



VERSTÄRKUNG VON BETONBAUTEILEN AUF QUERKRAFTBELASTUNG

Neue Probleme mit bekannten
Lösungen angehen



Version 1.0
Oktober 2024

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung und Hintergrund	2
2. Überblick über das Scherverhalten von Beton	3
3. Bemessung von Betonbauteilen für Querkraft.....	5
3.1 Allgemeine Grundsätze	5
3.2 Bemessung ohne Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 und SIA 262:2013	5
3.3 Bemessung mit Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 und SIA 262:2013	5
4. Ansätze zur Verstärkung von Bauteilen mit Querkraftmängeln	8
4.1 Vergrößern der Breite und/oder der Höhe des Ausschnitts	8
4.2 Vergrößerung der Auflagerlänge	9
4.3 Erhöhung des Biegegewiderstands	9
4.4 Erhöhung der Scherfestigkeit durch Lamine	10
4.5 Erhöhung der Scherfestigkeit durch nachträglichen Bewehrungsanschluss	10
4.6 Spezielle Lösungen und Kombinationen	11
5. Qualifikationsübersicht der nachträglich installierten Querkraftbewehrung.....	12
6. Berechnungs- und Detaillierungsansatz mit Hilti HAS/HAS-U Ankerstangen.....	13
6.1 Überprüfung der Druckstreben	13
6.2 Überprüfung der Druckstreben	15
6.3 Anforderungen an die Detaillierung der Verstärkungsbewehrung	17
7. Bemessungsbeispiel.....	20
8. Übersicht über das Modul Querkraftverstärkung von PROFIS Engineering	22
9. Hilti Lösungen für die Querkraftverstärkung	23
10. Zusammenfassung.....	23
11. Referenzen.....	24

1. EINFÜHRUNG UND HINTERGRUND

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde das Bauwesen immer mehr dazu angehalten, seinen ökologischen Fußabdruck zu verkleinern, und stand unter dem Druck, den vorhandenen Gebäudebestand wiederzuverwenden, um den steigenden sozioökonomischen Anforderungen gerecht zu werden. Dies ist vor allem in städtischen Gebieten der Fall, wo ein großer Teil der Gebäude und Brücken mit Rahmen aus armiertem Beton dem Ende ihrer Lebensdauer entgegengeht und entweder saniert oder abgerissen werden muss. Darüber hinaus kann die Notwendigkeit, Halterungen zu verstärken, auf verschiedene andere Faktoren zurückzuführen sein: eine Änderung der Nutzung oder der Nutzungsklasse, eine Vergrößerung der Grundfläche eines Gebäudes, die Einführung neuer Bauvorschriften, das Vorhandensein von Fehlern oder anderen Mängeln bei der ursprünglichen Ausführung und die Behebung anderer Probleme im Zusammenhang mit der Langlebigkeit, die durch bekannte Gefahren wie Feuer und Erdbeben verursacht werden.

Je nach den Vorgaben des Auftraggebers, dem aktuellen Zustand der Struktur und seiner sozialen, kulturellen und historischen Bedeutung kann der Ingenieur feststellen, dass die Ertüchtigung eines bestehenden Gebäudes oder einer Brücke die bessere Wahl ist als ein Abbruch und ein Neubau. Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass die „Turnaround“-Zeit – also die Zeit zwischen der Einstellung der Aktivitäten in dem Gebäude oder der Brücke und der Wiederinbetriebnahme – im Vergleich zu einem Neubau 15 bis 70 % kürzer ist. Dieser Vorteil kommt zusätzlich zu einer Verringerung der Ressourcenbelastung um 10 bis 75 % durch Einsparungen bei Arbeit und Material hinzu [1].

Nach einer lokalen und globalen Beurteilung der bestehenden Struktur muss der Ingenieur zwischen mehreren Verstärkungsmethoden wählen, um etwaige Mängel in Bezug auf Zug, Druck, Biegung, Scherung, Durchstanzung, Torsion usw. zu beheben und gleichzeitig die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen. Eine Verstärkung auf globaler Ebene ist beispielsweise durch die Verwendung einer Rahmenummantelung (z. B. zusätzliche Ausfachungen), die Installation von Mikropfählen oder die Installation von Basisisolations- oder Energiedissipationsvorrichtungen im Falle einer Erdbebenbelastung möglich. Im Gegensatz dazu umfasst die Verstärkung lokaler, einzelner Bauteile Betonüberzüge, Ummantelungen aus Beton, Stahl oder faserverstärktem Polymer (FRP), extern oder oberflächennah montierte FRP, externe Vorspannungen oder intern angebrachte (nachträglich installierte) Stahlbewehrung [2]. Bei den meisten Verstärkungsprojekten werden in der Regel mehrere Techniken eingesetzt, um den zusätzlichen Lasten wirksam zu widerstehen und sie vom Ort der Einwirkung auf die Fundamente zu übertragen.

In vielen Teilen der Welt wird ein Großteil der bestehenden Gebäude und der zivilen Infrastruktur derzeit verstärkt oder soll verstärkt werden, sodass eine sorgfältige Abwägung der am besten geeigneten Interventionstechniken erforderlich ist. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Scherfestigkeit von Beton, fasst bestehende Methoden oder Maßnahmen zusammen, die typischerweise zur Verstärkung einzelner Betonbauteile eingesetzt werden, und stellt die neueste Verstärkungslösung von Hilti vor, bei der nachträglich eingebaute Gewindestangen als Querkraftbewehrung verwendet werden, die 2024 vom Deutschen Institut für Bautechnik (**DIBt**) eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (**aBG**) erhalten hat.

2. ÜBERBLICK ÜBER DAS SCHERVERHALTEN VON BETON

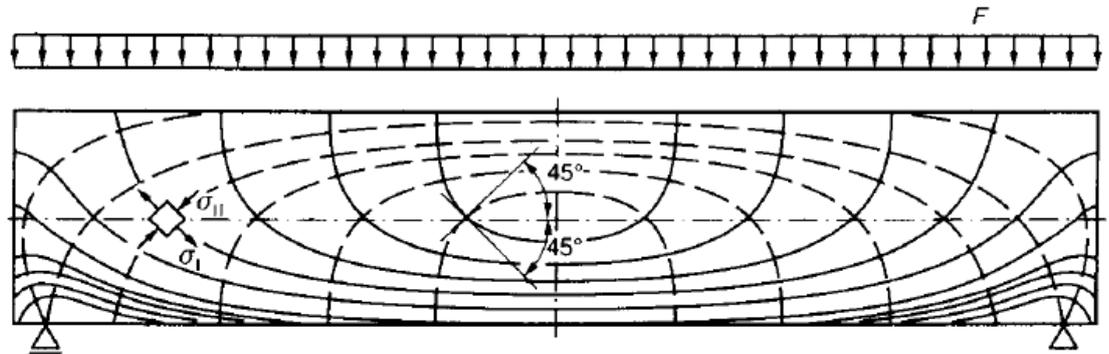


Abbildung 1: Darstellung der Zug- und Druckspannungen in einem Balken unter einer gleichmäßig verteilten Last, dargestellt durch durchgezogene bzw. gestrichelte Linien [3].

Bei einem typischen Balken, der gleichmäßig quer zu seiner Länge belastet wird, bilden die von den Stützen erzeugten Druckspannungen einen Bogen (gestrichelte Linien), während die Zugspannungen eine Kettenlinie oder eine hängende Kette bilden (durchgezogene Linien). Diese beiden Hauptspannungen, gekennzeichnet mit σ_I und σ_{II} , wirken senkrecht zueinander auf ein repräsentatives quadratisches Element in Abbildung 1 und erzeugen eine Scherspannung entlang der Seiten des Elements, wenn es so gedreht wird, dass seine Seiten parallel zu den Längs- und Querrichtungen des Balkens verlaufen. Die daraus resultierende Scherspannung dehnt und staucht die gegenüberliegenden Ecken. Die Scherspannung ist in der Mitte der Balkentiefe am höchsten – dort ist sie um $\pm 45^\circ$ zu beiden Spannungen geneigt – und nimmt in der Nähe der Ober- und Unterseite, wo Druck- und Zugspannungen vorherrschen, auf Null ab.

Da Beton eine hohe Druck-, aber eine geringe Zugfestigkeit hat, reißt er bei einer bestimmten Belastung senkrecht zu den Zugspannungen. Um die Integrität des Trägers zu erhalten, wird eine Bewehrung angebracht, die die Risse auf ein akzeptables Maß begrenzt. Im gerissenen Zustand widersteht der Balken durch eine Kombination aus: (1) dem ungerissenen Beton in der Druckzone, (2) der Verdübelung der vorhandenen Längsbewehrung und (3) der Verzahnung des Zuschlagstoffs in den Spannungsrisse. Das zufällige Zusammenwirken dieser drei Effekte führt jedoch nicht zu einer ausreichend großen Zugfestigkeit, um zu verhindern, dass der Beton bei einer verhältnismäßig kleinen Zugkomponente der Scherspannung Risse bekommt. Dies führt zu diagonalen Rissen in der Nähe der Stützen, wo ein erheblicher Aufwärtsschub durch den Steg des Balkens der nach unten wirkenden Last Widerstand leistet. Ein wirksamer Scherwiderstand erfordert die Zugabe einer speziellen Querkraftbewehrung, die nach der Bildung der ersten diagonalen Risse aktiviert wird, um deren Breite innerhalb akzeptabler Grenzen zu begrenzen (Bügel, Verbindungen oder Anker) [4].

Zusammen mit der Längsbewehrung hat ein Träger, der auch Querkraftbewehrung enthält, also vier Elemente, die in Abbildung 2 dargestellt sind:

1. Einen Druckgurt von Beton infolge von Biegung,
2. einen Zuggurt aus Biegebewehrung, der infolge von Biegung auf Zug beansprucht wird,
3. betonstreben unter Druck zwischen den schrägen Rissen, die durch Querkraft entstanden sind, und
4. vertikale Zuganker, die die Druck- und Zuggurte verbinden.

Dieses bildet ein analoges Fachwerk aus Zug- und Druckstreben, das zusammen mit dem Spannungsfeldmodell von Mörsch [5] und Ritter [3] in den frühen 1900er Jahren auf der Grundlage von Rissmustern entwickelt wurde, die bei der Durchführung von Belastungsversuchen an Stahlbetonbalken beobachtet wurden, und das den Konstrukteuren hilft, die Lastpfade zu visualisieren.

