor der Verstärkung:

- Muss das Bauteil vor der Verstärkung temporär entlastet werden?  
Beispiel: Bei einem stark beanspruchten Unterzug kann es erforderlich sein, diesen vor der Verstärkung mit provisorischen Abstützungen zu entlasten, um Spannungszustände während der Maßnahme zu minimieren.

### Projektgröße:

- Sind spezielle Materialien oder Methoden aufgrund der Projektgröße kosteneffizient?  
Beispiel: Bei kleinen Projekten wie der Verstärkung eines einzelnen Trägers sind einfache Maßnahmen möglicherweise wirtschaftlicher.
- Kleinere Projekte könnten weniger von aufwändigen oder materialintensiven Verfahren profitieren.  
Beispiel: Aufwändige Vorspannsysteme lohnen sich meist nur bei größeren Bauwerken wie Brücken oder großen Industriehallen.

### Umgebungsbedingungen:

- Welche äußeren Einflüsse (z. B. Temperatur, Brandrisiko, Korrosion) müssen berücksichtigt werden?  
Beispiel: Bei einem Tunnel muss die Verstärkung andere Brandschutzanforderungen als im Hochbau erfüllen
- Ist der bestehende Beton ausreichend tragfähig, um die Verstärkung sicher zu tragen?  
Beispiel: Bei älteren Bauwerken kann es notwendig sein, die Betondruckfestigkeit zu prüfen, um sicherzustellen, dass der Beton für die gewählte Methode geeignet ist.

**Maßliche und räumliche Einschränkungen:**

- Gibt es Vorgaben oder Einschränkungen in Bezug auf Dimensionen oder Abstände?  
Beispiel: In engen Tiefgaragen können Platzmängel Maßnahmen erschweren, während andere Maßnahmen besser geeignet sein können.

**Zugänglichkeit und betriebliche Anforderungen:**

- Wie gut ist das Bauteil für die Anwendung der Verstärkungsmethode und spätere Wartung zugänglich?  
Beispiel: In schwer zugänglichen Bereichen wie unter Brücken oder in Schächten sind leichte Materialien und minimal invasive Verfahren von Vorteil.
- Gibt es betriebsbedingte Einschränkungen, wie z. B. eine begrenzte Bauzeit?  
Beispiel: Bei der Verstärkung einer Deckenplatte in einem Krankenhaus muss die Maßnahme nachts oder an Wochenenden durchgeführt werden, um den Betrieb nicht zu stören.
- Muss das Bauteil während der Verstärkung weiter nutzbar sein?  
Beispiel: Bei der Verstärkung von Brücken kann es notwendig sein, den Verkehr teilweise weiterzuführen, was die Wahl der Methode beeinflusst.

**Ästhetische Anforderungen:**

- Soll die Verstärkung optisch unauffällig oder gestalterisch ansprechend sein?  
Beispiel: In denkmalgeschützten Gebäuden wird oft eine unauffällige Verstärkung bevorzugt.

**Verfügbarkeit und Kosten:**

- Sind die benötigten Materialien, die erforderliche Ausrüstung und qualifizierte Fachkräfte vor Ort verfügbar?  
Beispiel: Bei der Verstärkung mit hochfestem Beton (UHPC) oder speziellen CFK-Lamellen muss geprüft werden, ob diese Materialien lokal verfügbar sind.
- Wie hoch sind die Anfangsinvestitionen und die Lebenszykluskosten der Verstärkung?  
Beispiel: Bestimmte Systeme haben höhere Anfangsinvestitionen, können jedoch durch eine längere Lebensdauer und geringeren Wartungsaufwand kosteneffizienter sein.

## 6. EIGNUNGSNACHWEISE FÜR HIT-SHEAR

Während einbetonierte Querkraftbewehrungssysteme in der Bauindustrie weit verbreitet sind, gibt es für nachträglich installierte Querkraftverstärkungssysteme für Stahlbetonbauteile derzeit keine europäische Bewertungsrichtlinie (EAD) oder harmonisierte Norm (hEN). Solche Systeme erfordern daher einen Eignungsnachweis, um ihre Leistungsfähigkeit für die Bemessung und Anwendung zur Querkraftverstärkung zu bewerten.

In solchen Fällen bietet Anhang D der EN 1990:2002 [10] die Möglichkeit, durch eine Kombination aus Versuchen und Bemessungsmodellen eine Bemessungsgleichung zu entwickeln, die den Zuverlässigkeitsanforderungen der EN 1990 entspricht.

Gemäß der Europäischen Technischen Bewertung (ETA)-20/0541 [11] wurde die Kombination aus Hilti HIT-RE 500 V4 Epoxidharzmörtel, HAS(-U) Gewindestangen aus Kohlenstoffstahl oder Edelstahl sowie dem Hilti Verfüllset bereits als Dübel in Beton bewertet und zugelassen.

### 6.1 Testprogramm zur Bewertung des HIT-Shear Systems

Um das Verhalten dieser innovativen Lösung zur Querkraftverstärkung zu bewerten, wurde ein umfassendes Versuchsprogramm durchgeführt, bei dem der Einfluss folgender Hauptparameter auf die Querkrafttragfähigkeit untersucht wurde:

1. Durchmesser, Abstand und Einbaulänge der Gewindestangen,
2. Bauteildicke des Betonbauteils,
3. Betonfestigkeit.

Zusätzlich wurden experimentelle Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt, um die Robustheit des Systems zu bewerten, auch unter ungünstigen Installationsbedingungen, wie:

- Exzentrizitäten der HIT-Shear Elemente von der Bauteilachse bei der Installation,
- Unbeabsichtigte Neigungen der HIT-Shear Elemente während des Einbaus,
- Vorhandensein von bestehenden Querkraftrissen unter Gebrauchslast.

Auf Basis dieser umfassenden experimentellen Untersuchung wurde ein Modell zur Querkrafttragfähigkeit entwickelt, das die Zuverlässigkeitsanforderungen von Anhang D der EN 1990 erfüllt. Dieses Modell führte zu einer Bemessungsgleichung, die mit der EN 1992-1-1 übereinstimmt und im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben wird.

### 6.2 HIT-Shear durch das DIBt zugelassen

Die gesamte Versuchsreihe, die an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) durchgeführt wurde, wurde vom DIBt evaluiert und für anwendungsgesamt erklärt.

