Bemessung von Befestigungen mit elastischen Ankerplatten unter Zug- und Biegebeanspruchung

Longfei Li [1)]

[1] Dr. Li Anchor Profi GmbH

Kurzfassung

Die Bemessung von Befestigungen mit Ankerplatten unter Zug- und Biegebeanspruchung nach FprEN 1992-4 (EC2, Teil 4) [1] setzt voraus, dass die Ankerzugkräfte von der Ankerplatte auf Beton eben verteilt werden. Um diese Voraussetzung zu erfüllen, müssen die Ankerplatten ausreichend steif bzw. biegestarr sein. Die Bedingung für eine biegestarre Ankerplatte ist seit Jahrzehnten ohne zufriedenstellende Lösung untersucht und diskutiert worden. Die neusten Untersuchungen zeigen, dass die erforderliche Dicke für die biegestarre Ankerplatte in vielen Anwendungsfällen so groß sein kann, dass sie für die Praxis kaum Bedeutung mehr hat. Dies bestätigt die Aussagen von Schneider von 1999 und 2014 [10, 11], dass die Annahme der biegestarren Ankerplatten für die Berechnung der Ankerzugkräfte bei normalen Plattendicken unbrauchbar zu sein scheint. D. h. es ist unverzichtbar, dass die elastischen Ankerplatten mit normalen Dicken in der Praxis verwendet werden und die Ankerplatten-Biegeverformungen in der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

Im vorliegenden Beitrag werden die Vorschriften nach FprEN 1992-4 [1] zur Ankerzugkraft-Ermittlung analysiert. Die Besonderheiten für die Bemessung von Befestigungen mit elastischen Ankerplatten werden durch Rechenbeispiele mit einer herstellerunabhängigen Bemessungssoftware für Kopfbolzen und Dübel [2] erläutert und diskutiert.

Keywords: Ankerplattensteifigkeit, Balkentheorie, Biegestarre Ankerplatte, Elastische Ankerplatte

1. Einleitung und Problemstellung

Die Ableitung von Lasteinwirkungen auf die Anker wird in FprEN 1992-4 [1] Abschnitt 6.1 wie folgt allgemein geregelt.

6.1 (2) Die auf die Ankerplatte einwirkenden Lasten müssen als statisch äquivalente Zug- und Querkräfte auf die Anker übertragen werden.

6.1 (4) … Abstützeffekte müssen explizit bei der Bemessung von Befestigungen berücksichtigt werden (Bild 1.1). Stützkräfte C_{pr} können mit der Verformung der Ankerplatte und der Verschiebung des Ankers entstehen.

6.1 (5) Im Allgemeinen darf die Verteilung der Lasten auf die einzelnen Anker nach der Elastizitätstheorie berechnet werden; das gilt für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

FprEN 1992-4 [1] in Abschnitt 6.2.1 erlaubt die Berechnung der Ankerzugkräfte jedoch mit der Stahlbeton-Balkentheorie (Bild 1.2), bzw. analog zu Bernoulli’sche Hypothese unter der Annahme einer linearen Dehnungsverteilung entlang der Ankerplatte und einer linearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung, wenn die Ankerplatte ausreichend steif ist. Die Bedingung einer ausreichenden Ankerplattensteifigkeit definiert FprEN 1992-4 in 6.2.1 (2) wie folgt.

a) Die Ankerplatte verhält sich unter den Bemessungslasten elastisch ($\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd}$) und

b) Die Ankerplattenverformung ist im Vergleich zur axialen Ankerverschiebung vernachlässigbar klein.

Wenn die o.g. Verformungs-Anforderung nicht erfüllt ist, muss das elastische Verformungsverhalten der Ankerplatte bei der Berechnung der Ankerzugkräfte entsprechend berücksichtigt werden.

Aus den oben geführten Reglungen entstehen die folgenden Fragen:

1) Wie genau muss ein Rechenmodell oder eine Rechenannahme sein, mit dem die berechneten Ankerzugkräfte im Vergleich zu den realen Ankerzugkräften in Ankerplatten nach [1] Abschnitt 6.1 (2) als äquivalent behandelt werden können?
2) Wie können die Abstützeffekte in der Ankerbemessung berücksichtig werden?

3) Entspricht die Balkentheorie in [1] Abschnitt 6.2.1 der vorgeschriebenen Elastizitätstheorie in [1] Abschnitt 6.1?
4) Wie weist man nach [1] eine ausreichende Ankerplattensteifigkeit nach, so dass die Balkentheorie für die Berechnung der Ankerzugkräfte verwendet werden darf?
5) Wenn man die ausreichende Ankerplattensteifigkeit nach [1] Abschnitt 6.2.1(2) nicht nachweist oder nicht nachweisen kann, wie berücksichtigt man die elastischen Ankerplatten-Biege-verformungen bei der Ermittlung der Ankerzugkräfte?
6) Wenn die Ankerzugkräfte unter Berücksichtigung der elastischen Biegeverformungen der Ankerplatten ermittelt werden, können die Ankerwiderstände nach [1] berechnet werden? D.h. gilt [1] für elastische Ankerplatten?

Diese Fragen werden in folgenden Abschnitten mit Rechenbeispielen aus [2] untersucht, diskutiert und beantwortet.

Definition:

Die biegestarre Ankerplatte wird hier als fiktive Ankerplatte bezeichnet. Damit ergibt sich unter der Zug- und Biegebeanspruchung eine Ankerzugkraft-Verteilung wie aus der Balkentheorie (Bild 1.2).

Als elastische Ankerplatte wird bezeichnet, wenn die Ankerplatte sich linear elastisch verhält.

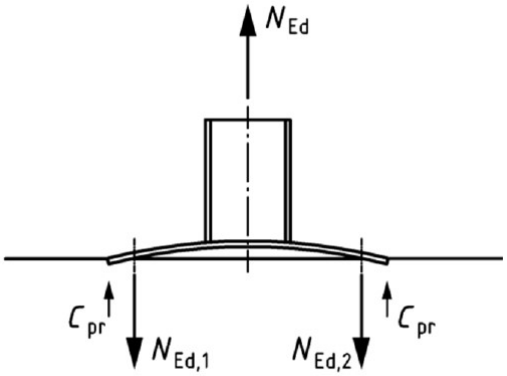


Bild 1.1 Beispiel für Stützkraft [1]

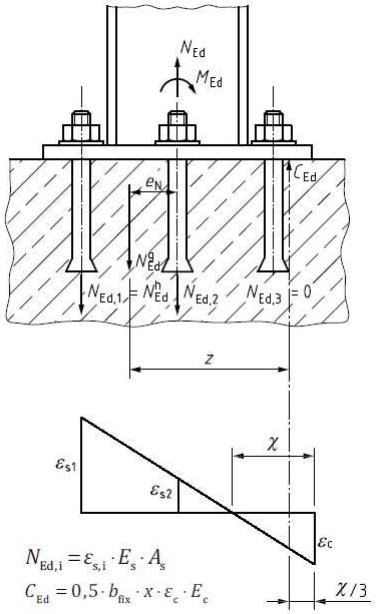


Bild 1.2 Befestigung mit einer biegestarren Ankerplatte, wobei die Ankerzugkräfte nach Balkentheorie berechnet werden dürfen [1]

2. Aktuelle Situation zur Bemessung der Ankerplattendicke

2.1 Allgemeines

In Europa gibt es seit 1997 Richtlinien bzw. Spezifikationen [3, 4, 5, 6] für die Bemessung der Befestigungen mit Ankerplatten. Diese sollen zu einer europäischen Norm [1] überführt werden. Für die Ermittlung der Ankerzugkräfte in Ankerplatten wird die Balkentheorie vorgeschrieben, mit der Voraussetzung, dass die Ankerplatten ausreichend steif sein müssen. Für den Nachweis der ausreichenden Ankerplattensteifigkeit forschen und diskutieren Fachleute schon jahrzehntelang ohne Konsens [7, 8, 9, 10, 11]. Dies führte zu der aktuell sehr unterschiedlichen Bemessung der Ankerplattendicke. Diese werden mit folgenden 2 Rechenbeispielen erläutert.