Später, in den 1960er Jahren, lieferte die Plastizitätstheorie eine theoretische Grundlage für die Konstruktion mit „Zug- und Druckstrebenmodellen“. Nach dieser Theorie liefert jeder Gleichgewichtszustand in einem Bauteil – das Fachwerkmodell ist ein solcher Gleichgewichtszustand zwischen den Gebrauchslasten und den Auflagerreaktionen –, der nicht gegen die Plastizitätsbedingungen verstößt, die plastische Verformungen bis zum Nachgeben der Bewehrung erfordern, eine untere Schätzung des tatsächlichen Widerstands. Dies führt zu einer konservativen Schätzung und bildet eine solide Grundlage für die Bemessung von Bauteilen mit Querkraftbewehrung in allen modernen Betonbemessungsvorschriften.

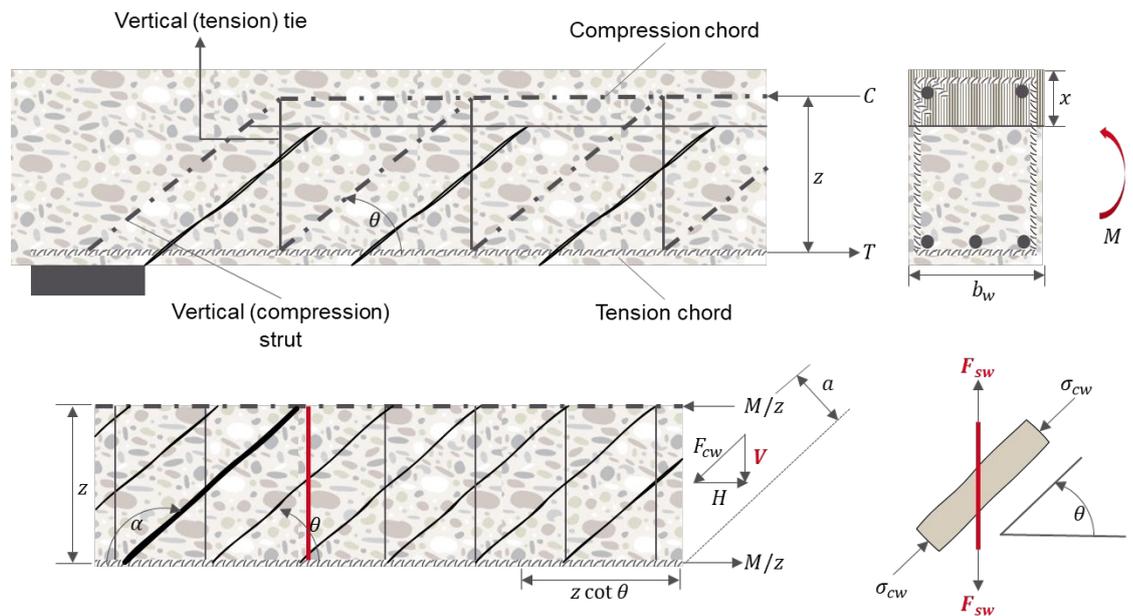


Abbildung 2: Ein Betonbalken mit Querkraftbewehrung, dargestellt durch das Mörsch-Ritter-Fachwerk mit den Druck- und Zugstreben, der geneigten Druckstrebe und der vertikalen Zugstrebe [5] und [6].

Damit das Fachwerkmodell für Querkräfte zuverlässig funktioniert, muss die Querkraftbewehrung den Druckgurt wie eine Zugstrebe umschließen (oder einhaken), um die Übertragung der Kräfte im Knoten zu ermöglichen. In der Praxis kann diese Anforderung über den Verbund, über die Zugfestigkeit des Betons oder, am häufigsten, über direkte Auflager, bei denen die Querkraftbewehrung mit oder ohne Längsbewehrung in der Druckzone gebogen wird, erreicht werden [7].

3. BEMESSUNG VON BETONBAUTEILEN FÜR QUERKRAFT

3.1 Allgemeine Grundsätze

Bei der Bemessung wird zwischen Betonbauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung unterschieden, wobei es sich bei letzteren um leicht belastete Bodenplatten und bestimmte Fundamente handelt, die in der Regel einen größeren Querschnitt aufweisen und keinen konzentrierten Lasten ausgesetzt sind. Für beide Arten von Bauteilen würde ein Konstrukteur zunächst den Bedarf an Querkraftbewehrung auf der Grundlage empirisch abgeleiteter Formeln überprüfen.

3.2 Bemessung ohne Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 und SIA 262:2013

Die Bemessung der Scherfestigkeit von Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung beruht auf empirischen Gleichungen, die sich aus jahrzehntelangen umfangreichen Versuchen von Fachleuten auf der ganzen Welt ergeben haben, die wiederum aus nationalen Traditionen und lokalen Versuchen abgeleitet wurden. Obwohl dies dazu führt, dass es kein einheitliches und etabliertes physikalisches Modell für alle einschlägigen Normen gibt, sind die Ergebnisse unter den meisten Bedingungen vergleichbar. So empfiehlt EN 1992-1-1:2004 in ihrem gemeinsamen Text den folgenden Ausdruck für die Widerstandsfähigkeit von Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung, wobei in den verschiedenen nationalen Anhängen spezifische Parameter, wie z. B. $C_{Rd,c}$ und k , berücksichtigt werden:

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

In der SIA 262:2013 weist der Widerstand von Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung geringfügige Unterschiede auf:

- Scherfestigkeit ohne Querkraftbewehrung: $V_{Rd} = k_d \tau_{cd} d_v b_w$ (2)

3.3 Bemessung mit Querkraftbewehrung nach EN 1992-1-1 und SIA 262:2013

Ein wesentliches Merkmal moderner Bemessungsnormen geht davon aus, dass, wenn der Beton selbst nicht allen einwirkenden Scherspannungen widerstehen kann, eine vorgesehene Querkraftbewehrung wie die in Abbildung 2 allen Spannungen allein widerstehen muss. Ähnlich wie bei den diagonalen Druckelementen in einem offenen Fachwerk wird daher der Neigungswinkel, θ , variiert und spielt eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des maximalen Widerstands der Beton-Druckstrebe, bevor sie zerdrückt wird, $V_{Rd,max}$ und der Widerstand der Querkraftbewehrung, bevor sie nachgibt, $V_{Rd,s}$, wobei der kleinere der beiden Werte für den Gesamt-Querkraftwiderstand, V_{Rd} maßgeblich ist. Wenn die Bemessung eine Querkraftbewehrung erfordert, bestimmen drei Kriterien den Umfang der erforderlichen Querkraftbewehrung:

1. Ein Mindestbetrag, um ein Nachgeben der Querkraftbewehrung beim Auftreten der ersten Scherrisse zu vermeiden, $A_{sw,min}$ ist tatsächliche Querkraftbewehrung, die zur Aufnahme der Bemessungslast erforderlich ist, A_{sw} .
2. Das Verhältnis zwischen Querkraftbewehrung und Betonquerschnitt, ρ_w , das ein Nachgeben der Querkraftbewehrung bewirkt und ein sprödes Versagen des Betons unter Druck ausschließt.

Bemessungsnormen wie EN 1992-1-1:2004 und SIA 262:2013 bestimmen die Höhe der Querkraftbewehrung mit dem in Abbildung 3 gezeigten „Fachwerk“- oder „Spannungsfeldmodell“ unter Verwendung einer konsistenten Bemessungsformel mit nur geringer Abweichung von den Grenzwerten für den Strebenwinkel, θ . Daher:

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

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

- Kräfte in allen Bügeln innerhalb Δx : $V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \frac{z \cdot \cot \theta}{s}$ (5)

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

- EN 1992-1-1:2004 beträgt die Bügelneigung: $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

- Die entsprechende minimale Querkraftbewehrung: $\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$ (7)

- Für die SIA 262:2013 beträgt die Bügelneigung: $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

- Die entsprechende minimale Querkraftbewehrung: $\rho_{w,min} = 0,001 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{30} \cdot \frac{500}{f_{sk}}}$ (8)

Die maximale Scherfestigkeit wird durch das Versagen der Druckstrebe begrenzt:

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

Aus demselben Modell wird der maximale *effektive* Betrag der Querkraftbewehrung mit folgendem Ausdruck berechnet (unter der Annahme $\cot \theta = 1$):

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

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

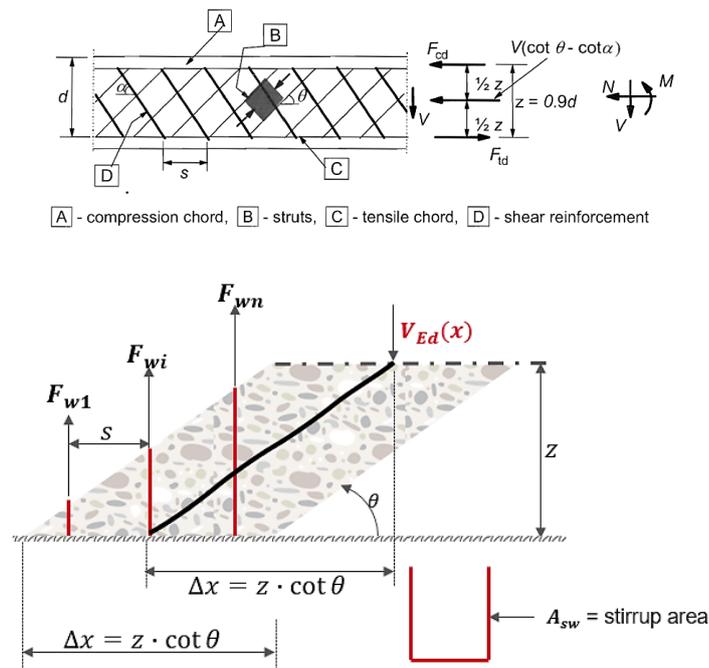
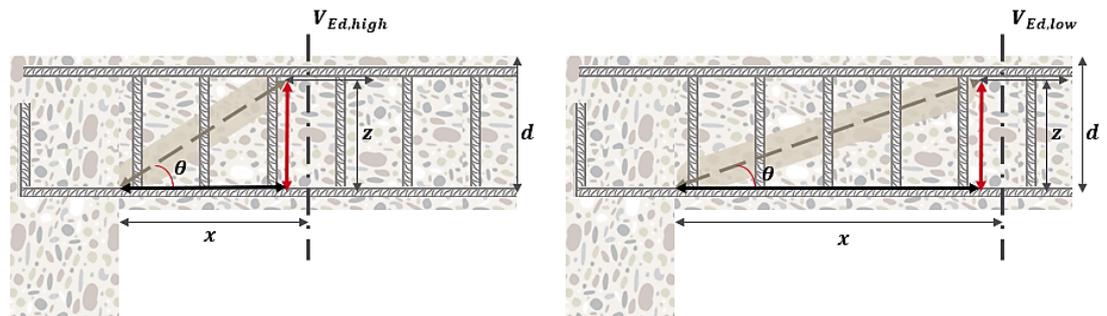


Abbildung 3: Bemessungsmodell für den Querkraftwiderstand mit Querkraftbewehrung: (oben) Fachwerk-Modell aus EN 1992-1-1:2004 [8]; (unten) Skizze mit vertikalen Bügeln

Der Neigungswinkel, θ , nimmt proportional zur Größe der auf ein Betonbauteil wirkenden Querkraft zu, und die Bemessung für Scherkräfte nach modernen Bemessungsnormen ermöglicht es dem Bauingenieur, innerhalb eines bestimmten Bereichs eine größere Strebenneigung zu wählen, die den Widerstand der Strebe erhöht, um höhere Scherkräfte zu bewältigen, V_{Ed} . Dies reduziert den Beitrag der Querkraftbewehrung und erfordert daher mehr Bewehrung, um den Bedarf zu decken, wie in Abbildung 4 dargestellt.