Das System besitzt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (aBG Z-15.5-383), wodurch die nationalen Anforderungen für Bauwerke gemäß der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) erfüllt werden. Die MVV TB dient als Vorlage für die technischen Baubestimmungen, die auf Bundesebene in Deutschland umgesetzt werden.

## 7. BEMESSUNGS- UND DETAILIERUNGSANSATZ MIT HILTI HIT-SHEAR

Die neue Hilti-Lösung zur Querkraftverstärkung umfasst den HIT-RE 500 V4 Mörtel sowie HAS- oder HAS-U Gewindestangen in Kombination mit dem Hilti Verfüllset, Muttern und Unterlegscheiben. Die Installation dieser Lösung ähnelt der eines Verbunddübels:

1. Bohren bis zu einer festgelegten Verankerungstiefe, senkrecht zur Betonoberfläche,
2. Reinigen der Bohrlöcher von Staub und Schmutz,
3. Einbringen des Mörtels und anschließendem Einsetzen der Gewindestangen,
4. Nach dem Aushärten des Mörtels werden die Muttern handfest angezogen.

Diese Lösung ist durch die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (aBG) Z-15.5-383 des DIBt genehmigt und nutzt die Vorgaben für die bemessungsunterstützte Prüfung aus Anhang D der EN 1990.

Das angewandte Widerstandsmodell ist vollständig mit den Bemessungsvorschriften in DIN EN 1992-1-1/NA [12] und DIN EN 1992-2/NA [13] kompatibel. Die erforderlichen Nachweise entsprechen den Gleichungen (6.8) und (6.9) aus DIN EN 1992-1-1/NA, die den Widerstand der einbetonierten Bügelbewehrung sowie den maximalen Widerstand der Druckstreben definieren. Abschnitt 4 dieses Dokuments erläutert den Hintergrund dieser Gleichungen.

Das Widerstandsmodell basiert auch auf der Methode der variablen Druckstrebenneigung, die es ermöglicht, den Neigungswinkel der Druckstreben anzupassen, um die Kräfte zwischen den Druckstreben und den Verstärkungselementen auszubalancieren. Dies kann zu wirtschaftlicheren Bemessungen führen, da weniger Gewindestangen erforderlich sein könnten.

Im Bemessungsnachweise ist Gl. 12 sicherzustellen:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}, V_{Rd,s}) \quad (12)$$

### 7.1 Nachweis der Druckstrebe

Wenn die nachträglich installierten HIT-Shear Elemente senkrecht zur Längsachse des Betonbauteils eingebaut werden, beträgt der Einbauwinkel  $\alpha = 90^\circ$ . Der Widerstand der Druckstrebe ergibt sich gemäß Gleichung (6.9) der DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, NCI zu 6.2.3(1) wie folgt:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_{w,eff} \cdot \alpha_{cw} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (13)$$

Hier ersetzt die effektive Breite des verstärkten Querschnitts,  $b_{w,eff}$ , die Gesamtquerschnittsbreite,  $b_w$ , wobei ein Parameter für die Exzentrizität,  $e_{inst}$ , berücksichtigt wird. Dieser Parameter erhöht sich entweder auf ein Maximum von 50 mm oder  $b_w/6$  in Bezug auf den Schwerpunkt des Trägers, abhängig von der Positionierung der HIT Shear Elemente während der Installation (s. Bild 7).

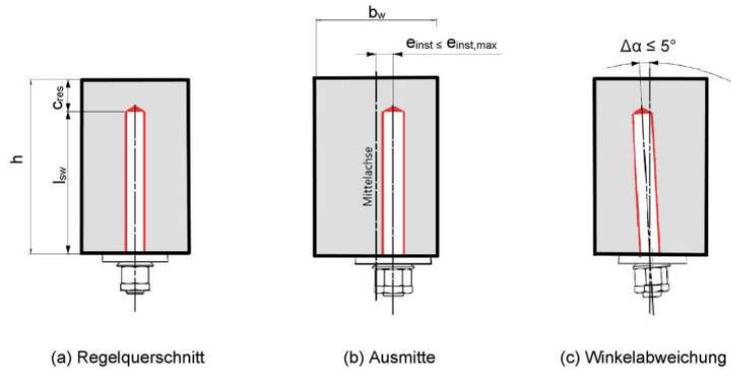


Bild 7: Zulässige Einbautoleranzen

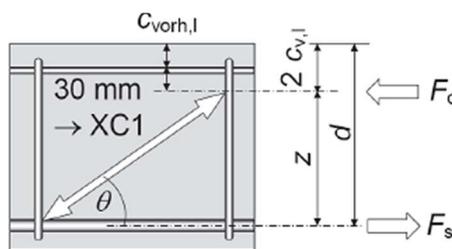
Es ist zu beachten, dass diese Exzentrizität nur für eine einzelne Reihe von Gewindestangen gilt, da eine einzelne exzentrische Zugstrebe zu einer Torsionsbelastung des Bauteils führt, die proportional zur aufgetragenen Querkraft ist.

Somit gilt:

$$b_{w,eff} = b_w - \min \left( e_{inst}, 50 \text{ mm}, \frac{b_w}{6} \right) \quad (14)$$

Die übrigen Parameter in der Gleichung weichen nicht von DIN EN 1992-1-1/NA ab:

- Hebelarm  $z = 0,9d$ , mit einer Obergrenze von  $z = \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$ . Dabei ist  $d$  die statische Nutzhöhe bis zur Biegebewehrung, und  $c_{v,l}$  die Betondeckung der Längsbewehrung in der Druckzone, wie in Bild 8 dargestellt.