2.2 Rechenbeispiel 1 zur Bemessung der Ankerplattedicke

In Bild 2.1 ist eine Befestigung mittels 4-er Gruppe dargestellt. Die Einwirkungen aus Zuglast und Biegemomenten in x- und y-Richtung werden durch ein Anschlussprofil HE 160 B auf der Ankerplatte über 4 Anker in den Beton abgeleitet. Das Profil wird auf der Ankerplatte verschweißt.

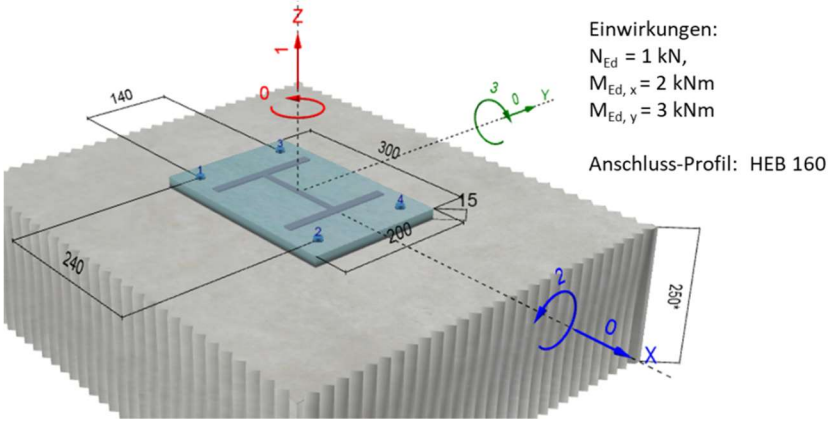


Bild 2.1 Rechenbeispiel 1 mit Befestigung mittels Vierergruppe

Zwei Ankersysteme wurden dabei untersucht. Ein System mit einer Ankersteifigkeit unter Gebrauchslast von 50,6 kN/mm simuliert einen mechanischen Dübel M12. Ein anderes System mit einer Ankersteifigkeit unter Gebrauchslast von 147,5 kN/mm simuliert einen Verbundanker M12 mit durchgehend metrischer Gewindestange. Mit diesem Beispiel wurden 6 Bemessungsprogramme aus der Praxis verglichen. Die erforderlichen Dicken für eine äquivalente biegestarre Ankerplatte aus den untersuchten Programmen sind in Bild 2.2 dargestellt. Diese variieren von 13 mm bis 48 mm.

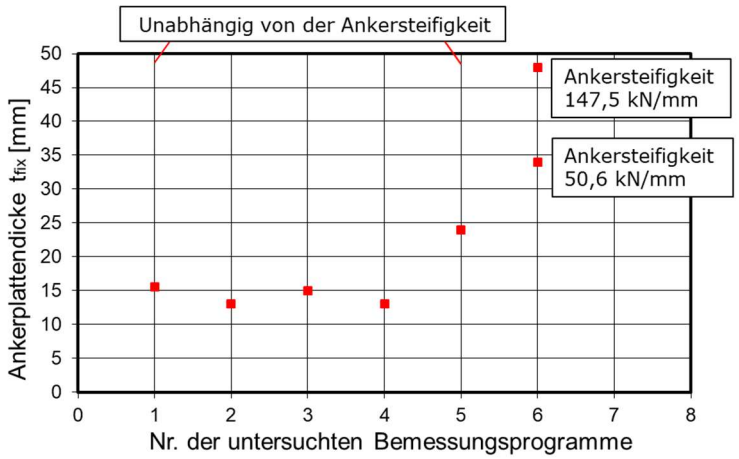


Bild 2.2 Empfohlene Ankerplattendicken für eine biegestarre Ankerplatte von verschiedenen Softwares in der aktuellen Praxis, Rechenbeispiel 1

In Bild 2.3 sind die ermittelten höchsten Ankerzugkräfte (Anker-Nr. 3, Bild 2.1) in Abhängigkeit von der Ankerplattendicke dargestellt. Bei der Balkentheorie wird die Ankerplatte als biegestarr angenommen und die so berechnete höchste Ankerzugkraft ist deshalb unabhängig von der Ankerplattendicke.

Bei der elastischen Ankerplatte [2] nimmt die höchste Ankerzugkraft mit steigender Ankerplattendicke ab. Weiterhin hängt die Ankerzugkraft vom inneren Hebelarm ab, der aus dem Zusammenspiel von Plattensteifigkeit und Ankersteifigkeit beeinflusst wird. Bei einer Ankerplattendicke von ca. 34 mm ergibt sich für die Anker mit der Ankersteifigkeit von 50,6 kN/mm die gleiche höchste Ankerzugkraft einer elastischen Ankerplatte wie bei einer biegestarren Ankerplatte. Für die Anker mit

der Ankersteifigkeit von 147,5 kN/mm ist eine Ankerplattendicke von ca. 49 mm erforderlich, um die äquivalente höchste Ankerzugkraft der biegestarren Ankerplatte zu erreichen. Bei der Ankerplattendicke von 15 mm betragen die Differenzen der höchsten Ankerzugkräfte zwischen der elastischen und biegestarren Ankerplatte jeweils ca. 30% bei einer Ankersteifigkeit von 50,6 kN/mm und ca. 35% bei einer Ankersteifigkeit von 147,5 kN/mm.