- $\theta_{max} = 45^\circ \rightarrow V_{Ed,high}$ carried by 3 stirrups
 - Largest possible $V_{Rd,max}$
 - Smallest possible $V_{Rd,s}$ & ΔF_{td}
- $\theta_{min} = 21,8^\circ \rightarrow V_{Ed,low}$ carried by 5 stirrups
 - Smallest possible $V_{Rd,max}$
 - Largest possible $V_{Rd,s}$ & ΔF_{td}

Abbildung 4: Schematische Darstellung des Einflusses der Strebenneigung auf den Widerstand der Druckstrebe und der Querkraftbewehrung: (links) maximale; und (rechts) minimal zulässige Neigung

Umgekehrt, wird das Design der Querkraftbewehrung durch eine Verringerung der Strebenneigung, θ für eine bestimmte Querkraft V_{Ed} optimiert V_{Ed} , führt dies zu:

- a) Einer höheren Kraft in der geneigten Strebe, die bei einer geringeren Querkraft V_{Ed} zum Druckversagen der Betondruckstrebe führt, V_{Ed} . Die Querkraft, unter der der Beton versagt, $V_{Rd,max}$ ist die maximale Scherfestigkeit eines Querschnitts und bietet einen höheren Widerstand durch zusätzliche Bewehrung, $V_{Rd,s}$, was unnötig wird. Bei höheren Beträgen verschiebt sich die Versagensart in Richtung Druckversagen der Betonstreben.
- b) Eine breitere Verteilung der vertikalen Zugglieder bedeutet, dass mehr Bügel der Scherlast, V_{Ed} standhalten können, was zu einer geringeren Menge an erforderlicher Querkraftbewehrung führt.
- c) Eine höhere Zugkraft erzwingt die Längsbewehrung, ΔF_{td} , die eine Verankerung an den Stützen erfordert.

4. ANSÄTZE ZUR VERSTÄRKUNG VON BAUTEILEN MIT QUERKRAFTMÄNGELN

Aus den beiden vorgenannten Bemessungsnormen geht hervor, dass der Widerstand eines Betonbauteils gegen Scherung von diesen Parametern abhängt:

- a) Festigkeit des Betons, f_{ck}
- b) Querschnittsbreite, b_w , und -höhe, h
- c) Effektive Tiefe der Biegebewehrung ab der Oberseite der Druckfaser, d
- d) Länge der Stützstruktur, a_v
- e) Menge der Längsbewehrung, A_{sl}
- f) Menge der Querkraftbewehrung (auch Scherbewehrung genannt), A_{sw}

Bestehende Methoden oder Maßnahmen, die typischerweise zur Verstärkung einzelner Betonbauteile eingesetzt werden, verbessern die Scherfestigkeit des Bauteils, sind jedoch mit Kompromissen hinsichtlich Invasivität, Kosten, Verfügbarkeit und anderen Parametern verbunden. Obwohl die Verbesserung eines oder mehrerer dieser Parameter die Scherfestigkeit erhöht, kann bei einer bestehenden Halterung die Betonfestigkeit (a) nicht nachträglich geändert werden, und das Hinzufügen weiterer Auflager verringert die Schlankheit des Bauteils, z. B. das Hinzufügen von Stützen zu Trägern oder von Trägern zu Platten. Diese zusätzlichen Auflager müssen jedoch Lasten auf die Fundamente übertragen. Je nach den funktionalen Anforderungen ist es möglich, einen oder mehrere Parameter (b) bis (f) durch verschiedene Eingriffe zu verbessern, wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird. In der Regel wird nur ein Teil der Verstärkungsmaßnahmen mit eigenen Produkten durchgeführt, häufiger werden die Lösungen auf das jeweilige Projekt zugeschnitten.

4.1 Vergrößern der Breite und/oder der Höhe des Ausschnitts

Die Breite und die effektive Tiefe eines Betonquerschnitts können entweder durch eine Betonschicht für flächige Bauteile wie Bodenplatten, Fundamente und Wände oder durch einen Stahlbetonmantel für lineare Bauteile wie Balken und Stützen erhöht werden. Wie in den Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt, verbessern beide Ansätze gleichzeitig die Biegefestigkeit und die Steifigkeit, wodurch auch die Durchbiegung verringert wird, und sind nützlich, wenn die Scherfestigkeit nicht der einzige zu behobende Mangel ist. In Fällen, in denen Bauteile ausschließlich gegen Querkräfte verstärkt werden müssen, können beide Ansätze erhebliche Nachteile aufweisen:

1. Die Betonummantelung bringt ein erhebliches zusätzliches Gewicht mit sich, das sich auf andere Bauteile im Lastpfad auswirkt, darunter auch auf das Fundament.
2. Außerdem ist die Zunahme der effektiven Tiefe sogar geringer als die Dicke der Deckschicht, wobei die resultierende effektive Tiefe im Schwerpunkt der gesamten Zugbewehrung im vorhandenen Beton und in der Deckschicht liegt, d. h. unterhalb der Zugbewehrung der Deckschicht.
3. Die Bewehrung ist in der Nähe der Stützen konzentriert, wo die Scherkräfte am größten sind.

Beispiele für proprietäre Lösungen in der Industrie:

Hilti HCC-Serie: HCC-K, HCC-B, HCC-HUS4 und HCC-U

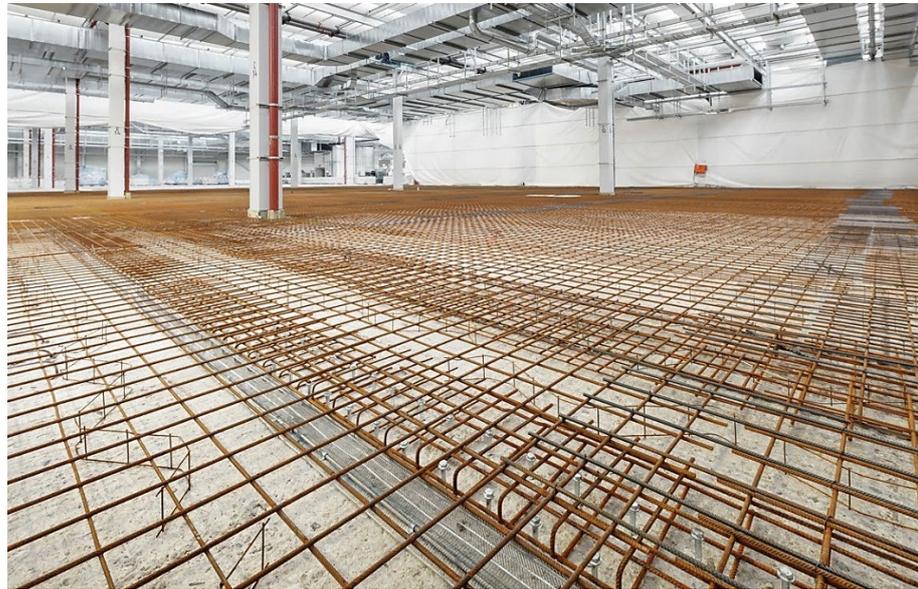


Abbildung 5: Beispiel für nachträglicher Bewehrungsanschluss in Aufbeton

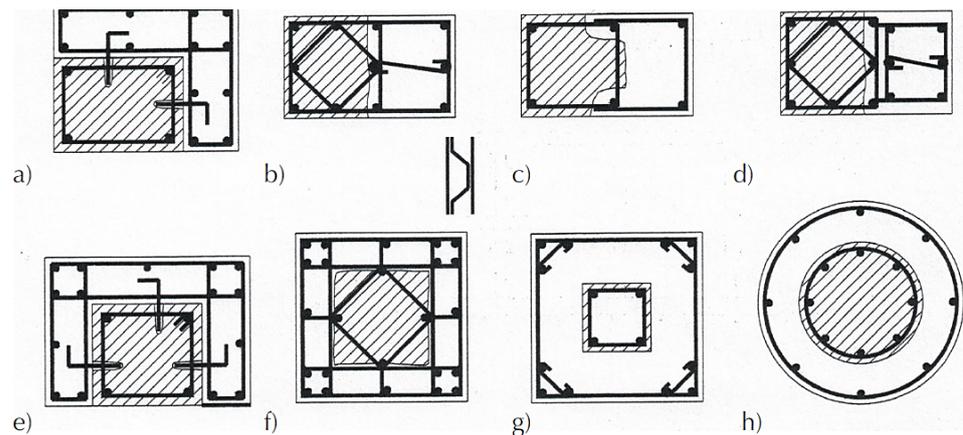


Abbildung 6: Beispiele für Betonummantelungen, reproduziert aus [2]

4.2 Vergrößerung der Auflagerlänge

Durch die Vergrößerung des Auflagers oder des Trägers wird die Scherbelastung auf eine größere Fläche verteilt, wodurch die durchschnittliche Scherspannung verringert wird, da die Stirnseite des Trägers näher an die Mitte der Spannweite des Trägers oder der Platte verlegt wird. Hierfür gibt es mehrere Lösungen:

Beispiele für Lösungen in der Industrie: nachträglich installierte Stahlstützen oder -streben; Verlängerung der Betonstützen (z. B. Kragsteine).