 Bild 8: Definition des inneren Hebelarms,  $z$ 

- Der dimensionslose Faktor  $\alpha_{cw} = 1$  berücksichtigt den Spannungszustand im Druckgurt.
- Der Festigkeitsreduktionsfaktor für Beton, der bei Querkraft beansprucht ist,  $v_1 = 0,75$ .
- Die Bemessungsdruckfestigkeit des Betons,  $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$ , wobei  $\alpha_{cc} = 0,85$  und  $\gamma_c = 1,5$ .
- Der Druckstrebenwinkel  $\theta$  ist durch Gleichung (6.7aDE) in DIN EN 1992-1-1/NA begrenzt:

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \leq 3,0 \quad (15)$$

- In Gl. (15),  $V_{Rd,cc} = 0,5 \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} \left( 1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) \cdot b_{w,eff} \cdot z$ , (16)
- Bei der Bemessung nach DIN EN 1992-2/NA wird der Druckstrebenwinkel durch Gleichung (6.107aDE) begrenzt:

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2+1,4\sigma_{cp}/f_{cd}}{1-V_{Rd,cc}/V_{Ed}} \leq 1,75 \quad (17)$$

Da  $V_{Ed} > V_{Rd,cc}$  ist, bleibt der Wert von  $\cot \theta > 3,0$ , bis eine ausreichend große Querkraft  $V_{Ed} \gg V_{Rd,cc}$  erreicht wird, wodurch  $\cot \theta < 3,0$  reduziert wird. Diese neu berechnete obere Grenze entspricht der maximalen Neigung der Druckstrebe für Bauteile mit minimaler Querkraftbewehrung und einem entsprechend reduzierten Widerstand der Druckstrebe.

Bild 9 zeigt ein Beispiel, bei dem eine zunehmende Querkraft den Druckstrebenwinkel gemäß Gleichung (6.7aDE) aus DIN EN 1992-1-1/NA erhöht.

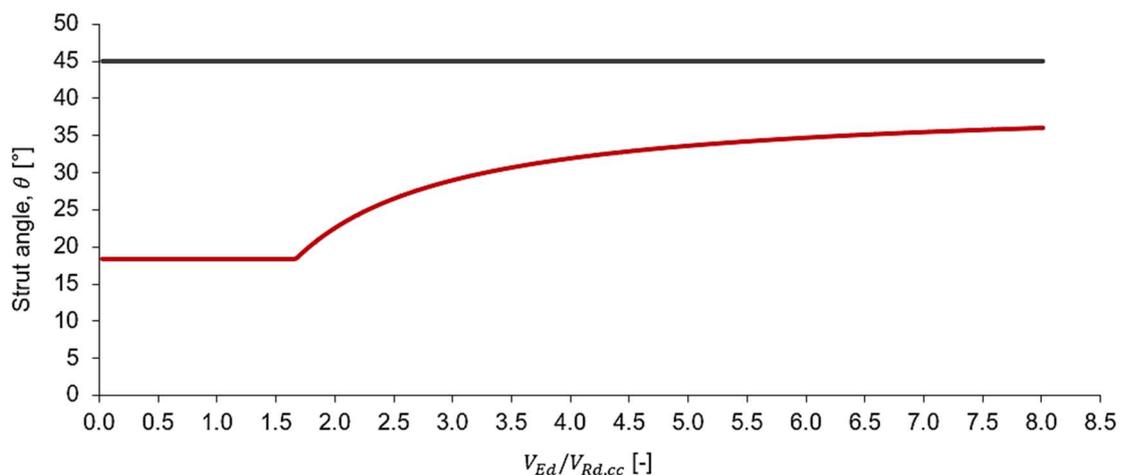


Bild 9: Beziehung zwischen dem Verhältnis  $V_{Ed}/V_{Rd,cc}$  und dem berechneten Druckstrebenwinkel (die horizontale Linie bei 45° stellt den maximalen Druckstrebenwinkel dar)

## 7.2 Zusätzliche Zugkraft in der Längsbewehrung aufgrund der Querkraftbemessung

Obwohl für die Nachweise der Stahl- oder Druckstrebenfestigkeit nicht explizit erforderlich, erzeugt die Einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.3(7) eine zusätzliche Zugkraft  $\Delta F_{td}$  in der Längsbewehrung. Diese zusätzliche Kraft steigt an, wenn die Neigung der Druckstrebe verringert wird.

Diese Kraft kommt zu der durch die Biegung verursachten Zugkraft in der Längsbewehrung hinzu und erfordert einen separaten Nachweis, um ein Fließen der Bewehrung oder ein Versagen der Verankerung zu vermeiden.

Bei Neubauten kann dieser Nachweis für die zusätzliche Zugkraft entfallen, wenn die maximale Biegung des Betonbauteils  $M_{Ed,max}$  bereits bei der Bemessung der Bewehrung und deren Verankerung berücksichtigt wurde.

## 7.3 Nachweis der Querkraftbewehrung

Mit den nachträglich installierten HIT-Shear Elementen, die orthogonal zur Längsachse des Betonbauteils eingebaut werden, beträgt der Einbauwinkel  $\alpha=90^\circ$ , und der Widerstandswert ergibt sich gemäß DIN EN 1992-1-1/NA mit:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (18)$$

Während die Variablen für den Hebelarm  $z$  und den Druckstrebenwinkel  $\theta$  gegenüber der Überprüfung der Druckstrebe unverändert bleiben, stammt der Wert für  $f_{ywd}$  aus der nationalen Zulassung und beträgt  $390 \text{ N/mm}^2$  sowohl für HIT-Shear Elemente aus A4-Edelstahl als auch aus 8.8 Kohlenstoffstahl.

Der beanspruchte Querschnitt der nachträglich installierten HIT-Shear Elemente,  $a_{sw}$ , bezogen auf die Längen des Betonbauteils, ergibt sich aus der Kombination folgender Faktoren:

- Anzahl der HIT-Shear Elemente in Querrichtung,  $n_{swt}$ ,
- Abstand der HIT-Shear Elemente in Längsrichtung,  $s_{wl}$ ,
- Beanspruchte Querschnittsfläche der HIT-Shear Elemente jedes Elements,  $A_{sw}$ .

$$\text{Mit } a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wl}} \quad (19)$$

Material	Durchmesser	Bemessungswert der Fließgrenze $f_{ywd}$ [MPa]	Spannungsquerschnitt $A_{sw}$ [mm <sup>2</sup> ]
HAS 8.8, HAS-U 8.8, HAS A4, HAS-U A4	M12	390	84,3
	M16		157
	M20		245
	M24		353

Tabelle 1: Geometrische und Materialparameter für die Verwendung in Gleichung (18) und (19)

Zusätzlich finden sich in der Zulassung zwei weitere Koeffizienten,  $k_s$  und  $k_{pi}$ , die berücksichtigt werden müssen.