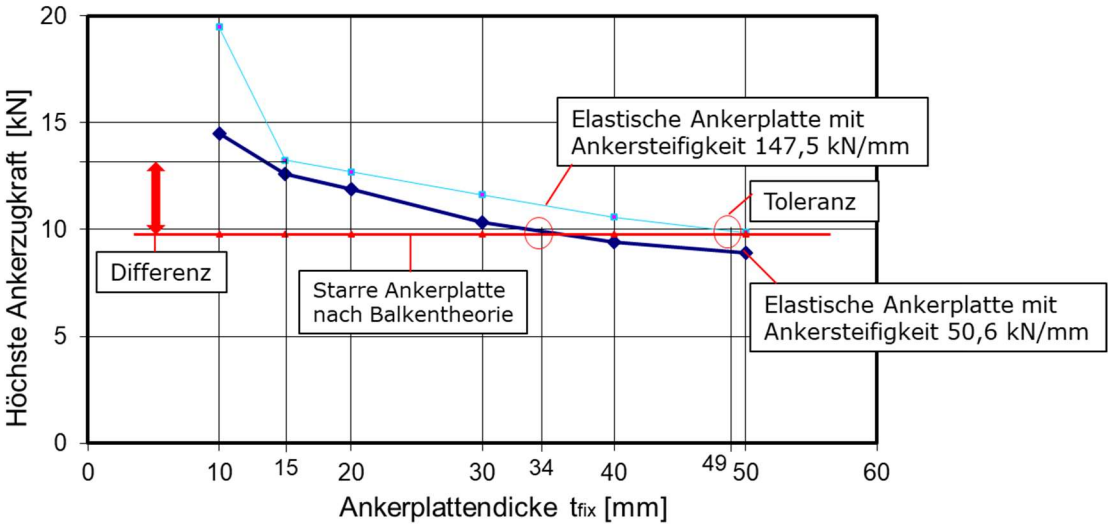
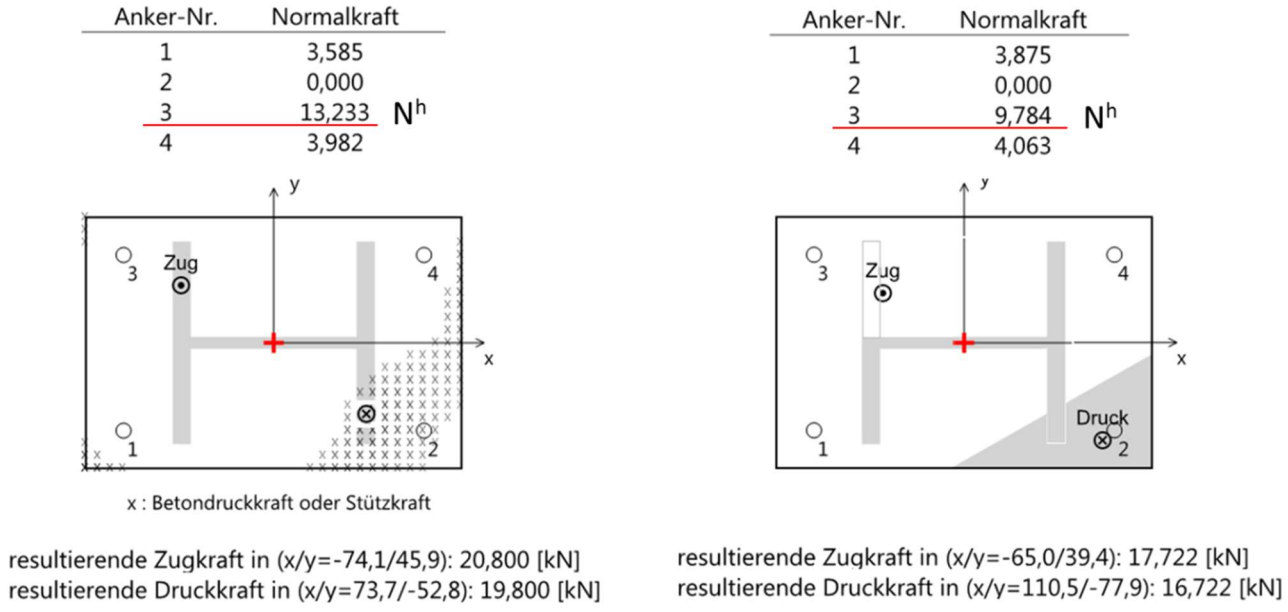


Bild 2.3 Berechnete höchste Ankerzugkraft am Anker Nr. 3 in der Gruppe in Abhängigkeit von Ankerplattendicke und Ankersteifigkeit (bei starrer Ankerplatte bei allen Programmen Nr. 1-6, mit elastischer Ankerplatte bei Programm-Nr. 6 [2])

In Bild 2.4 wird die Verteilung der Ankerzug- und Betondruckkräfte zwischen elastischer Ankerplatte (t_{fix}=15mm) und biegestarrer Ankerplatte (Balkentheorie) verglichen. Bei der elastischen Ankerplatte ist der innere Hebelarm deutlich kleiner als bei der biegestarren Ankerplatte. Dadurch entsteht die Differenz bei der ermittelten höchsten Ankerzugkraft.



a) Elastische Ankerplatte (t_{fix}=15mm) b) Biegestarre Ankerplatte (Balkentheorie)

Bild 2.4 Vergleich der Ankerzug- und Betondruckkräfte zwischen elastischer Ankerplatte (t_{fix}=15mm, Ankersteifigkeit 147,5 kN/mm) und biegestarrer Ankerplatte (Balkentheorie) [2]

Um zu klären, warum die berechneten Ankerplattendicken (Bild 2.2) so unterschiedlich sind, gehen wir auf die unterschiedlichen Berechnungsmethoden ein.

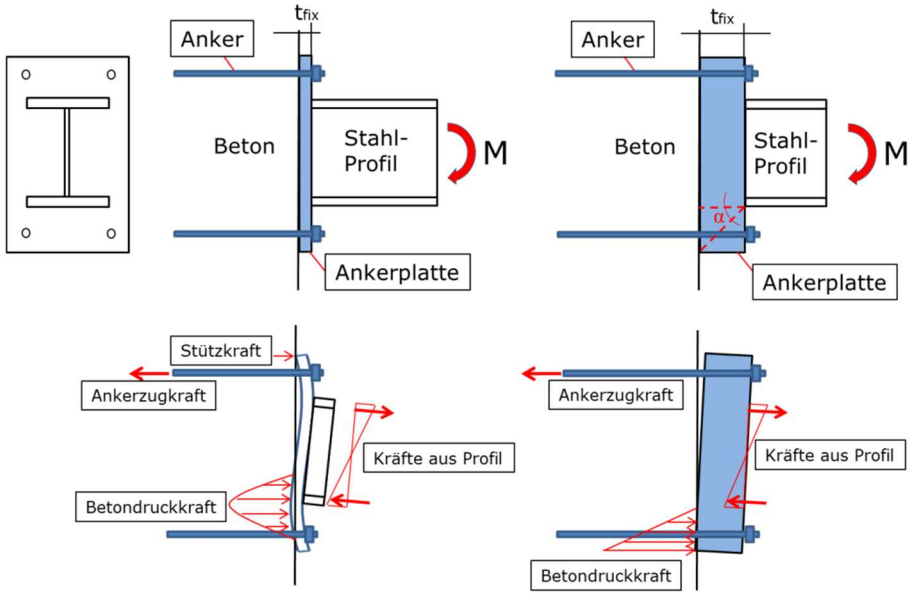
Die Ankerplattendicke bei den Softwares Nr. 1 - 5 wird mittels Spannungsbedingung (Bild 2.5 b)) wie folgt berechnet.

1) Die Ankerzug- und die Betondruckkräfte werden zuerst mit der Annahme einer linearen Dehnungsverteilung entlang der Ankerplatte nach Balkentheorie berechnet (Bild 1.2).

2) Diese so berechneten Ankerzug- und Betondruckkräfte und die Schnittgrößen aus dem Stahlprofil wirken als äußere Lasten auf der Ankerplatte ein. Dabei wird die Ankerplatte als Freikörper angenommen und mittels Finite-Element-Methode analysiert. Die Ankerplatte selbst soll im elastischen Bereich bleiben

3) Mit der Bedingung, dass die max. Spannung in der Ankerplatte aus 2) die Streckgrenze der Ankerplatte nicht überschreitet, wird die Ankerplattendicke bestimmt.