4.3 Erhöhung des Biegewiderstands

Eine Erhöhung der Biegebewehrung verbessert die Gesamtduktilität und die Querschnittssteifigkeit und verringert die Rissbreiten durch eine bessere Verzahnung der Gesteinskörner über den Rissen, was wiederum die Scherfestigkeit erhöht. Eine Verbesserung der Biegebewehrung ist durch das Aufbringen von geklebten Laminaten oder die Montage einer oberflächennahen Bewehrung an den Auflagern und in der Mitte der Abschnitte, wo die Biegebeanspruchung am höchsten ist, möglich, wobei die Bewehrung aus faserverstärkten Polymeren oder Stahlplatten besteht.

Die Erhöhung des Biegewiderstandes wirkt sich „unterproportional“ auf den Scherwiderstand aus; so führt z. B. eine Verdoppelung der Biegebewehrung nach Gl. 6.2a der EN 1992-1-1 zu einer Erhöhung des Scherwiderstandes, $V_{Rd,c}$, um nicht mehr als 25 %.

Beispiele für Lösungen in der Industrie: CFK-Lamine, Memory-Stahl-Lamine, Memory-Stahl-Stangen, oberflächennahe Bewehrung.

4.4 Erhöhung der Scherfestigkeit durch Lamine

Wie in Abbildung 7 dargestellt, ist es auch möglich, scherschwache Bauteile, wie z. B. Balken, zu verstärken, indem Lamine an den Seiten senkrecht zur Balkenlänge oder mit einer Neigung aufgeklebt werden. Diese Methode gilt in der Regel als sehr effektiv, aber die Endverankerung der Lamine kann bei hohen Belastungen eine Herausforderung darstellen.

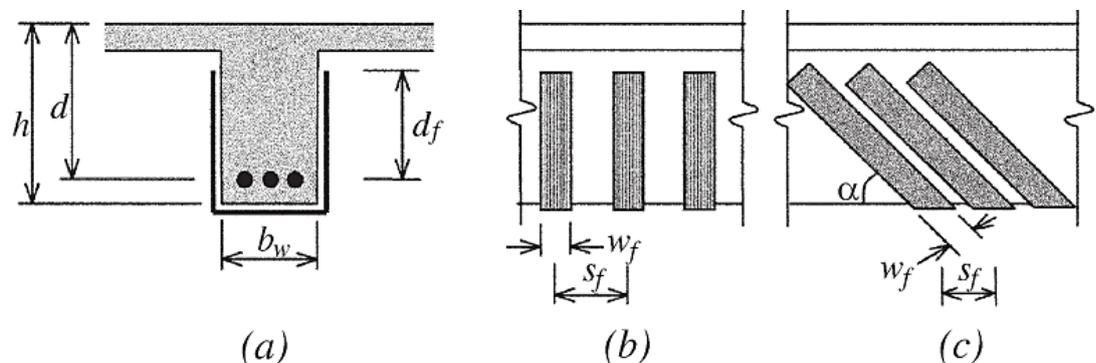


Abbildung 7: Verwendung von FRP-Laminaten senkrecht oder schräg zur Balkenlänge, wie in Abbildung 11.4 dargestellt [9]

4.5 Erhöhung der Scherfestigkeit durch nachträglichen Bewehrungsanschluss

Eine einfachere Lösung ist das Bohren von Löchern durch das Betonteil auf beiden Seiten und das Befestigen von Gewindestangen mit einer Mutter und Unterlegscheiben, was auch als „Durchankern“ bezeichnet wird. Die Verfüllung des Ringspalts zwischen Gewindestange und Bohrloch mit einem geeigneten Mörtel ist für die Verankerung der Bewehrung bei Rissen im Beton unerlässlich. Dies trägt dazu bei, die Breite der Risse innerhalb der Grenzen der Gebrauchstauglichkeit zu halten und verhindert die Korrosion der Bewehrung, was für die Gewährleistung der vorgesehenen Lebensdauer der Konstruktion entscheidend ist. Wie bei dem nachträglichen Bewehrungsanschluss besteht auch beim Bohren durch das Betonbauteil die Gefahr, dass die Längsbewehrung durchtrennt oder beschädigt wird, die in der Nähe der Stützen (in der Regel starre Stützen), wo die Biegebeanspruchung hoch ist, besonders dicht ist. Dieses Risiko kann durch den Einsatz von Ferro-Scannern verringert werden, mit deren Hilfe die Biegebewehrung auf beiden Seiten des Bauteils vor dem Bohren erkannt werden kann.

In den meisten Fällen ist jedoch ein Bohren durch die Platte nicht möglich oder nicht erwünscht, so dass die Installation der eingebundenen Verankerung von einer Seite erfolgt. Dieser Ansatz ist weniger invasiv als das Bohren durch die gesamte Länge des Betonquerschnitts, beinhaltet jedoch eine Bedingung: Die Detailregeln in allen modernen Normen, wie z. B. Abschnitt 9.2.2 der EN 1992-1-1, verlangen, dass die Standard-Querkraftbewehrung, wie z. B. Bügel, die Längsbewehrung umschließen und „einschließen“ oder zumindest an oder hinter den Längsbewehrungslagen verankert werden. Das bedeutet, dass das einzig mögliche Versagen das Nachgeben des Stahls ist. Eine solche Verankerung ist hier jedoch möglicherweise nicht möglich und erfordert daher eine Überprüfung der Verankerung und der Installation, im Allgemeinen auf der Grundlage spezifischer Tests, soweit dies möglich ist.

Derzeit verfügbare Lösungen von Hilti: Abbildung 8 zeigt drei verschiedene Möglichkeiten der Verwendung von **HZA-P- und HAS(-U)-Gewindestangen**, die teilweise eingebunden (HZA-P und HAS(-U)) und durchgeankert (nur HAS(-U)) sind.

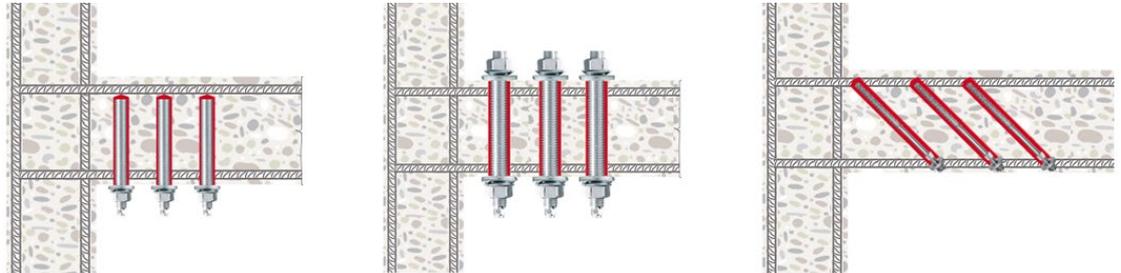


Abbildung 8: Erhöhung der Querkraftbewehrung durch: (a) teilweise eingebundene HAS(-U)-Stangen, die senkrecht zur Balkenlänge eingebaut werden; (b) durchgeankerte HAS(-U), die senkrecht zur Balkenlänge eingebaut werden; und (c) teilweise eingebundene HZA-P, die schräg zur Balkenlänge verlaufen

Beispiele für Lösungen in der Industrie: CFK-Laminat in L-Form, Durchsteckbolzen, Betonschrauben von einer Seite, Klebe-/Hinterschnittanker von einer Seite.

4.6 Spezielle Lösungen und Kombinationen

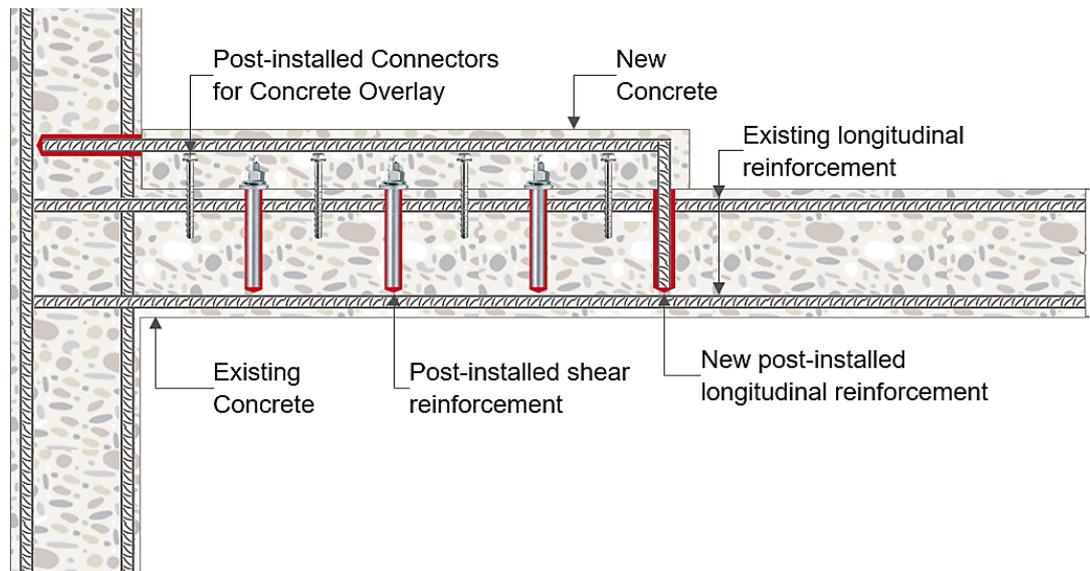


Abbildung 9: Beispiel für eine Sonderlösung, bei der eine nachträglich installierte Querkraftbewehrung mit einer Betonüberdeckung kombiniert wird (die Überdeckung kann sich auch über die gesamte Länge des Bestands erstrecken)

Bei außergewöhnlich hohen Lasten können Sonderlösungen oder Kombinationen der vorgenannten Lösungen angewandt werden. Ein Beispiel für eine Sonderlösung ist ein Kohlefaserlaminat, das durch zwei schräge Löcher verlegt und vorgespannt wird, im Gegensatz zu einer normalen Verlegung ohne speziell angefertigte Löcher.

Abbildung 9 zeigt ein weiteres Beispiel, das die Scherfestigkeit erheblich verbessern kann, indem eine nachträglich installierte Querkraftbewehrung mit einer Betonschicht kombiniert wird. Andere Kombinationen, bei denen die Dicke des Betonelements nicht erhöht werden kann, können Faserlaminat mit nachträglich installierter Querkraftbewehrung kombinieren, um die jeweiligen Biege- und Scheranforderungen zu erfüllen.