- Ein größenabhängiger Koeffizient  $k_s$  als Funktion des Hebelarms  $z$  (in Metern) für Bauteildicken  $h$  zwischen 200 und 2200 mm, wobei ein größerer Hebelarm diesen Koeffizienten reduziert (Gl. 20)

$$k_s = \begin{cases} 1,0 & \text{wenn } z \leq 0,75m \\ 1,15 - 0,20 \cdot z & \text{wenn } z > 0,75m \end{cases} \quad (20)$$

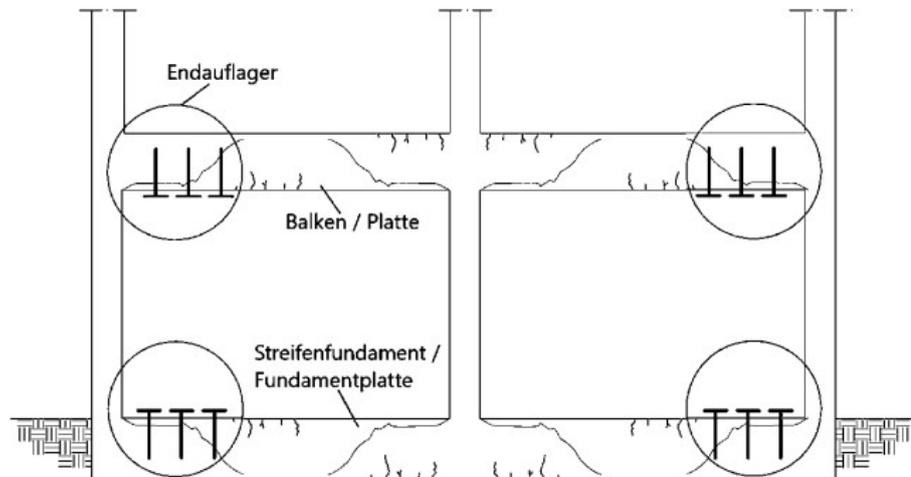
- Der Koeffizient für nachträglich installierte Querkraftverstärkungen,  $k_{pi}$ , der sich aus folgenden Gesichtspunkten zusammensetzt:
  - Vergleich der Wirksamkeit der HIT-Shear Elemente mit der Wirksamkeit einer einbetonierter Bügelbewehrung,
  - Berücksichtigung der Dauerhaftigkeitsfaktor (Langzeitverhalten), der die langfristigen Einflüsse auf die Verbundfestigkeit des Mörtels berücksichtigt,
  - Einfluss der Installationssensitivität und Toleranzen auf die Leistungsfähigkeit,
  - Einfluss von Biege- und Querrissen im Verankerungsbereich auf die HIT-Shear Elemente im Bezug zur Einbaurichtung.

HIT Shear	Gewindestangendurchmesser	Installation von Zugseite (Konfiguration A)	Installation Druckseite (Konfiguration B)
Leistungsparameter $k_{pt}$	M12	0,735	0,588
	M16		
	M20		
	M24		

Tabelle 2: Leistungsparameter  $k_{pt}$ , der bei der Überprüfung der Verstärkungsstangen verwendet wird.

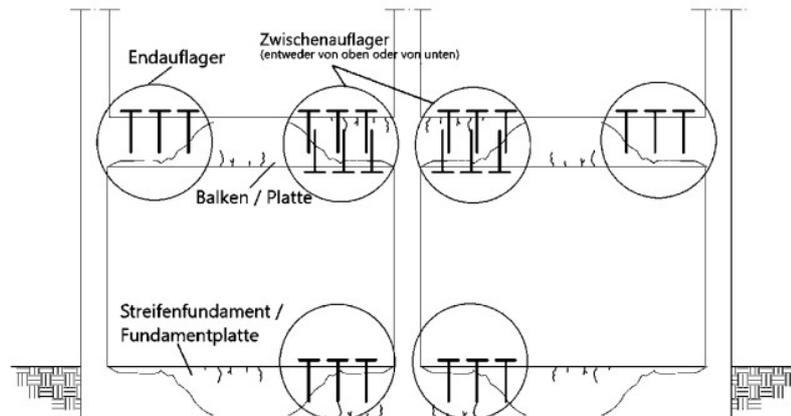
Obwohl das Verstärkungssystem sowohl von der Zug- als auch von der Druckseite eines Betonbauteils installiert werden kann, muss zwischen zwei Anwendungen unterschieden werden. Bild 10 und Bild 11 veranschaulichen die zwei zu Unterscheidenden Konfigurationen:

- Konfiguration A: Installation von der Zugseite des Bauteils ohne den Einfluss von Biegerissen auf das Ende der HIT-Shear Elemente.
- Konfiguration B: Installation von der Druckseite des Bauteils mit Überlagerung von Biegerissen und Schubrisen im Verankerungsbereich der HIT-Shear Elemente.



**Konfiguration A:**

Bild 10: Beispiel für Konfiguration A, bei der die Installation von der Zugseite des Bauteils erfolgt bzw. ohne den Einfluss von Biegerissen im Verankerungsbereich



**Konfiguration B:**

Bild 11: Beispiel für Konfiguration B, bei der die Installation von der Druckseite des Bauteils erfolgt bzw. bei der eine Überlagerung von Biegerissen und Schubrisen im Verankerungsbereich auftritt

## 7.4 Zusätzliche Anforderung an das HIT Shear System

### Installationslänge / Verankerungstiefe, $l_{sw}$

Wie aus den Gleichungen (14) und (19) für die nachträglich installierte Querkraftverstärkung hervorgeht, erfordert das Bemessungsmodell keine explizite Berücksichtigung der Einbaulänge  $l_{sw}$  in den Nachweisen, da diese eine Funktion der Bauteilhöhe  $h$  und der verbleibenden Betondeckung  $c_{res}$  ist (siehe Bild 12).

Aus Sicht der Installation verhindert die verbleibende Betondeckung das Abplatzen oder Absprengen des Betons auf der gegenüberliegenden Seite der Bohrung.