In dieser Berechnung werden die Anker-Verschiebung, die Beton-und Ankerplattenverformungen und die Kompatibilität dieser Verformungen (zwischen Rechenschritt 1 und 2) nicht berücksichtigt. Deshalb widerspricht diese Vorgehensweise eindeutig der Elastizitätstheorie des untersuchten Gesamtsystems mit Beton, Ankern, Ankerplatte und Stahlprofil. Die so ermittelte Ankerplattendicke t_{fix} ist relativ dünn. Damit kann keine Ankerzugkraft-Verteilung wie aus der Balkentheorie erzeugt werden. Die äquivalente Ankerzugkraft-Verteilung wie aus der Balkentheorie kann nur für hinreichend große Ankerplattendicken wie ein Balkenabschnitt mit einem konstanten Querschnitt über eine bestimmte Länge t_{fix}, z. B. mit einem Lastausbreitungswinkel α bis maximal 45° (Bild 2.5 b) oben), entstehen.



a) Elastische Ankerplatte b) Biegestarre Ankerplatte

Bild 2.5 Vergleich des Tragverhaltens zwischen elastischer und starrer Ankerplatte

Bei der Software Nr. 6 [2] wird die Ankerplattendicke mit der Steifigkeitsbedingung nach [8] bestimmt. Dabei wird die Ankerplattendicke so ermittelt, dass die Differenz der höchsten Ankerzugkräfte, die mit der Balkentheorie und mit dem elastischen Ankerplattenmodell berechnet werden, unter einer Toleranz von 3% liegt (siehe Bild 2.3).

Bei dem elastischen Ankerplattenmodell (Bild 2.5 a)) [2] wird angenommen, dass die Ankerplatte auf dem Beton elastisch gebettet wird. Jeder Anker wird durch eine Feder an der Ankerplatte simuliert, die nur Zugkraft aufnimmt. Die Kräfte aus dem Stahlprofil werden mit Balkentheorie berechnet und auf die Ankerplatte gesetzt. Mit den folgenden Parametern der Teilkomponenten von Ankerplatte, Ankern und Beton wird das gesamte Verankerungssystem mittels der Kirchhoff'schen Plattentheorie berechnet.

1) Ankerplattendicke t_{fix} und zugehöriger E-Modul

2) Ankerfederkonstante bzw. Ankersteifigkeit unter Gebrauchslast
3) Betonbettungsziffer

Bei der Berechnung werden das Gleichgewicht, das Last-Verformungsverhalten und die Kompatibilität der Verformungen der Teilkomponenten berücksichtigt. Die Untersuchungen in [8] zeigten, dass dieses auf Beton elastisch gebettete Plattenmodell die Ankerzugkräfte sehr genau simulieren kann. Dieses Modell entspricht der in [1] vorgeschriebenen Elastizitätstheorie besser als die Balkentheorie.

2.3 Rechenbeispiel 2 zur Bemessung der Ankerplattendicke

In Bild 2.6 ist eine 8fach Befestigung mit Ankerplatte dargestellt. Die Einwirkungen aus Zuglast und Biegemomenten in x- und y-Richtung werden durch ein Anschlussprofil HE 400 A in die Ankerplatte und von dort über die 8 Anker in den Beton abgeleitet. Das Profil ist auf der Ankerplatte verschweißt.

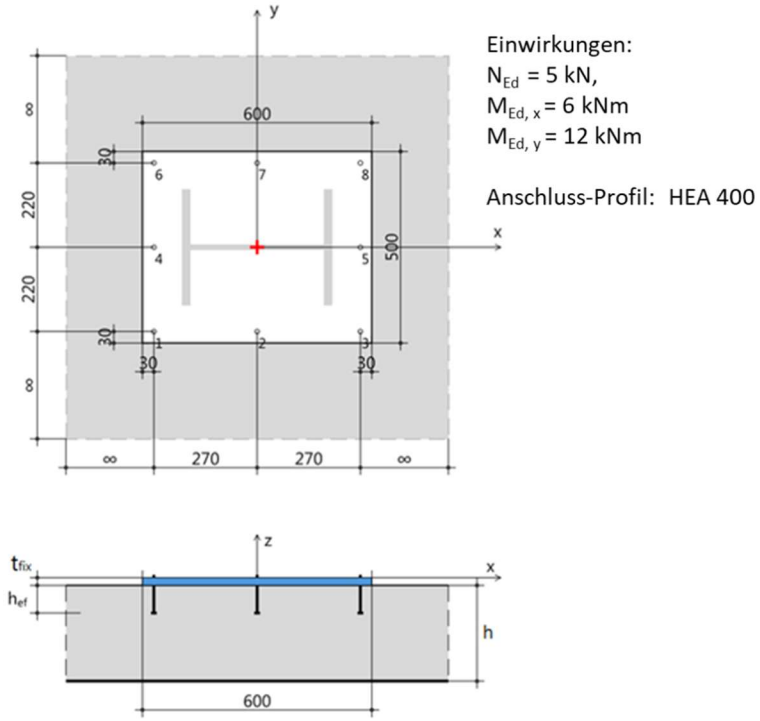


Bild 2.6 Rechenbeispiel 2 mit 8 Ankern

Das o.g. dargestellte System weist eine Ankersteifigkeit unter Gebrauchslast von 50,8 kN/mm auf und simuliert den Kopfbolzen-Dübel M12 mit der Verankerungstiefe von h_{ef} =72 mm. Mit diesem Beispiel wurden 5 Bemessungsprogramme aus der Praxis verglichen. Die erforderlichen Dicken für eine biegestarre Ankerplatte aus den untersuchten Programmen sind in Bild 2.7 dargestellt. Sie variieren von 11 mm bis 87 mm.

Mit der Ankerplattendicke von 20 mm, die von den meisten untersuchten Programmen (Bild 2.7 Nr. 1-3) in diesem Beispiel empfohlen wird, wird die Ankerzug- und Betondruckkraft-Verteilung mit dem Modell der elastischen Ankerplatte [2] nachvollzogen. Vergleicht man die Ankerzugkraftverteilung zwischen der elastischen Ankerplatte mit der Dicke von 20mm (Bild 2.8) und der angenommenen biegestarren Ankerplatte (Bild 2.9), ist der Unterschied, wie folgt, sehr deutlich.

- Die höchste Ankerzugkraft liegt bei der Ankerplattendicke von 20 mm nicht wie bei der biegestarren Ankerplatte bei Anker Nr. 6, sondern bei der Nr. 4 (Bild 2.8).
- Die Annahme der biegestarren Ankerplatte unterschätzt die höchste Ankerzugkraft um 73,6% (=100 x (15,1-8,7)/8,7)

Diese Differenz zeigt auch bei diesem Beispiel, dass die Annahme der Balkentheorie für die empfohlene Ankerplattendicke von 20 mm keine äquivalente Ankerzugkraft-Verteilung liefert.

Wird die Ankerplattendicke auf 87 mm erhöht, ergeben sich die Ergebnisse aus [2] wie folgt.

- Die höchste Ankerzugkraft liegt jetzt auch hier bei Anker-Nr. 6 (Bild 2.10).
- Die Differenz der höchsten Ankerzugkräfte zwischen der biegestarren Ankerplatte (Bild 2.9) und der elastischen Ankerplatte beträgt -0,15% <3% (= 100x(8,696-8,709)/8,709).

Damit ist die Steifigkeitsbedingung nach [8] erfüllt.