5. QUALIFIKATIONSÜBERSICHT DER NACHTRÄGLICH INSTALLIERTEN QUERKRAFTBEWEHRUNG

Während eingegossene Systeme zur Querkraftbewehrung in der Bauindustrie weit verbreitet sind, ist die Verwendung von *nachträglich installierten* Stahlelementen zur Verstärkung von Betonelementen mit Querkraftdefiziten derzeit weder durch ein bestehendes Europäisches Bewertungsdokument (EAD) abgedeckt noch durch eine europäische Norm (hEN) harmonisiert. Solche Systeme erfordern daher eine angemessene Qualifizierung, um die Leistung für die Bemessung und Verwendung im Hinblick auf die Scherfestigkeit zu bewerten. Für solche Szenarien bietet Anhang D von EN 1990:2002 [10] eine Anleitung nach dem Stand der Technik, um durch eine Kombination aus Prüfung und Modellierung eine Bemessungsgleichung zu kalibrieren, die mit den angestrebten Zuverlässigkeitsniveaus von EN 1990 übereinstimmt.

Gemäß der Europäischen Technischen Bewertung (ETA)-20/0541 [11] ist die Kombination von HIT-RE 500 V4 Epoxidmörtel und HAS(-U)-Stangen aus Kohlenstoff- und Edelstahl mit dem Hilti Verfüllset für die Verwendung als Befestigungselement in Beton bewertet und qualifiziert. Seine Verwendung als Verstärkungssystem, das senkrecht zur Längsachse von Betonbauteilen installiert wird, um deren Scherfestigkeit zu erhöhen, wurde jedoch bisher nicht untersucht. Daher wurde vor kurzem ein umfassender Prüfplan durchgeführt, um das Verhalten dieser innovativen Lösung zur Querkraftverstärkung zu bewerten und den Einfluss der wichtigsten maßgeblichen Parameter zu ermitteln, wie z. B.: (1) der Durchmesser, der Abstand und die Installationslänge der Ankerstangen, (2) die Tiefe des Betonbauteils und (3) die Betonfestigkeit.

Weitere Tests untersuchten die Robustheit des Systems unter praktischen Szenarien, die ungünstige Installationsbedingungen beinhalten, wie z. B. die Quer-Ausmittigkeit und die zufällige Neigung bei der Montage der Stangen sowie das Vorhandensein von Scherrissen unter Betriebslasten. Diese umfangreiche Versuchskampagne ermöglichte die Kalibrierung eines Querkraftwiderstand-Modells, das mit dem in Anhang D der EN 1990 beschriebenen Verfahren zur Bewertung der Zuverlässigkeit übereinstimmt und zu einer Bemessungsgleichung führt, die mit der EN 1992-1-1 übereinstimmt und im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Die gesamte Versuchsreihe an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) wurde vom DIBt begutachtet und auf ihre Tauglichkeit geprüft. Das DIBt erteilte dem System eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (*aBG Z-15.5-383*) und erfüllte damit die nationale Anforderung für Bauwerke nach der *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)*. Die MVV TB dient als Vorbild für die Verwaltungsvorschriften – Technische Baubestimmungen, die in Deutschland auf Bundesebene umgesetzt werden.

6. BERECHNUNGS- UND DETAILIERUNGSANSATZ MIT HILTI HAS/HAS-U ANKERSTANGEN

Neben der Verstärkung mit der HZA-Verbundankerlösung gibt es eine neue Hilti Verstärkungslösung für den Querkraftbereich mit dem Mörtel HIT-RE 500 V4 und Ankerstangen HAS oder HAS-U mit dem Hilti Verfüllset, Muttern und Unterlegscheiben. Die Montage dieser Lösung ist vergleichbar mit der Montage eines Verbundankers, d. h. Bohren an einer festen Verankerung senkrecht zur Betonoberfläche, Reinigen der Bohrlöcher von Bohrmehl, Injizieren des Mörtels und Einsetzen der Stangen. Sobald der Mörtel ausgehärtet ist, werden die Muttern mit einem festen Drehmoment angezogen. Die Lösung verfügt über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (*aBG*) **Z-15.5-383** des DIBt und nutzt die Bestimmungen für die **prüfungsunterstützte Bemessung** aus **Anhang D der EN 1990**. Dieser Abschnitt enthält einen Überblick über die Beurteilung, die Bemessung und die Installation von nachträglich installierten Ankerstangen als Bewehrung in Betonbauteilen mit Querkraftdefizit.

Das gewählte Widerstandsmodell steht in vollem Einklang mit den Bemessungsvorschriften in DIN EN 1992-1-1/NA [12] und DIN EN 1992-2/NA [13]. Die geforderten Nachweise entsprechen den Gleichungen (6.8) und (6.9) der DIN EN 1992-1-1/NA für den Widerstand der Stahlbewehrung bzw. den maximalen Druckstrebenwiderstand, wobei Abschnitt 4 dieses Dokuments den Hintergrund dieser Gleichungen behandelt. Dieses Widerstandsmodell verwendet auch die Methode der variablen Druckstrebenneigung, die eine Anpassung des Neigungswinkels der Druckstrebe ermöglicht, um die Kräfte zwischen der Druckstrebe und den Verstärkungselementen auszugleichen, was zu Einsparungen bei der Konstruktion durch weniger erforderliche Ankerstangen führen kann.

Die direkte Anwendung beider Gleichungen ist jedoch ohne die Modifikationen, die sich aus den Ergebnissen des Qualifizierungsverfahrens ergeben, nicht möglich und insgesamt muss der Nachweis dem folgenden Nachweis der Druckstreben und der Verstärkungsstangen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für eine gegebene Bemessungsquerkraft, genügen, V_{Ed} :

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

6.1 Überprüfung der Druckstreben

Wenn die nachträglich installierten Querkraftbewehrungsstangen senkrecht zur Längsachse des Betonträgers eingebaut werden, beträgt der Montagewinkel $\alpha = 90^\circ$ und der Widerstand der Druckstrebe nach Gleichung (6.9) von DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, *NCI zu 6.2.3(1)*:

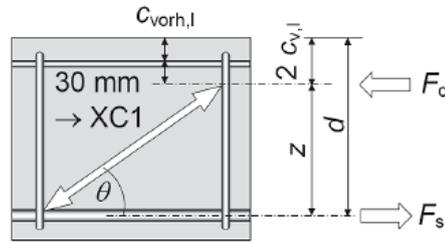
$$V_{Rd,max} = \frac{b_{w,eff} \cdot \alpha_{cw} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (13)$$

Dabei ersetzt die wirksame Breite des verstärkten Querschnitts, $b_{w,eff}$, die Gesamtquerschnittsbreite, b_w , mit einem Quer-Ausmittigkeitsparameter, e_{inst} , der je nach Positionierung der Verstärkung bei der Montage entweder auf maximal **50 mm** oder $b_w/6$ in Bezug auf den Massenschwerpunkt des Trägers zunimmt. Beachten Sie jedoch, dass diese Ausmittigkeit **nur für eine einzelne Bewehrungsreihe gilt**, da ein einzelner ausmittiger Zuganker im Fachwerkmodell eine Torsion in das Bauteil einleitet, die proportional zur aufgetragenen Querkraft ist. Daher:

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

Die anderen Parameter in der Gleichung unterscheiden sich nicht von denen in DIN EN 1992-1-1/NA:

- Hebelarm $z = 0,9d$, mit einer Obergrenze von $z = \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$. Dabei ist die effektive Querschnittstiefe zur Biegebewehrung d , und $c_{v,l}$ die Betondeckung der Längsbewehrung in der Druckzone, dargestellt in Abbildung 10:


 Abbildung 10: Definition des inneren Hebelarms, z , aus Abbildung H6-11 [7]

Hinweis: Wenn $V_{Ed} \leq V_{Rd,cc}$, wird der Ausdruck $\frac{1,2+1,4\sigma_{cp}/f_{cd}}{1-V_{Rd,cc}/V_{Ed}}$, der die

Obergrenze von $\cot \theta$ darstellt, negativ und geht über die vorgeschriebenen Ober- und Untergrenzen hinaus; in solchen Szenarien wird $\cot \theta = 3,0$.

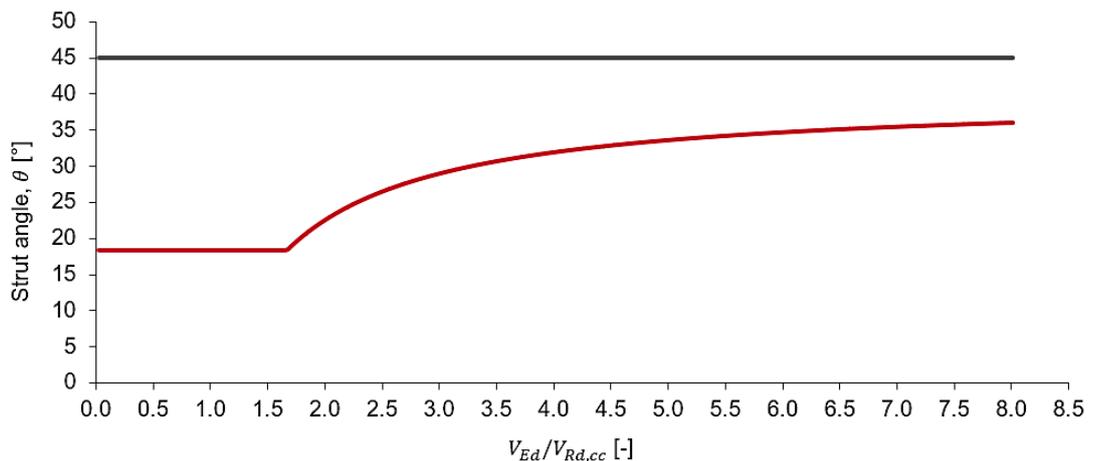
- Der dimensionslose Faktor, $\alpha_{cw} = 1$, berücksichtigt den Spannungszustand im Druckgurt
- Der Festigkeitsminderungsfaktor für Beton mit Scherrissen, $\nu_1 = 0,75$
- Die Bemessungsdruckfestigkeit von Beton, $f_{cd} = \alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c$, wobei $\alpha_{cc} = 0,85$ und $\gamma_c = 1,5$
- Der Druckstrebenwinkel, θ , wird durch Gl. (6.7aDE), 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 Gl. (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 $V_{Ed} > V_{Rd,cc}$, setzt sich dieser Ausdruck solange fort $\cot \theta > 3,0$, bis eine ausreichend große Querkraft $V_{Ed} \gg V_{Rd,cc}$ abnimmt $\cot \theta < 3,0$. Diese neu *berechnete* Obergrenze entspricht der maximalen Neigung der Druckstrebe für Ankerstangen mit minimaler Querkraftbewehrung und einem entsprechend reduzierten Widerstand in der Druckstrebe. Abbildung 11 unten zeigt ein Szenario, bei dem eine zunehmende Querkraft wiederum den nach Gl. (6.7aDE), DIN EN 1992-1-1/NA, berechneten Druckstrebenwinkel vergrößert.