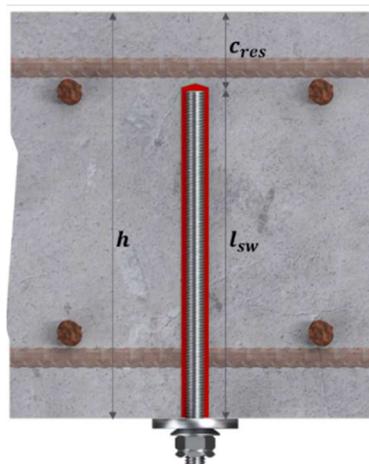


Bild 12: Vereinfachte schematische Darstellung der Installation, aus [14]

Aus bemessungstechnischer Sicht stellt eine feste Einbaulänge sicher, dass die Querkraftbewehrung im Druckgurt des Bauteils verankert wird. Dies ermöglicht die Bildung des Fachwerkmodells. Wie bereits in Abschnitt 2 dieses Dokuments erwähnt, basiert das Fachwerkmodell der Querkraftbemessung darauf,

dass die Querkraftbewehrung den Druckgurt umschließt oder sich dort einhakt, um die Kraftübertragung in den Knotenpunkten zu gewährleisten.

In diesem Zusammenhang kann die Kombination aus großdimensionierter Verstärkungsbewehrung (z. B. M24-Gewindestangen) in dünneren Platten (z. B. 200 mm) zu kritischen Szenarien führen. In solchen Fällen verbleibt bei einer Betondeckung  $c_{res}$  von 60 mm lediglich eine Einbaulänge  $l_{sw}$  von 140 mm, was unzureichend ist, um den Fachwerkmechanismus in den Knotenpunkten effektiv zu verankern.

Solche Kombinationen sind daher nicht zulässig. Es ist erforderlich, eine Korrelation zwischen Bauteilhöhe und Bewehrungsdurchmesser herzustellen, wie in Tabelle 3 [14] beschrieben.

	Durchmesser der Verstärkungselemente				
	M12	M16	M20	M24	
<b>Minimale Bauteilhöhe, <math>h_{min}</math> [mm]</b>	200	400	600		
<b><math>c_{res}</math> [mm]</b>	35	35	40	45	60

Tabelle 3: Zusammenhang zwischen der minimalen Bauteilhöhe, der Restbetondeckung und dem Durchmesser der Verstärkungselemente gemäß Tabelle 3 aus [14]

#### Mindestabstände in Quer- und Längsrichtung, $s_{wl}$

Für nachträglich installierte Bewehrung sind definierte Mindestabstände der HIT-Shear-Elemente notwendig, um ein Spalten zwischen den HIT-Shear-Elementen und eine mögliche Reduzierung der Gesamtquerkrafttragfähigkeit zu vermeiden. Tabelle 4 zeigt die Mindestabstände in Längs- und Querrichtung.

Durchmesser der Verstärkungselemente	Mindestabstand in Längsrichtung, $s_{wl,min}$ [mm]	Mindestabstand in Querrichtung, $s_{wl,min}$ [mm]
<b>M12</b>	120	120
<b>M16</b>	160	160
<b>M20</b>	200	200
<b>M24</b>	240	240

Tabelle 4: Mindestabstand von Achse zu Achse für jedes Verstärkungselement, übernommen aus Tabelle 11 von [14]

Wie in Tabelle 5 und Tabelle 6 zu sehen ist, entsprechen die maximalen Abstände in Längs- und Querrichtung den Vorgaben in DIN EN 1992-1-1/NA, Tabellen NA.9.1 und NA.9.2 für lineare Bauteile sowie NCI zu 9.3.2 (4) für flächige Bauteile, wobei  $V_{Rd,max}$  aus Gleichung (1) ohne Änderungen verwendet wird.

Verhältnis von Querkrafteinwirkung zu Druckstrebenwiderstand	Maximaler Abstand in Längsrichtung, $s_{wl,max}$ [mm]	Maximaler Abstand in Querrichtung, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	min (0,7h, 300 mm)	min (h, 800 mm)
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	min (0,5h, 300 mm)	min (h, 600 mm)
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	min (0,25h, 200 mm)	

Tabelle 5: Maximaler Achse-zu-Achse-Abstand in linearen Bauteilen (z. B. Trägern), entnommen aus den Tabellen NA.9.1 und NA.9.2 von [12]

Verhältnis von Querkrafteinwirkung zu Druckstrebenwiderstand	Maximaler Abstand in Längsrichtung, $s_{wl,max}$ [mm]	Maximaler Abstand in Querrichtung, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	$0,7h$	h
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	$0,5h$	
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	$0,25h$	

Tabelle 6: Maximaler Achse-zu-Achse-Abstand in ebenen Bauteilen (z. B. Platten), wiedergegeben aus NCI bis 9.3.2 (4) von [12]

### Randabstand, $c_{wt}$

Das Festlegen eines Mindestabstands zwischen den Verstärkungselementen und jeder Betonkante verringert das Risiko des Spaltens, wobei dieser Mindestabstand in der ETA des Injektionsmörtels ETA 20/0541 [11] berücksichtigt wird. Der Mindestabstand wird jedoch um einen Prozentsatz der Einbaulänge erhöht, der die maximal zulässige Neigung des Bohrlochs ( $5^\circ$ ) senkrecht zur Betonoberfläche berücksichtigt, siehe Tabelle 7.

Bohrsystem	M	Minimaler Randabstand, $c_{wt,min}$ [mm]		Maximaler Randabstand, $c_{wt,max}$ [mm]	
		Ohne Bohrhilfe	Mit Bohrhilfe	Lineare Bauteile	Flächige Bauteile
Hammerbohren	M12	$45 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$45 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	max (175 mm, 0,5h)
	M16	$50 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$50 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
	M20	$55 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$55 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	max (250 mm, 0,5h)
	M24	$60 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$60 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
Druckluftbohren	M12	$50 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$50 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	max (175 mm, 0,5h)
	M16				
	M20	$55 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$55 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	max (250 mm, 0,5h)
	M24				

Tabelle 7: Mindest- und Höchstabstände zu den Rändern basierend auf Bohrmethoden und Toleranzen, entnommen aus Tabelle 14 von [14]

## 8. BEMESSUNGSBEISPIEL

Ein bestehender, einfach gelagerter Balken mit einem Querschnitt von  $b_w \times h = 400 \times 700$  mm aus Beton C30/37 überspannt 8,0 Meter und wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit einer gleichmäßig verteilten Last von 130 kN/m belastet.