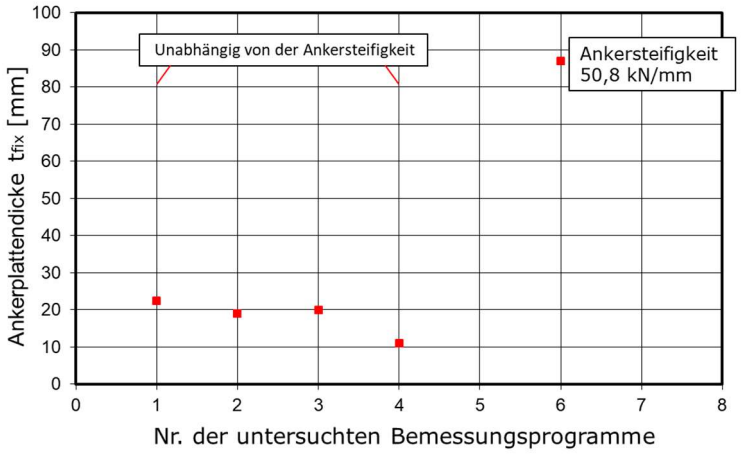


Bild 2.7 Empfohlene Ankerplattendicke für eine biegestarre Ankerplatte von verschiedenen Softwares aus der aktuellen Praxis, Rechenbeispiel 2

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	1,598	
2	2,100	
3	0,143	
4	15,076	N^h
5	0,000	
6	8,508	
7	7,675	
8	0,308	

resultierende Zugkraft in (x/y=-188,6/78,6)
resultierende Druckkraft in (x/y=175,9/-106,2)

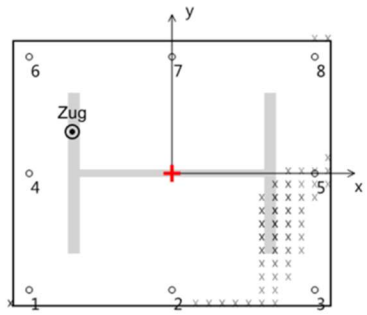


Bild 2.8 Berechnete Ankerzugkraft- und Betondruckkraft-Verteilung bei einer Ankerplattendicke von 20mm [2]

Aus den Rechenbeispielen 1 und 2 werden die folgenden Punkte deutlich.

- Die aktuell mit der Spannungsbedingung bestimmten Ankerplattendicken liegen eindeutig auf der unsicheren Seite (siehe die ermittelten Ankerplattendicken der Programme Nr. 1-5 im Bild 2.2 und der Programm Nr. 1-4 im Bild 2.7). Der Grund hierfür ist, dass die mit der Balkentheorie berechnete Verteilung der Ankerzug- und Betondruckkräfte mit der von den Programmen empfohlenen Ankerplattendicke nicht zusammenpasst; d. h. es gibt keine hinreichende Kompatibilität der Verschiebungen.
- Um eine äquivalente Verteilung der Ankerzug- und Betondruckkräfte wie aus der Balkentheorie zu erreichen, werden die Ankerplattendicken bei diesen üblichen Anwendungsbeispielen unrealistisch groß (siehe die ermittelten Ankerplattendicken der Programm-Nr. 6 [2] im Bildern 2.2 und 2.7).

Die Untersuchung mit den Rechenbeispielen zeigt, dass die Balkentheorie für die Ermittlung der Ankerzugkraft-Verteilung nicht generell verwendbar ist. Um die üblichen Ankerplattendicken zu verwenden, müssen die Biegeverformungen der Ankerplatten in der Berechnung berücksichtigt werden (siehe nächsten Abschnitt).

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	5,661	
2	2,049	
3	0,000	
4	7,185	
5	0,000	
6	8,709	N^h
7	5,097	
8	1,484	

resultierende Zugkraft in (x/y=-179,5/55,2)
resultierende Druckkraft in (x/y=261,3/-172,0)

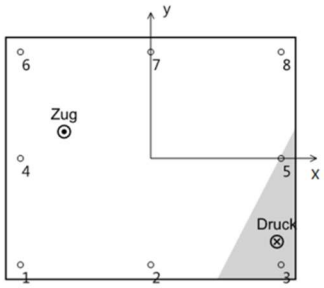
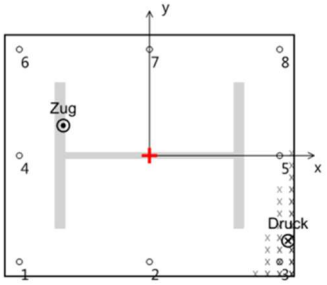


Bild 2.9 Ermittelte Ankerzugkraft- und Betondruckkraft-Verteilung nach der Balkentheorie [2]

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	4,801	
2	1,871	
3	0,000	
4	7,057	
5	0,245	
6	8,696	N^h
7	4,912	
8	1,225	

resultierende Zugkraft in (x/y=-178,9/62,3)
resultierende Druckkraft in (x/y=287,4/-176,5)



x : Betondruckkraft oder Stützkraft

Bild 2.10 Ermittelte Ankerzugkraft- und Betondruckkraft-Verteilung mittels elastischer Ankerplatte bei einer Dicke von 87 mm [2]

3. Bemessung mit elastischen Ankerplatten

Wie das Rechenbeispiel 2 in Abschnitt 2 zeigt, verteilen sich die Ankerzugkräfte bei einer 8fach Befestigung mit einer üblichen Ankerplattendicke je nach Profilanordnung generell nicht eben. Dafür kann das Bemessungsmodell in FprEN 1992-4 [1] für die Berechnung des Widerstands beim Betonversagen der Ankergruppe nicht verwendet werden, weil der Faktor $\psi_{ec,N}$ (siehe [1], Abschnitt 7.2.1.4, (6), Gl (7.6)) zur Berücksichtigung der Last-Exzentrizität für die nicht eben verteilten Ankerzugkräfte nicht anwendbar ist [12].

Bild 3.1 zeigt eine Versuchsnachrechnung aus [8]. Die 9fach Kopfbolzen-Befestigung [13] wurde mit einer Ankerplatte (t_{fix}=15mm) durch eine zentrische Zuglast bis zum Bruch getestet. Die rechnerische Betonversagenslast bei biegestarrer Ankerplatte sollte ca. 136 kN betragen. Im Versuch versagte die Gruppe jedoch bereits bei einer Zuglast von ca. 94 kN, da der Anker in der Mitte durch die höhere Last als bei biegestarrer Ankerplatte früher versagte (siehe Bild 3.1 rechts).

Wird die getestete Gruppe nach [1] bemessen, ergibt sich ein Bemessungswiderstand von 90,7 kN beim Betonversagen der Gruppe. Der vorhandene Teilsicherheitsfaktor beträgt γ_{Mc}=94/90,7=1,04. Dies ist wesentlich kleiner als der mindestens erforderliche von γ_{Mc} =1,5. Der Grund dafür ist, dass die nicht eben verteilten Ankerzugkräfte durch den Abminderungsfaktor $\psi_{ec,N}$ für die Last-Exzentrizität auf Grund der Doppelsymmetrie der Ankerkräfte sich zu $\psi_{ec,N}$ =1,0 (nach [1]) ergibt.

Deshalb schlägt [8] analog zu [3] für die elastischen Ankerplatten einen zusätzlichen Nachweis für Beton- bzw. Kombiversagen der Ankergruppe wie folgt vor (Bild 3.2).