 Abbildung 11: Repräsentative Beziehung zwischen dem Verhältnis $V_{Ed}/V_{Rd,cc}$ mit dem berechneten Druckstrebenwinkel (die horizontale Linie bei 45° stellt den maximalen Druckstrebenwinkel dar)

Hinweis: Diese Überprüfung sollte bei der Verstärkung bestehender Strukturen nicht außer Acht gelassen werden.

Obwohl für den Nachweis des Stahl- oder Druckstrebenwiderstandes nicht ausdrücklich erforderlich, ist die Bemessungsquerkraft, V_{Ed} , zu berücksichtigen, die eine zusätzliche Zugkraft, ΔF_{td} , in der Längsbewehrung erzeugt, die mit abnehmender Druckstrebenneigung zunimmt, gemäß EN 1992-1-1, 6.2.3(7). Diese Kraft kommt zu den Zugkräften hinzu, die durch die Biegung auf die Längsbewehrung einwirken, so dass ein separater Nachweis für ein mögliches Nachgeben und Versagen der Verankerung dieser Bewehrung erforderlich ist. Bei einem Neubau ist dieser Nachweis für zusätzliche Spannungen

möglicherweise nicht erforderlich, wenn die maximale Biegung entlang des Betonbauteils, $M_{Ed,max}$ eicht wird, die bei der Bemessung der Bewehrung und ihrer Verankerung verwendet wurde.

6.2 Überprüfung der Druckstreben

Werden die nachträglich eingebauten Bewehrungsstangen orthogonal zur Längsachse des Betonträgers eingebaut, ist der Montagewinkel $\alpha = 90^\circ$ und die Widerstandsfähigkeit der Stahlstangen nach DIN EN 1992-1-1/NA beträgt:

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

Während die Parameter für den Hebelarm, z , und der Strebenwinkel, θ , nicht von der Überprüfung der Druckstrebe abweichen, ergibt sich der Wert für f_{ywd} aus der Bewertung und beträgt 390 MPa sowohl für Stangen aus rostfreiem Stahl A4 als auch aus Kohlenstoffstahl 8.8. Der beanspruchte Bereich der nachträglich eingebauten Verstärkungsstangen, a_{sw} , pro Längeneinheit des Betonbauteils kombiniert die Anzahl der Ankerstangenreihen in Querrichtung, n_{swt} , den Abstand in Längsrichtung, s_{wt} , und die beanspruchte Querschnittsfläche jeder Stange, A_{sw} , unten angegeben in:

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

Material	Größe der Ankerstange	Bemessungswert der Streckgrenze f_{ywd} [MPa]	Beanspruchte Querschnittsfläche einer Ankerstange A_{sw} [mm ²]
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 materielle Parameter zur Verwendung in Gl. (18) und (19)

Mit diesem Ausdruck werden zwei neue Parameter eingeführt, die sich aus der Bewertung ableiten:

- Ein größenabhängiger Koeffizient, k_s , in Abhängigkeit vom Hebelarm, z (in Metern), für die Dicke der Bauteile, h , zwischen 200–2.200 mm, wobei ein größerer Hebelarm diesen Koeffizienten reduziert um:

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

- Der Koeffizient für die Verstärkung nach der Installation, k_{pi} , der einen festen Wert trägt, der besteht aus:
 - Einem statistisch abgeleiteten **Zuverlässigkeitsfaktor**, der die Verstärkungsstangen mit der einbetonierten Bewehrung vergleicht,
 - Einem Dauerhaftigkeitsfaktor, der die langfristigen Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit des Mörtels berücksichtigt,
 - Einem Faktor für Installationsempfindlichkeit und Toleranzen,
 - Einem Faktor, der das Vorhandensein von Biege- und Scherrissen in der Verankerungszone der Stangen in Bezug auf die Montagerichtung berücksichtigt. Wie unten dargestellt, ist dieser Koeffizient für alle Ankerstangengrößen gleich.

Hilti Querkraftverstärkungs-Ankerstangen	Größe der Ankerstange	Einseitige Installation (Konfiguration A)	Einseitige Installation (Konfiguration B)
	M12	0,735	0,588
	M16		

Koeffizient für die nachträgliche Scherverstärkung, k_{pi}	M20		
	M24		

 Tabelle 2: Leistungsparameter k_{pi} bei der Überprüfung der Bewehrungsstangen verwendet

Obwohl das Verstärkungssystem sowohl auf der Zug- als auch auf der Druckseite eines Betonbauteils eingebaut werden kann, wirken sich zwei Aspekte auf die Leistungsfähigkeit des Systems aus: (1) das Vorhandensein von Biegerissen oder axialen Spannungen um die Spitzen der Verstärkungsstangen und (2) die Möglichkeit, dass Scherrisse unter den Enden der Verstärkungsstangen verlaufen. Der erste Aspekt verringert die Wirksamkeit des Systems, wenn die Stangen bei Vorhandensein von Biegerissen in beiden Richtungen installiert werden, und die Möglichkeit einer verringerten Wirksamkeit für den zweiten Aspekt ergibt sich nur bei der Montage von der Druckseite her.

Die in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellte **Konfiguration A** stellt Bedingungen dar, bei denen die Ankerstangen von der Zugseite eines Betonelements aus installiert werden und eindeutig durch die Scherrisse hindurchgehen, aber nicht von Biegerissen betroffen sind, die bei einfach gestützten Bedingungen üblich sind. Umgekehrt tritt das Szenario der **Konfiguration B** auf, wenn die Stangen von der Druckseite eines einfach gestützten Betonelements aus installiert werden oder wenn sie auf beiden Seiten eines festen Trägers installiert werden, der großen (negativen) Verzerrungsmomenten und einer hohen Querkraft ausgesetzt ist.

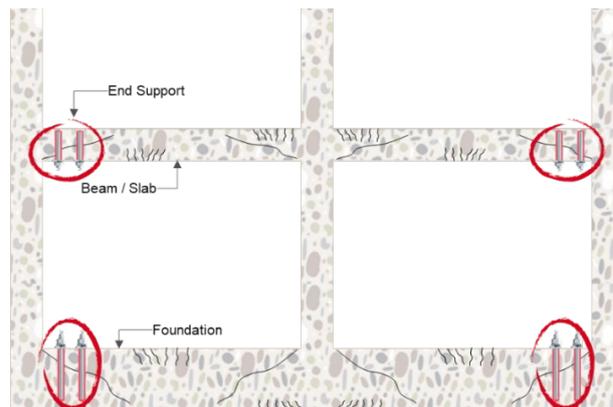


Abbildung 12: Konfiguration A, bei der die Montage von der Zugseite des Bauteils aus erfolgt, ohne dass es zu Biegerissen kommt

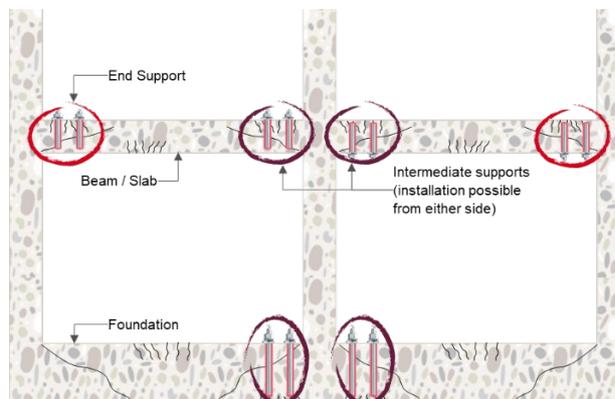


Abbildung 13: Konfiguration B, bei der die Montage von der Druckseite des Bauteils aus erfolgt oder entweder auf der Zug- oder Druckseite installiert wird, wo sich Biegerisse zusammen mit Scherrissen entwickeln

6.3 Anforderungen an die Detaillierung der Verstärkungsbewehrung

Installationslänge, l_{sw}

Wie aus den Gleichungen (14) und (19) für die nachträgliche Querkraftverstärkung ersichtlich ist, erfordert das Bemessungsmodell keine explizite Berücksichtigung der Installationslänge, l_{sw} , in den Nachweisen, da dies eine Funktion der Querschnittshöhe, h , und der „verbleibenden“ Überdeckung, c_{res} , ist, siehe Abbildung 14. Aus der Sicht der Montage verhindert die rückständige Abdeckung ein Ausbrechen oder Abplatzen des Betons an der dem Bohren gegenüberliegenden Oberfläche und erfordert keine Kenntnis der Lage der Längsbewehrung in der Nähe dieser Oberfläche.

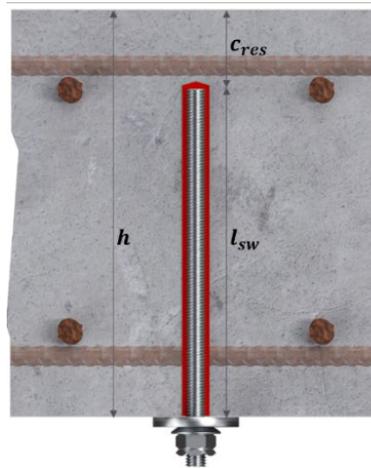


Abbildung 14: Vereinfachtes Schema der Anlage, aus [14]

Aus konstruktiver Sicht wird durch eine feste Installationslänge sichergestellt, dass die Querkraftbewehrung im Druckgurt des Bauteils verankert wird, wodurch die Ausbildung des Fachwerkmodells ermöglicht wird. Wie bereits in Abschnitt 2 dieses Dokuments erwähnt, beruht das Fachwerkmodell, auf dem die Querkraftbemessung basiert, darauf, dass die Querkraftbewehrung den Druckgurt als Zugband umschließt oder einhängt, um die Übertragung der Kräfte im Knoten zu ermöglichen. Daher kann die Kombination von Ankerstangen mit großem Durchmesser, z. B. M24, in dünneren Platten, z. B. 200 mm, zu potenziell gefährlichen Szenarien führen, bei denen die verbleibende Abdeckung, c_{res} , von 60 mm die Montagelänge, l_{sw} , von nur 140 mm übrig lässt, was für eine wirksame Verankerung des Fachwerkmechanismus an den Knotenpunkten nicht ausreicht. Solche Kombinationen sind daher nicht zulässig, und es ist eine Korrelation zwischen der Querschnittshöhe und dem Verstärkungsdurchmesser gemäß der Beziehung in Tabelle 3 [14] erforderlich.