Die Betondeckung zur oberen und unteren Längsbewehrung beträgt 40 mm. Die vorhandene Biegebewehrung beträgt:

- **Untere Bewehrung:**

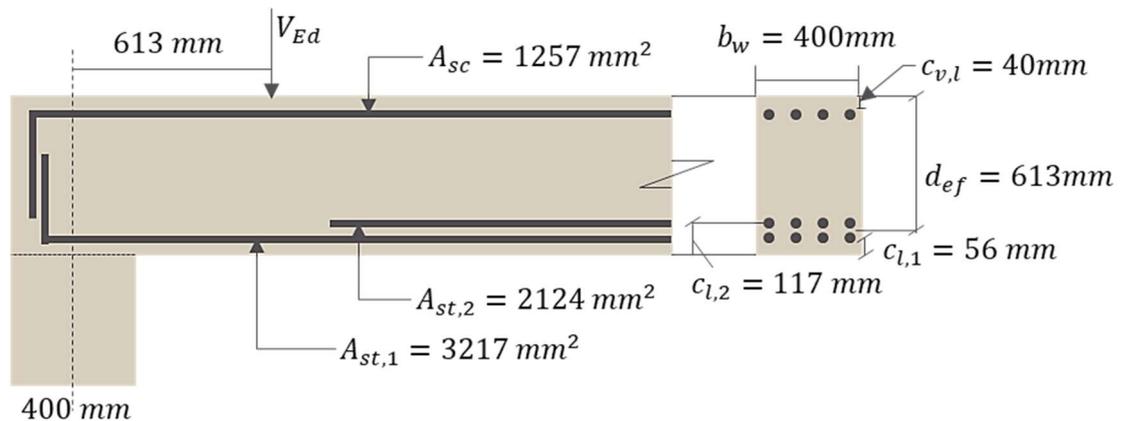
$$A_{s,\text{bottom}} = 4 \pi \cdot 16^2 + 4 \pi \cdot 13^2 = 5341 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{bestehend aus } 4 \times \phi 32 + 4 \phi 26 \text{ in zwei Lagen}$$

- **Obere Bewehrung:**

$$A_{s,\text{top}} = 4 \pi \cdot 10^2 = 1257 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{bestehend aus } 4 \phi 20$$

Das verwendete Bewehrungsmaterial ist **B500B**, mit einer Bemessungstreckgrenze von  $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$ .

Die Tragfähigkeit des bestehenden Bauteils wird gemäß **DIN EN 1992-1-1/NA** nachgewiesen und die Verstärkung erfolgt gemäß **aBG Z-15.5-383**.



Gesamtlast:

$$W_{\text{tot}} = w_d L = 130 \cdot 8.00 = \mathbf{1040 \text{ kN}}$$

Auflagerreaktion,

$$R = \frac{W_{\text{tot}}}{2} = \frac{1040}{2} = \mathbf{520 \text{ kN}}$$

Effektive Entfernung von der Auflagerkante:

$$d_v = H + d_{ef} = 400 + 613 = \mathbf{1013 \text{ mm}}$$

Bezugsstelle zur Berechnung der inneren Kräfte,

$$x = \frac{d_v}{2} = \frac{1013}{2} = \mathbf{506,5 \text{ mm}}$$

6.2.1 (8) [8]

Querkraft in einer Entfernung  $x$  von der Auflagerkante,

$$V_{Ed,x} = R - w_d x = V_{Ed} = 520 - (130 \cdot 0,613) = \mathbf{440 \text{ kN}}$$

6.2.1 (5) [8]

Nachweis,

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$$

Eq. 3.15 [12]

Bemessungswert der Betondruckfestigkeit,

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 30}{1,5} = \mathbf{17 \text{ MPa}}$$

Eq. 6.2.a [8]

Querkraftwiderstand,

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq V_{Rd,c,\text{min}}$$

6.2.2 (1) [8]

Längsbewehrungsgrad,

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w d} = \frac{5341}{400 \cdot 613} = 0,0218 \geq \mathbf{0,02}$$

6.2.2 (1) [8]

Berücksichtigung der Bauteilhöhe,

$$k = 1 + \sqrt{200/613} = 1,571 \leq 2,0$$

NDP Zu 6.2.2 (1) [12]

 Mindestbemessungswert der Schubspannung (Interpoliert  $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$ ),

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0,0525}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{wenn } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0,0375}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{wenn } d > 800 \text{ mm} \end{cases} = \frac{0,0515}{1,5} \cdot (1,571)^{\frac{3}{2}} \cdot (30)^{\frac{1}{2}} = 0,371 \text{ N/mm}^2$$

Eq. 6.2.b [8]

Mindestbemessungswert des Querkraftwiderstands,

$$V_{Rd,c,min} = v_{min} b_w d = 0,354 \cdot 400 \cdot 613 = 90,8 \text{ kN}$$

**Bemessungswert der übertragbaren Querkraft ohne zusätzliche Querkraftbewehrung (ohne HIT-Schubbewehrung),**

$$V_{Rd,c} = \left[ 0,1 \cdot 1,571 \cdot (100 \cdot 0,02 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] 400 \cdot 613 = 150,8 \text{ kN}$$

$$\therefore V_{Rd,c} \leq V_{Ed}, \text{ Querkraftbewehrung erforderlich}$$

6.2.1 (5) [8]

 Nachweis mit Querkraftbewehrung,  $V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) \geq V_{Ed}$ 

NCI Zu 6.2.3 (1) [12]

Hebelarm,

$$z = \min(0,9 \cdot 644; \max(644 - 2 \cdot 40; 644 - 40 - 30)) = 574 \text{ mm}$$

NDP Zu 6.2.3 (2) [12]

Druckstrebenwinkel:

$$1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \leq 3,0$$

Eq. 6.7bDE [12]

$$\text{Mit } V_{Rd,cc} = 0,5 \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left( 1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) \cdot b_{w,eff} \cdot z = 0,5 \cdot 0,48 \cdot \sqrt[3]{30} \cdot 400 \cdot 543 = 162 \text{ kN}$$

$$\text{Mindestwert Druckstrebenwinkel, } \theta = \cot^{-1} \left( \frac{1,2}{1 - 162/440} \right) = 27,77^\circ \text{ (use } \theta = 30^\circ \text{ for design)}$$