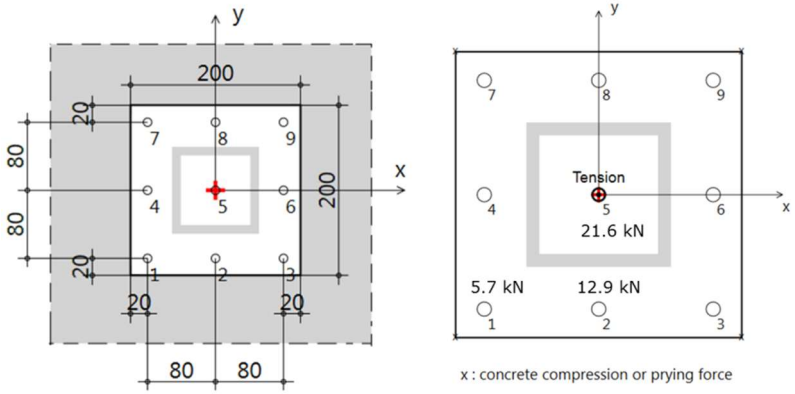
$$\psi_{ec,N} = 1{,}0 \qquad (3.1)$$

$$N_{Ed}{}^h \leqslant N_{Rd,c}/n \qquad (3.2)$$

mit $N_{Ed}{}^h$: Höchste Ankerzugraft in der Gruppe
$N_{Rd,c}$: Bemessungswiderstand der Ankergruppe beim Betonversagen mit $\psi_{ec,N}$ =1,0
n: Anzahl der mit Zug beanspruchten Anker in der Gruppe

Die Versuchsnachrechnungen zeigen, dass der vorgeschlagene Zusatznachweis konservativ ist [8].

Die Bemessung bei elastischen Ankerplatten mit diesem Zusatznachweis wird im nächsten Abschnitt mit Bemessungsbeispielen detailliert erläutert.



Angenommene Ankersteifigkeit 76.1 kN/mm wie in Tests

$f_{c,150}$ = 43.4 N/mm², h_{ef} =65 mm, t_{fix}=15mm,

Bild 3.1 Ermittelte Ankerzugkraft-Verteilung einer 9fach Befestigung [8]

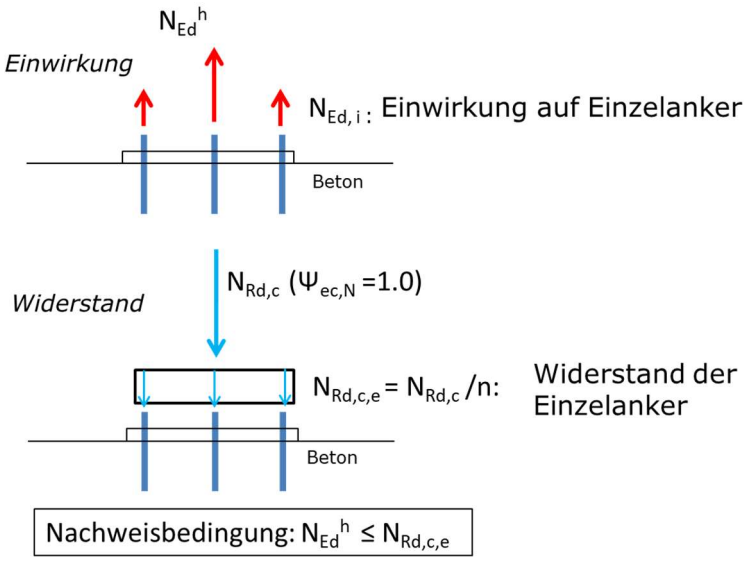


Bild 3.2 Anschauliche Darstellung des zusätzlichen Nachweises für elastische Ankerplatten [8]

4. Bemessungsbeispiele mit elastischen Ankerplatten

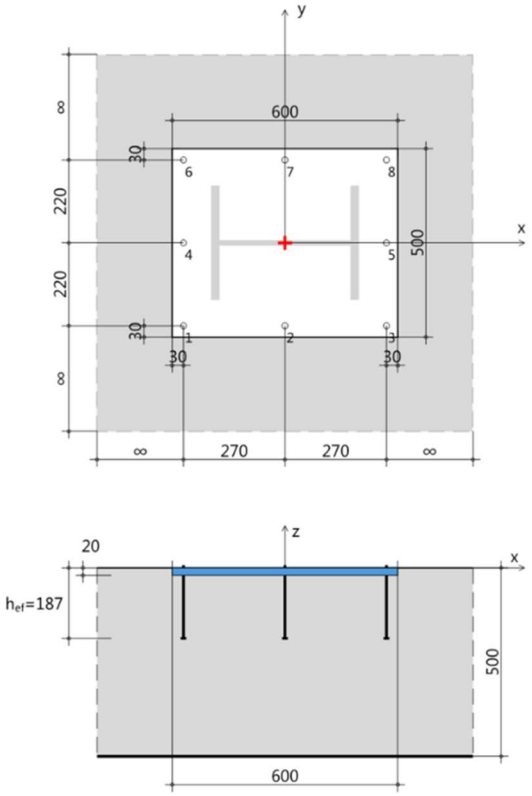
4.1 8fach Befestigung unter zentrischer Zuglast

Die in Bild 2.6 (Abschnitt 2.3) dargestellte Befestigungsanordnung wird unter einer Zuglast N_{Ed} von 120 kN über das Anschlussprofil beansprucht (Bild 4.1). Bei den meisten aktuellen Softwares wird die Bemessung wie folgt geführt.

- Die Ankerzugraft wird unter der Annahme der biegestarren Ankerplatten berechnet mit $N_{Ed,i}$ =120/8=15 kN pro Anker ohne Last-Exzentrizität in der Gruppe.
- Mit diesen ermittelten Ankerzugkräften wird der Widerstand der Gruppe berechnet.
- Die Ankerplattendicke wird dann mit den Ankerzugkräften von 15 kN pro Anker und den Kräften aus dem Stahlprofil auf der Ankerplatte mit FEM unter der Spannungsbedingung, dass die max. Spannung in der Ankerplatte ihre Streckgrenze nicht überschreitet, berechnet. Die erforderliche Dicke ergibt sich zu ca. 19 mm.

Dieses Beispiel wurde mit elastischer Ankerplatte (t_{fix} =20 mm) und mit Kopfbolzen d16 x 175 (Bild 4.1) wie folgt neu bemessen [2]. Die Ankersteifigkeit von 119,4 kN/mm wurde mit der Ankerlänge, dem Schaftquerschnitt, der Schulterfläche des Kopfbolzens und der Betonbettungsziffer nach [8] berechnet.

Die berechnete Ankerzugkraft-Verteilung ist in Bild 4.2 dargestellt. Es ist naheliegend, dass die Ankerzugkraft in der Ankerplatte durch die Steifigkeit der Ankerposition in der Ankerplatte verteilt wird. Die Anker Nr. 4 und 5 befinden sich am nächsten zu den Stegen des Anschlussprofils und erhalten so die höchste Zugkraft in der Gruppe. Diese Ankerzugkraft von 30,5 kN ist mehr als doppelt so hoch wie die nach der Balkentheorie (d.h. biegestarre Ankerplatte).