	Durchmesser der Verstärkungsbewehrung			
	M12	M16	M20	M24
Minimale Querschnittshöhe, h_{min} [mm]	200	400	600	
c_{res} [mm]	35	40	45	60

Tabelle 3: Korrelation zwischen der Mindestquerschnittshöhe, der verbleibenden Überdeckung und dem Durchmesser der Verstärkungsbewehrung, aus Tabelle 3 von [14]

Abstand, s_{wl}

Abgesehen von der Erleichterung der gleichmäßigen Verteilung der Betonzuschläge beim Gießen ist in DIN EN 1992-1-1/NA kein Mindestabstand zwischen Querkraftbewehrungen wie z. B. Bügeln festgelegt. Der nachträgliche Bewehrungsanschluss erfordert ausnahmslos einen definierten Mindestabstand, um eine Rissbildung zwischen den Stangen und eine mögliche Verringerung der Gesamtscherfestigkeit zu vermeiden. Tabelle 4 unten gibt die Minima in Längs- und Querrichtung an.

Durchmesser der Verstärkungsbewehrung	Mindestabstand in Längsrichtung, $s_{wl,min}$ [mm]	Mindest-Querabstand, $s_{wt,min}$ [mm]
M12	120	120
M16	160	160
M20	200	200
M24	240	240

Tabelle 4: Mindestabstand von Mitte zu Mitte für jedes Verstärkungselement, wiedergegeben aus Tabelle 11 von [14]

Wie aus Tabelle 5 und Tabelle 6 ersichtlich ist, folgen die Maximalwerte für die Abstände in Längs- und Querrichtung den Festlegungen in DIN EN 1992-1-1/NA, Tabellen NA.9.1 und NA.9.2 für lineare Stangen und NCI bis 9.3.2 (4) für ebene Stangen, wobei $V_{Rd,max}$ s Gl. (1) ohne Änderungen genutzt wird.

Verhältnis Querkraft zu Strebenwiderstand	Maximaler Längsabstand, $s_{wl,max}$ [mm]	Maximaler Querabstand, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	min (0,7 h, 300 mm)	min (h, 800 mm)
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	min (0,5 h, 300 mm)	min (h, 600 mm)
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	min (0,25 h, 200 mm)	

Tabelle 5: Maximale Achsabstände in linearen Bauteilen (z. B. Balken), wiedergegeben aus den Tabellen NA.9.1 und NA.9.2 von [12]

Verhältnis Querkraft zu Strebenwiderstand	Maximaler Längsabstand, $s_{wl,max}$ [mm]	Maximaler Querabstand, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	0,7 h	h
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	0,5 h	
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	0,25 h	

Tabelle 6: Maximale Achsabstände in ebenen Bauteilen (z. B. Platten), wiedergegeben aus NCI zu 9.3.2 (4) von [12]

Randabstand, c_{wt}

Die Festlegung eines Mindestabstands zwischen der Position der Verstärkungsstangen und einer Betonkante verringert das Risiko von Rissen, wobei dieser Mindestabstand in der Bewertung des Mörtels ETA 20/0541 [11] evaluiert wird. Die η/a wird um einen Prozentsatz der Einbaulänge erhöht, der die maximal zulässige Neigung des Bohrlochs (5°) senkrecht zur Betonoberfläche berücksichtigt. Obwohl in DIN EN 1992-1-1/NA [12] für die traditionelle Querkraftbewehrung, wie z. B. Bügel, nicht definiert, erfordern die nachträglich eingebauten Bewehrungsstangen ebenfalls einen maximalen Randabstand, um mindestens eine oder mehrere Reihen von Bewehrungselementen in breiteren Querschnitten zu erzeugen ($b_w \geq 350$ mm), siehe Tabelle 7.

Bohrsystem	Größe der Ankerstange	Minimaler Randabstand, $c_{wt,min}$ [mm]		Maximaler Randabstand, $c_{wt,max}$ [mm]	
		Ohne Bohrhilfe	Mit Bohrhilfe	Lineare Bauteile	Flächige Bauteile
Hammerbohren mit oder ohne Hilti Hohlbohrer	M12	$45 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$45 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	max (175 mm, 0,5 h)
	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, 0,5 h)
	M24	$60 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$60 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
	M12	$50 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$50 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	max (175 mm, 0,5 h)

Bohrsystem	Größe der Ankerstange	Minimaler Randabstand, $c_{wt,min}$ [mm]		Maximaler Randabstand, $c_{wt,max}$ [mm]	
		Ohne Bohrhilfe	Mit Bohrhilfe	Lineare Bauteile	Flächige Bauteile
Pneumatisches Bohren	M16				
	M20	$55 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$55 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	max (250 mm, 0,5 h)
	M24	$60 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$60 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		

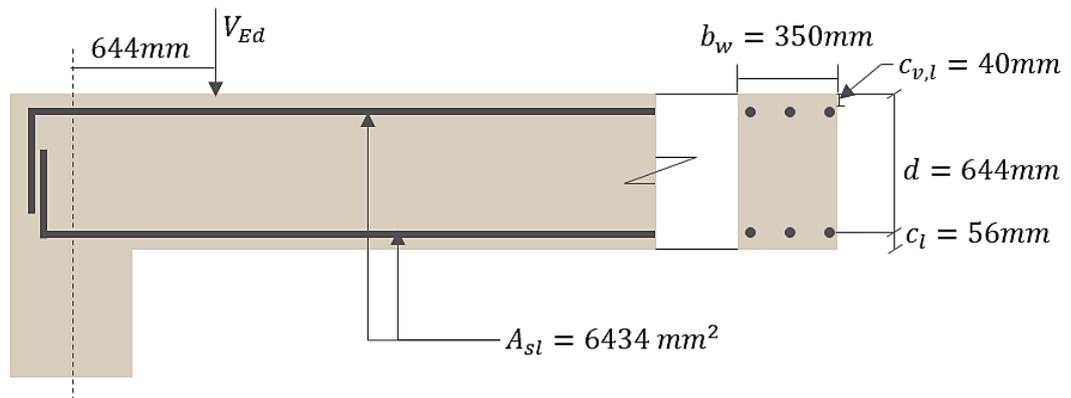
Tabelle 7: Minimale und maximale Randabstände auf der Grundlage von Bohrverfahren und Toleranzen, wiedergegeben aus

Tabelle 14 von [14]

Hinweis: Bohren und Schneiden durch die Biegebewehrung sollte nach Möglichkeit vermieden werden, um nachteilige Auswirkungen auf das Bauwerk zu vermeiden, es sei denn, dies wird im Entwurf ausdrücklich berücksichtigt. Lässt sich dies nicht vermeiden, z. B. um Bohrungen in Bereichen mit starker Bewehrung zu ermöglichen, sind mit ausdrücklicher Zustimmung des planenden Ingenieurs zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um den Verlust an Biegebewehrung auszugleichen.

7. BEMESSUNGSBEISPIEL

Ein vorhandener, einfach gestützter Balken mit einem Querschnitt von 350 mm x 700 mm der Güte C30/37 überspannt 8,0 m und wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit einer gleichmäßig verteilten Last von 142 kN/m belastet. Die Betonüberdeckung für die obere und untere Längsbewehrung beträgt 40 mm, mit dem Querschnitt des Biegestahls, $A_{sl} = 6434 \text{ mm}^2$, aus 8H32. Die Widerstandsfähigkeit des bestehenden Bauteils wird nach DIN EN 1992-1-1/NA nachgewiesen und nach *aBG Z-15.5-383* verstärkt.



Gesamtragfähigkeit des Trägers,

$$w = 142 \cdot 8.0 = 1136 \text{ kN}$$

Stützreaktion,

$$R = \frac{1136}{2} = 568 \text{ kN}$$

6.2.1 (8) [8]

Scherung im Abstand d von der Stütze,

$$V_{Ed} = 568 - (142 \cdot 0,644) = 477 \text{ kN}$$

6.2.1 (5) [8]

Überprüfung des bestehenden Abschnitts,

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

Gl. 3.15 [12]

Bemessungsdruckfestigkeit von Beton,

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

Gl. 6.2.a [8]

Scherfestigkeit des bestehenden Abschnitts,

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

6.2.2 (1) [8]

Verhältnis der Längsbewehrung,

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} = \frac{6434}{350 \cdot 644} = 0,0285 \geq 0,02$$

6.2.2 (1) [8]

Von der Höhe des Elements abhängiger Koeffizient, $k = 1 + \sqrt{200/644} = 1,557 \leq 2,0$

NDP Zu 6.2.2 (1) [12]

Minimale Bemessungsscherspannung (mit Interpolation $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$),

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0,0525}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0,0375}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d > 800 \text{ mm} \end{cases} = \frac{0,0492}{1,5} \cdot (1,557)^{\frac{3}{2}} \cdot (30)^{\frac{1}{2}} = 0,349 \text{ N/mm}^2$$

Gl. 6.2.b [8]

Minimale Scherfestigkeit,

$$V_{Rd,c,min} = v_{min} b_w d = 0,349 \cdot 350 \cdot 644 = 78,7 \text{ kN}$$

Bemessungs-Scherfestigkeit,

$$V_{Rd,c} = \left[0,1 \cdot 1,557 \cdot (100 \cdot 0,02 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] 350 \cdot 644 = 137,4 \text{ kN}$$

$\therefore V_{Rd,c} \leq V_{Ed}$, **Verstärkung erforderlich!**

- 6.2.1 (5) [8] Überprüfung des verstärkten Abschnitts $V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) \geq V_{Ed}$
- NDP 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] Der Strebenwinkel wird bestimmt durch: $1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \leq 3,0$
- Gl. 6.7bDE [12] Wobei $V_{Rd,cc} = 0,5 \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_{w,eff} \cdot z = 0,5 \cdot 0,48 \cdot \sqrt[3]{30} \cdot 350 \cdot 574 = 149,8 \text{ kN}$
- Somit ist der Mindeststrebenwinkel, $\theta = \cot^{-1}\left(\frac{1,2}{1 - 149,8/477}\right) = 29,75^\circ$ (für Bemessung $\theta = 30^\circ$ nutzen)
- Gl. 2.1 [14] Widerstandsfähigkeit der Druckstrebe, $V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 350 \cdot 574 \cdot 0,75 \cdot 17}{\cot(30) + \tan(30)} = 1109,2 \text{ kN}$
- Gl. 6.17 [8] Zusätzliche Zugkraft durch Querkraft, $\Delta F_{td} = 0,5 \cdot 477 \cdot \cot(30) = 413,1 \text{ kN}$