Eq. 2.1 [14]

Druckstreben Tragfähigkeit,

$$V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 400 \cdot 543 \cdot 0,75 \cdot 17}{\cot(30) + \tan(30)} = 1199,1 \text{ kN}$$

Eq. 6.17 [8]

Zusätzliche Zugkraft infolge Querkraft,

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot 440 \cdot \cot(30) = 381 \text{ kN}$$

Unter der Annahme, dass zwei Reihen von M16-Gewindestangen mit einer Querschnittsfläche von  $A_{sw} = 157 \text{ mm}^2$  in einem Abstand von 185 mm entlang der Balkenlänge auf der Zugseite installiert werden und ein Faktor von  $k_{pi} = 0,735$  gilt, ergibt sich die erforderliche Querschnittsfläche der nachträglich eingebauten Gewindestange,  $a_{sw}$ , relativ zur Länge des Betonbauteils als:

2.2.3 [14]

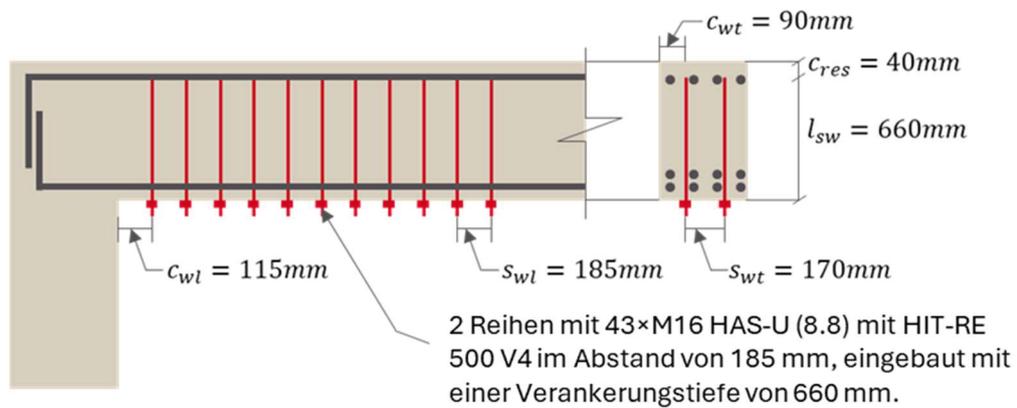
$$a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wl}} = \frac{2 \cdot 157}{185} \cdot 10^3 = 1697,3 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Eq. 2.3 [14]

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit aufgrund der HIT-Schubbewehrung:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta = 0,735 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 1,6973 \cdot 543 \cdot \cot(30) = 457,6 \text{ kN} > 440 \text{ kN}$$

$$\therefore V_{Rd} > V_{Ed}, \text{ Ok!}$$



**Spezifikation: Installation von 2 Reihen mit jeweils 43 × M16 HAS-U 8.8 und HIT-RE 500 V4, im Abstand von 185 mm entlang der Trägerlänge, mit einer Einbindetiefe von 660 mm und einem Abstand von 170 mm zwischen den Reihen.**

### Optimierungsmöglichkeiten

Für eine gleichmäßig verteilte Last, wie im obigen Rechenbeispiel verwendet, verringert sich die einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  im mittleren Bereich eines Tragwerkselements, wodurch der Träger effektiv in drei Querkraftzonen unterteilt wird. Tabelle 8 fasst die Ergebnisse des gleichen Berechnungsverfahrens für das obige Beispiel zusammen, jedoch mit einem stufenförmigen Querkraftverlauf, der in Bild 13 dargestellt ist und eine Reduzierung der insgesamt benötigten Verstärkungselemente von 86 Stück auf 71 Stück ergibt.

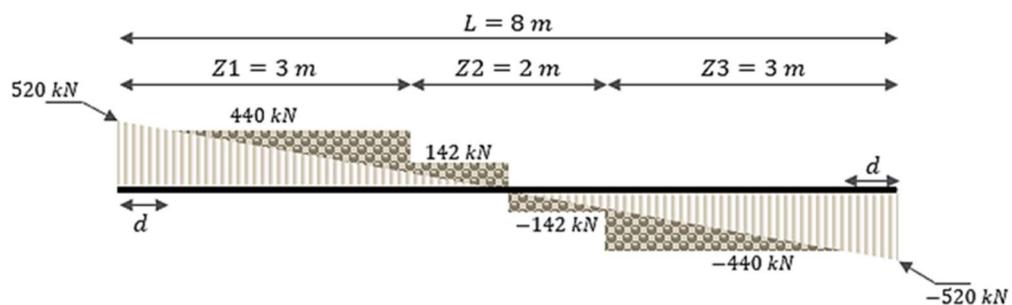


Bild 13: Querkraftverlauf nach der Unterteilung des Balkens in drei Zonen (Zone 2 ist eine gemeinsame Zone mit  $V_{Ed} = \pm 142$  kN)

Zone	$n_{wt}$ [-]	$s_{wl}$ [mm]	$\theta$ [°]	$a_{sw}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$V_{Rd,max}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	Anahl Gewindestangen
Z1	2	185	30	1697	1199,1	457.6	32
Z2	1	$s_{wl,max} = 300$	30	523	1199,1	149,1	7
Z3	2	185	30	1697	1199,1	457.6	32

Tabelle 8: Entwurfszusammenfassung mit drei Zonen (der maximale Abstand in Zone 2 überschreitet nicht die in [12] festgelegten Grenzwerte).

## 9. BEMESSUNG MIT DEM QUERKRAFTVERSTÄRKUNGSMODUL VON PROFIS ENGINEERING

Bei der Planung von Querkraftbewehrungen, beispielsweise Bügeln in Betonbauteilen, ist die manuelle Ermittlung der Anzahl der Verstärkungselemente aufgrund der Vielzahl möglicher Kombinationen von Durchmesser, Abstand und Position oft mühsam und zeitaufwendig.