Einwirkungen:
N_{Ed} = 120 kN

Untergrund:
- Gerissener Beton, Bauteildicke h=500mm
  Festigkeitsklasse C20/25, $f_{ck,cube}$=25,0N/mm²

Ankerplatte:
- S 235 (St 37), E=210000N/mm²
  f_{yk}=235N/mm², γ_s=1,5
- Angenommen: elastische Ankerplatte
- Verwendete Dicke: 20,0mm
  σ/f_{yd} =112,4/156,7=71,7%

Profil:
- HEA Reihe: HEA 400
  H x W x T x FT [mm]: 390 x 300 x 11,0 x 19,0

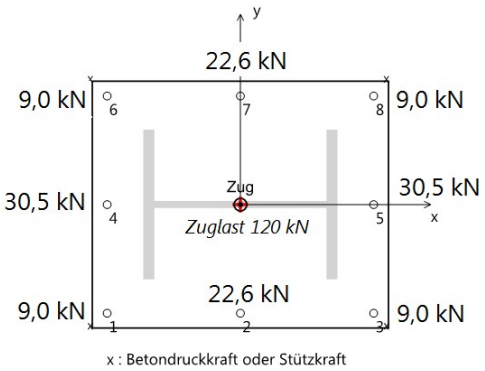
Gewählte Anker:
- Kopfbolzen d16 x 175

Bild 4.1 Randbedingungen des Bemessungsbeispiels 4.1

Die detaillierte Berechnung des Gruppen-Widertandes bei Betonversagen ist in den Tafeln 4.1 und 4.2 wiedergegeben. Mit der biegestarren Ankerplatte hat die Ankergruppe eine Auslastung von 100x120/253,7=47% (Tafel 4.1, bei N_{sd} =142.141 kN abzüglich der Stützkraft von 22,141 kN). Mit der elastischen Ankerplatte beträgt die Auslastung 56% ohne Berücksichtigung der Lastexzentrizität (Tafel 4.1) und von 96 % mit Zusatznachweis (Tafel 4.2).

Für die Ankeranordnung des Bemessungsbeispiels 4.1 empfiehlt eine aktuelle Bemessungs-software eines Dübel-Herstellers für einen Verbundanker M12 mit ETA (European Technical Assessment) im gerissenen Beton C30/37 bei der Auslastung von 97% (<100%) mit folgenden Parametern:
- Verankerungstiefe von 70 mm
- erforderliche minimale Ankerplattendicke von 19 mm

Eine Vergleichsrechnung mit elastischer Ankerplatte mit h_{ef} =70 mm und t_{fix} =19 mm [2] mit dem gleichen Produkt ergibt jedoch die in Bild 4.3 dargestellte Ankerzugkraft-Verteilung. Die so ermittelte höchste Ankerzugkraft ist mehr als doppelt so hoch wie bei starrer Ankerplatte. Da der vorhandene Achsabstand s=220mm (> 3h_{ef} =210mm) ist, ergibt sich die Auslastung bei der elastischen Ankerplatte 31,7/15 x 97 = 205% >>100%. Für eine sichere Befestigung mit der Ankerplattendicke von 20 mm wäre statt dessen eine Verankerungstiefe von 180 mm mit dem o.g. Produkt erforderlich [2].



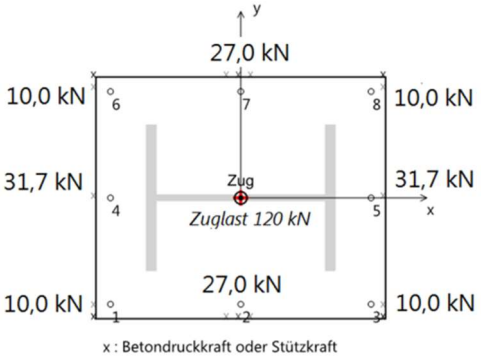


Bild 4.3 Berechnete Ankerzugkraft-Verteilung mit h_{ef} =70 mm und t_{fix} =19 mm [2]

Bild 4.2 Berechnete Ankerzugkraft-Verteilung der 9fach Befestigung in Bild 4.1 [2]

Betonausbruch

$N_{Rk,c}=N^0_{Rk,c} \cdot \psi_{A,N} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N}$ $\quad N^0_{Rk,c}=k_1 \cdot (f_{ck,cube})^{0.5} \cdot h_{ef}^{1.5}$ [N] $\quad \psi_{A,N}=A_{c,N}/A^0_{c,N}$ $\quad N_{Rd,c}=N_{Rk,c}/\gamma_{Mc}$

Grundkennwerte für den Nachweis des Betonausbruchs:

h_{ef} [mm]	$s_{cr,N}$ [mm]	$c_{cr,N}$ [mm]	k_1	$f_{ck,cube}$ [N/mm²]	γ_{Mc}
187,0	561,0	280,5	8,5	25,0	1,50

Alle zugbeanspruchten Anker (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) sind in einer Gruppe ($s \le s_{cr,N}$).

$N^0_{Rk,c}$ [kN]	$A_{c,N}$ [mm²]	$A^0_{c,N}$ [mm²]	$\psi_{A,N}$	h_{ef} [mm]	$s_{cr,N}$ [mm]	$c_{cr,N}$ [mm]	c_{-x} [mm]	c_{+x} [mm]	c_{-y} [mm]	c_{+y} [mm]
108,680	1102101	314721	3,502	187,0	561,0	280,5	-	-	-	-

$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$	$e_{N,x}$ [mm]	$e_{N,y}$ [mm]	$\psi_{ec,N,x}$	$\psi_{ec,N,y}$	$\psi_{ec,N}$	$N_{Rk,c}$ [kN]	$N_{Rd,c}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,c}$
1,000	1,000	0,0	0,0	1,000	1,000	1,000	380,581	253,721	142,141	**0,560**

Tafel.4.1 Berechnung des Gruppen-Widerstandes beim Betonversagen bei elastischer Ankerplatte ohne Berücksichtigung der Lastexzentrizität [2]

Betonausbruch auf Einzeldübel (Zusätzlicher Nachweis bei elastischer Ankerplatte analog zu ETAG 001 Anhang C Gl. (5.2f))

$N^0_{Rk,ec}=N_{Rk,c}/\psi_{ec,N}$ $\quad N_{Rk,ec}=N^0_{Rk,ec}/n$ $\quad N_{Rd,ec}=N_{Rk,ec}/\gamma_{Mc}$ $\quad \gamma_{Mc}=1,50$

Anker-Nr.	$N_{Rk,c}$ [kN]	$\psi_{ec,N}$	$N^0_{Rk,ec}$ [kN]	$N_{Rk,ec}$ [kN]	$N_{Rd,ec}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,ec}$
4	380,581	1,000	380,581	47,573	31,715	30,450	**0,960**
5	380,581	1,000	380,581	47,573	31,715	30,450	**0,960**

Tafel.4.2 Zusätzlicher Nachweis bei elastischer Ankerplatte [2]

Im Bemessungsbeispiel 4.1 kann eine Sicherheitslücke mit einem Faktor 2 bei der aktuellen Bemessung der Ankerplattendicke mit Spannungsbedingungen (Programm-Nr. 1-5, Bilder 2.2 und 2.7) festgestellt werden. Gründe dafür sind:

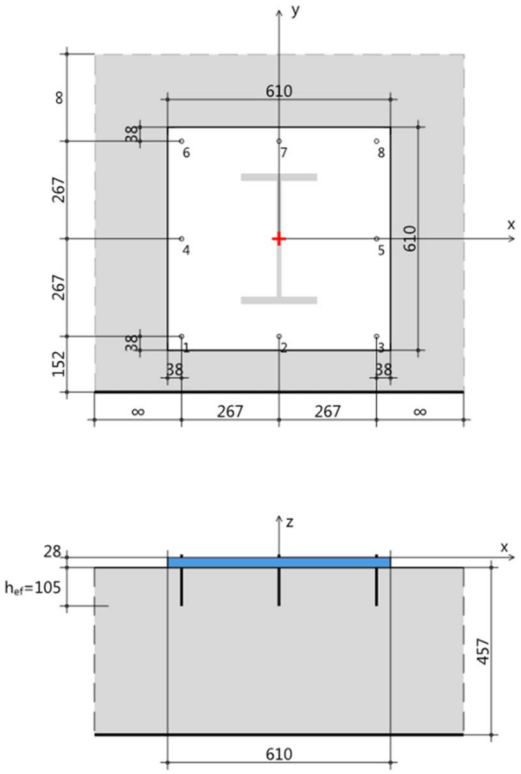
- Die Ankerzugkraft-Verteilung aus der biegestarren Ankerplatte ist nicht korrekt für die empfohlene Ankerplattendicke von 20 mm. Bei dieser Ankerplattendicke beträgt die Stützkraft bereits mehr als 22 kN.
- Die beim Modell der elastischen Ankerplatte mit t_{fix} = 20 mm hervorgerufenen, nicht eben verteilten Ankerzugkräfte werden nicht berücksichtigt.