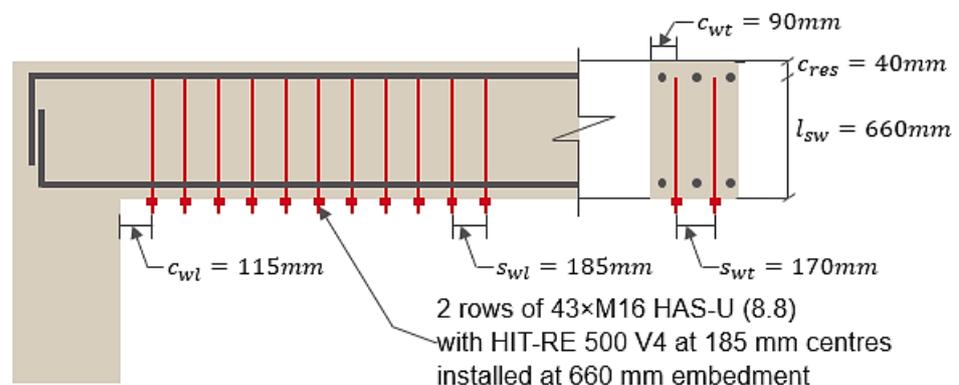
Unter der Annahme, dass **zwei** Reihen von M16 ($A_{sw} = 157 \text{ mm}^2$) im Abstand von **185 mm** entlang der Balkenlänge von der Zugseite aus eingebaut werden, $k_{pi} = 0,735$, ist die beanspruchte Fläche der nachträglich eingebauten Bewehrungsstangen pro Meter Länge:

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

Bemessung des Scherwiderstandes aus nachträglich eingebauter Querkraftbewehrung:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta = 0,735 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 1,6973 \cdot 574 \cdot \cot(30) = 483,7 \text{ kN} > 477 \text{ kN}$$

$\therefore V_{Rd} > V_{Ed}$, **Bemessung erfüllt!**



Spezifikation: Installation von **2** Reihen **43xM16 HAS-U 8.8** mit **HIT-RE 500 V4** mit einem Abstand von **185 mm zentriert** entlang der Balkenlänge mit einer Verankerung von **660 mm**, mit **einem Abstand der Reihen von 170 mm**.

Hebel zur Optimierung

Bei einer gleichmäßig verteilten Last, wie sie im obigen Beispiel verwendet wurde, nimmt die Querkraft, V_{Ed} , im mittleren Abschnitt eines Bauteils ab, wodurch der Balken effektiv in drei Zonen unterteilt wird. Tabelle 8 fasst die Ergebnisse desselben Berechnungsverfahrens für das obige Beispiel zusammen, jedoch mit einem gestuften Querkraftdiagramm, das in Abbildung 15 dargestellt ist und eine **Reduzierung** der Gesamtzahl der erforderlichen Elemente **von 86 auf 71** zeigt.

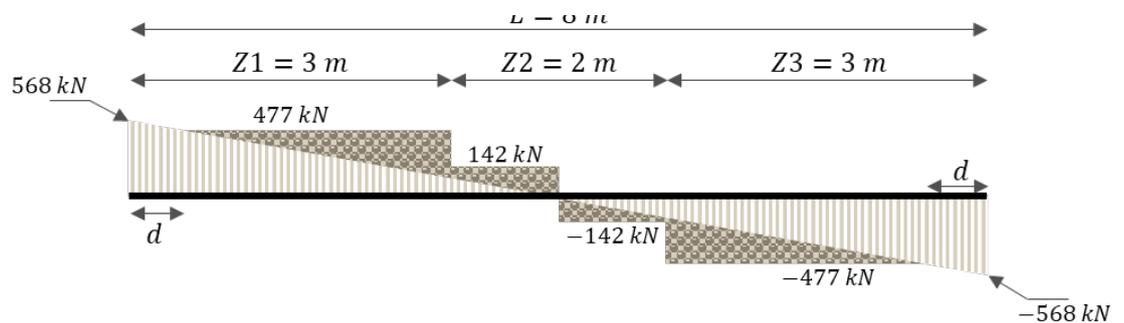


Abbildung 15: Abgestuftes Querkraftdiagramm nach Aufteilung des Trägers in drei Bereichen (Bereich 2 ist ein gemeinsamer Bereich für $V_{Ed} = \pm 142\text{ kN}$)

Bereich	n_{wt} [-]	s_{wl} [mm]	θ [°]	a_{sw} [mm ² /m]	$V_{Rd,max}$ [N]	$V_{Rd,s}$ [kN]	Verstärkungselemente / Bereich
Z1	2	185	30	1697	1109,2	483,7	32
Z2	1	$s_{wl,max} = 300$	30	523	1109,2	149,1	7
Z3	2	185	30	1697	1109,2	483,7	32

Tabelle 8: Entwurfzusammenfassung mit drei Bereichen (der maximale Abstand in Zone 2 übersteigt nicht die Grenzen, die in [12] angegeben ist).

8. ÜBERSICHT ÜBER DAS MODUL QUERKRAFTVERSTÄRKUNG VON PROFIS ENGINEERING

Wie bei der Bemessung von Querkraftbewehrung, wie z. B. in Betonbauteile eingegossene Bügel, kann die manuelle Suche nach der optimalen Verstärkungslösung für diese eine sehr repetitive und zeitaufwändige Aufgabe sein, da es viele verschiedene Möglichkeiten für Durchmesser, Abstände und Positionierung gibt. Die **cloud-basierte Planungssoftware** PROFIS Engineering von Hilti enthält ein **spezielles Modul** für die Bewertung und Verstärkung von Betonbauteilen mit unzureichendem Querkraftwiderstand, das Bauingenieure bei der Bewertung der Widerstandsfähigkeit bestehender Bauteile und deren Verstärkung unterstützt und so einen sichereren und effizienteren Arbeitsablauf gewährleistet. Zu den wichtigsten Vorteilen der Verwendung des Moduls Querkraftverstärkung von PROFIS Engineering gehören:

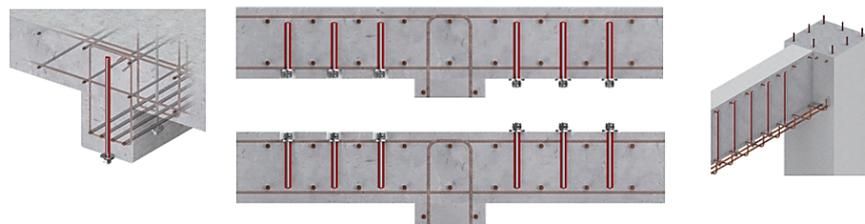
- Auswahl des entsprechenden linearen und ebenen Betonelements.
- Bestimmung des Typs, der Geometrie und der Materialparameter des vorhandenen Betonbauteils, um die Notwendigkeit einer Verstärkung unter einer neuen Querkraft zu prüfen.
- Einteilung des Betonträgers in verschiedene Zonen, um Lastenleitungen gemäß einem gestuften Querkraftdiagramm zu ermöglichen.
- Festlegung des Durchmessers der Verstärkungsbewehrung, der Abstände und des optimalen Druckstrebenwinkels.
- PROFIS Engineering erstellt das Layout und berechnet die insgesamt erforderlichen Verstärkungselemente auf der Grundlage der zuvor definierten Eingaben.
- PROFIS Engineering zeigt die Ausnutzungsgrade für den Nachweis des vorhandenen Betons, den Stahlwiderstand aus der Querkraftbewehrung und den maximalen Druckstrebenwiderstand an.
- Für die Dokumentation erstellt PROFIS Engineering ein umfassendes Bemessungsprotokoll mit den Berechnungsschritten und liefert die notwendigen Informationen für die Detaillierung der Bewehrung.

9. HILTI LÖSUNGEN FÜR DIE QUERKRAFTVERSTÄRKUNG

Die neuen Lösungen von Hilti für die Querkraftbewehrung, die nach **DIBt aBG Z15.5-383** zugelassen sind, werden im Folgenden zusammengefasst.

HIT-RE 500 V4 Mörtel + anschließende Bewehrung:

- HAS(-U) Stangen A4: M12, M16, M20 und M24
- HAS(-U) Stangen 8.8: M12, M16, M20 und M24
- Hilti Verfüllset (8.8 und A4): M12, M16, M20 und M24



Mortar:

- HIT-RE 500 V4



Steel elements:

- HAS (cut or meter) & HAS-U both in A4 & 8.8 with filling set

Installation tools:

- Drill machine
- Hammer drill bit
- Hollow drill bit
- Setting tool



Design Software:

PROFIS Engineering Suite



Installation tools:

- Injection dispenser



- Automated torque



10. ZUSAMMENFASSUNG

Der Umbau und die Umnutzung alter Bauwerke können gegenüber Neubauten viele Vorteile bieten, wobei jedes Bauwerk spezifische Ziele bei der Verstärkung erfüllen muss. Abhängig von der gewählten Entwurfsphilosophie kann der Tragwerksplaner Querkraftmängel in linearen oder flächigen Betonbauteilen mit verschiedenen Methoden beheben, von denen einige weniger invasiv sind als andere. Der Einsatz nachträglicher Querkraftbewehrung, wie die Lösung von Hilti mit HAS(-U)-Gewindestangen und dem Mörtel HIT-RE 500 V4, ist ein innovatives Beispiel für eine minimalinvasive Methode, mit der die Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils erheblich verbessert werden kann.

Nach entsprechender Prüfung und Erteilung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (*aBG*) durch das DIBt kann der Ingenieur mit einem vertrauten, auf dem Eurocode 2 basierenden Bemessungsansatz, der in die PROFIS Engineering Suite von Hilti integriert ist, eine passende Lösung finden, indem er zwischen den wichtigsten Bemessungsparametern Durchmesser, Abstand und variabel geneigter Druckstrebe wählt. Mit seiner intuitiven Benutzeroberfläche unterstützt das neue Querkraftverstärkungsmodul Ingenieure dabei, in der Entwurfsphase Zeit zu sparen, ihren Kunden einen Mehrwert zu bieten und gleichzeitig zu einer sichereren und widerstandsfähigeren gebauten Infrastruktur beizutragen.

11. REFERENZEN

- [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.