Die cloudbasierte Software PROFIS Engineering von Hilti bietet ein speziell entwickeltes Modul zur Analyse und Verstärkung von Betonbauteilen mit Querkraftdefiziten. Dieses Modul unterstützt Tragwerksplaner dabei, die Tragfähigkeit bestehender Bauteile zu bewerten und gezielt zu verstärken, um einen sicheren und effizienten Arbeitsablauf zu gewährleisten. Zu den wichtigsten Vorteilen des Querkraftverstärkungsmoduls gehören:

- Auswahl des passenden balkenförmigen oder scheibenförmigen Betonbauteils.
- Definition von Typ, Geometrie und Materialeigenschaften des bestehenden Betonbauteils, um den Verstärkungsbedarf bei erhöhter Querkraftbelastung zu prüfen.
- Unterteilung des Bauteils in Zonen, um Lasten entsprechend einem abgestuften Querkraftdiagramm präzise einzutragen.
- Festlegung von Durchmesser und Abstand der Verstärkungsbewehrung sowie des optimalen Winkels der Druckstrebe.
- Automatische Erstellung des Layouts und Berechnung der benötigten Verstärkungselemente basierend auf den definierten Eingaben.
- Anzeige der Ausnutzungsverhältnisse zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Betons, des Stahlwiderstands der Verstärkung und des maximalen Widerstands der Druckstrebe.
- Generierung eines umfassenden Berichts mit allen Berechnungsschritten und detaillierten Informationen zur Bewehrungsauslegung für eine lückenlose Dokumentation.

Mit diesem Modul erleichtert PROFIS Engineering die Planung und Umsetzung von Querkraftverstärkungen, spart Zeit und gewährleistet zuverlässige Ergebnisse.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Das Umnutzen und die Wiederverwendung älterer Bauwerke bieten gegenüber Neubauten zahlreiche Vorteile, wobei jedes Bauwerk bei einer Verstärkung die Erfüllung spezifischer Zielvorgaben erfordert. Abhängig von der gewählten Entwurfsphilosophie kann der Tragwerksplaner Querkraftdefizite in balkenförmigen oder scheibenförmigen Betonbauteilen auf verschiedene Weise beheben – einige davon sind weniger invasiv als andere.

Der Einsatz nachträglich installierter Querkraftbewehrung, wie Hiltis Lösung mit HAS(-U) Gewindestangen und dem HIT-RE 500 V4 Mörtel (HIT-Shear Elemente), ist ein innovatives Beispiel für eine minimalinvasive Methode, die die Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils erheblich verbessern kann.

**HIT-Shear vereint höchste Tragfähigkeit mit effizienter Installation, um eine optimierte Querkraftverstärkung zu ermöglichen.**

- ✔ **Maximierte Tragfähigkeit** – Durch eine gezielt bemessene Verankerung bis zur Höhe der Druckzone wird sichergestellt, dass das System vollständig in die Kraftübertragung eingebunden ist.
- ✔ **Optimierte Tragfähigkeit** – Durch die variable Anpassung des Druckstrebenwinkels wird die Kraftübertragung effizient gesteuert und das System ideal ins Tragwerk integriert.
- ✔ **Zuverlässige Sicherheit** – Unabhängig von der Schubbrissneigung und den realen Einbautoleranzen bleibt die Verstärkung aktivierbar und wirksam, wodurch plötzliche Tragfähigkeitsverluste vermieden werden.
- ✔ **Berücksichtigung von Winkelabweichungen & Ausmitte** – Unabhängig davon, ob diese bewusst oder unbewusst entstehen, wird die Tragfähigkeit des Systems sichergestellt.
- ✔ **Bemessung nach aktuellen Normen** – Die Berechnung erfolgt nach EN 1992-1-1 sowie gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (aBG), um höchste Planungs- und Anwendungssicherheit zu gewährleisten.
- ✔ **Praxistaugliche Installation** – HIT-Shear kann sowohl von der Zug- als auch von der Druckseite installiert werden, um eine flexible Anwendung zu ermöglichen. Gleichzeitig sorgen semi-automatisierte Bohreinrichtungen für eine effiziente und präzise Umsetzung, ohne Kompromisse bei der Sicherheit einzugehen.
- ✔ **Korrosionsschutz durch Edelstahl** – Für maximale Langlebigkeit und Widerstandsfähigkeit setzen wir, wenn notwendig auf Edelstahlkomponenten, die eine dauerhafte Lösung in anspruchsvollen Umgebungen bieten.
- ✔ **Intelligente Software für maximale Effizienz** – Unsere leistungsstarke Bemessungssoftware unterstützt Tragwerksplaner mit **präzisen Berechnungen, intuitiver Handhabung und direkter Normenkonformität**, um Planungsfehler zu minimieren und die Effizienz zu maximieren.

## 11. LITERATUR

- [1] N. Addy, "Making sustainable refurbishment of existing buildings financially viable," in *Sustainable Retrofitting of Commercial Buildings - Cool Climates*, S. Burton, Ed., Abingdon, Routledge, 2015, pp. 57-73.
- [2] fib Task Group 8.1, "fib Bulletin 103 - Guide to Strengthening of Concrete Structures," Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2022.
- [3] W. Ritter, "Die Bauweise Hennebique," *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 17, pp. 41-43, 49-52 und 59-61, 1899.
- [4] ASCE-ACI Committee 445, "Recent approaches to shear design of structural concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1375-1417, 1998.
- [5] E. Mörsch, *Der Eisenbetonbau – Seine Theorie und Anwendung*, 1 ed., vol. 1, Stuttgart: Verlag Konrad Wittwer, 1922.
- [6] P. Kotes, *Concrete Structures - Part II*, Zilina: University of Zilina, 2008, p. 92.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "Teil 1: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Heft 600)," Beuth, Berlin, 2020.
- [8] EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [9] ACI Committee 440, "ACI PRC-440.2-23: Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Stengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023.
- [10] CEN, "EN 1990:2002+A1:2005 - Basis of structural Design," CEN, Brussels, 2005.
- [11] Hilti, "ETA-20/0541: Injection system Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 05.05.2023.
- [12] DIN EN 1992-1-1/NA: National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Berlin: DIN, 2013.
- [13] EN 1992-2:2018: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules, Brussels: CEN, 2018.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik, "Z-15.5-383 - Hilti Querkraft-Verstärkungssystem mit Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 2024.



Hilti Aktiengesellschaft  
9494 Schaan, Liechtenstein  
P +423-234 2965

[www.facebook.com/hiltigroup](https://www.facebook.com/hiltigroup)  
[www.hilti.group](https://www.hilti.group)