4.2 8fach Befestigung unter Biegebeanspruchung

In ACI 355.3R-11 [14] gibt es ein Bemessungsbeispiel mit 8fach Befestigung unter Biegemoment- und Querlastbeanspruchung. Dieses Beispiel wird hier mit Belastung durch ein Biegemoment untersucht (Bild 4.4). Aus einer aktuellen Bemessungssoftware eines Dübel-Herstellers wäre diese Befestigung mit folgenden Parametern bei der Auslastung von 100% zu realisieren:
- Verbundanker M12 mit ETA und einer optimierten Verankerungstiefe von 105 mm
- erforderliche Ankerplattendicke von mindestens 28 mm.

Die mit biegestarrer Ankerplatte berechnete höchste Ankerzugkraft beträgt 21,1 kN.

Bei Vergleichsrechnung mit [2] ergibt sich jedoch die in Bild 4.5 dargestellte Ankerzugkraft-Verteilung. Die so ermittelte höchste Ankerzugkraft ist mehr als doppelt so hoch wie bei biegestarrer Ankerplatte. Die Auslastung bei der elastischen Ankerplatte beträgt 283% >>100%. Für eine sichere Befestigung bei der Auslastung von 96% wäre statt dessen der Verbundanker M20 mit der Verankerungstiefe von 280 mm erforderlich.



Einwirkungen:
$M_{Ed,x}$ = 40,7 kNm

Anschluss-Profil:
AISC W14x53

Untergrund:
- Gerissener Beton, Bauteildicke h=457mm
  Festigkeit benutzerdefiniert, $f_{ck,cube}$=38,3N/mm²

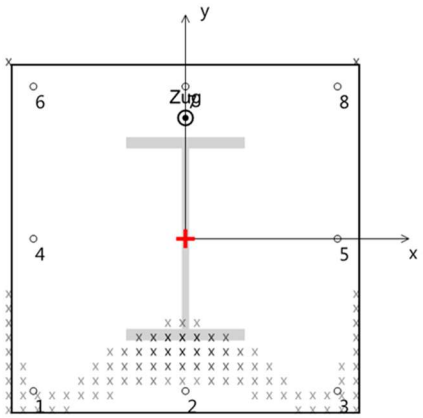
Ankerplatte:
- S 235 (St 37), E=210000N/mm²
  f_{yk}=235N/mm², γ_s=1,5
- Angenommen: elastische Ankerplatte
- Verwendete Dicke: 28,0mm
  σ/f_{yd} =145,1/156,7=92,6%

Bild 4.4 Randbedingungen des Bemessungsbeispiels 4.2

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	0,002	
2	0,000	
3	0,002	
4	10,916	
5	10,916	
6	13,334	
7	57,551	N^h
8	13,334	

resultierende Zugkraft in (x/y=0,0/211,8)
resultierende Druckkraft in (x/y=0,0/-172,9)

Angenommen: Ankersteifigkeitsfaktor 1,00
⟶ Ankerfederkonstante Cg = 133,1 kN/mm



x : Betondruckkraft oder Stützkraft

Bild 4.5 Berechnete Ankerzugkraft-Verteilung mit h_{ef} =105 mm und t_{fix} =28 mm [2]

Kombiversagen (durch Herausziehen und Betonausbruch)

$N_{Rk,p}=N^0_{Rk,p} \cdot \psi_{A,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{ec,Np} \cdot \psi_{re,Np}$ $N^0_{Rk,p} = \pi \cdot d \cdot l_b \cdot \tau_{Rk} \cdot \psi_c$ [N] $\psi_{A,Np} = A_{p,N}/A^0_{p,N}$ $N_{Rd,Np} = N_{Rk,Np}/\gamma_{Mp}$

$s_{cr,Np} = 20 \cdot d \cdot (\tau_{Rk,ucr} / 7.5)^{0.5} \le 3 \cdot l_b$ $\psi_{g,Np} = \psi^0_{g,Np} - (s_m / s_{cr,Np})^{0.5} \cdot (\psi^0_{g,Np} - 1) \ge 1.0$

l_b = Verbundlänge, h_{ef} = Effektive Verankerungstiefe. Grundkennwerte für den Nachweis des Kombiversagens:

τ_{Rk} [N/mm²]	$\tau_{Rk,ucr}$ [N/mm²]	ψ_c	d [mm]	h_{ef} [mm]	$s_{cr,Np}$ [mm]	$c_{cr,Np}$ [mm]	l_b [mm]	k	$f_{ck,cube}$ [N/mm²]	γ_{Mp}
8,5	18,0	1,05	12,0	105,0	315,0	157,5	105,0	2,3	38,3	1,50

Alle zugbeanspruchten Anker (1, 3, 4, 5, 6, 7, 8) sind in einer Gruppe ($s \le s_{cr,Np}$).

$N^0_{Rk,p}$ [kN]	$A_{p,N}$ [mm²]	$A^0_{p,N}$ [mm²]	$\psi_{A,Np}$	$\psi_{s,Np}$	h_{ef} [mm]	$s_{cr,Np}$ [mm]	$c_{cr,Np}$ [mm]	l_b [mm]	c_{-x} [mm]	c_{+x} [mm]	c_{-y} [mm]	c_{+y} [mm]
35,329	600233	99225	6,049	0,990	105,0	315,0	157,5	105,0	-	-	152,4	-

$\psi^0_{g,Np}$	s_m [mm]	$\psi_{g,Np}$	$\psi_{re,Np}$	$e_{Np,x}$ [mm]	$e_{Np,y}$ [mm]	$\psi_{ec,Np,x}$	$\psi_{ec,Np,y}$	$\psi_{ec,Np}$	$N_{Rk,Np}$ [kN]	$N_{Rd,Np}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,p}$
1,610	304,8	1,010	1,000	0,0	173,7	1,000	0,476	0,476	101,648	67,766	106,055	**1,565**

Kombiversagen auf Einzeldübel (Zusätzlicher Nachweis bei elastischer Ankerplatte analog zu ETAG 001 Anhang C Gl. (5.2f))

$N^0_{Rk,ep} = N_{Rk,Np} / \psi_{ec,Np}$ $N_{Rk,ep} = N^0_{Rk,ep} / n$ $N_{Rd,ep} = N_{Rk,ep}/\gamma_{Mp}$ $\gamma_{Mp} = 1{,}50$

Anker-Nr.	$N_{Rk,Np}$ [kN]	$\psi_{ec,Np}$	$N^0_{Rk,ep}$ [kN]	$N_{Rk,ep}$ [kN]	$N_{Rd,ep}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,ep}$
7	101,648	0,476	213,741	30,534	20,356	57,551	**2,827**

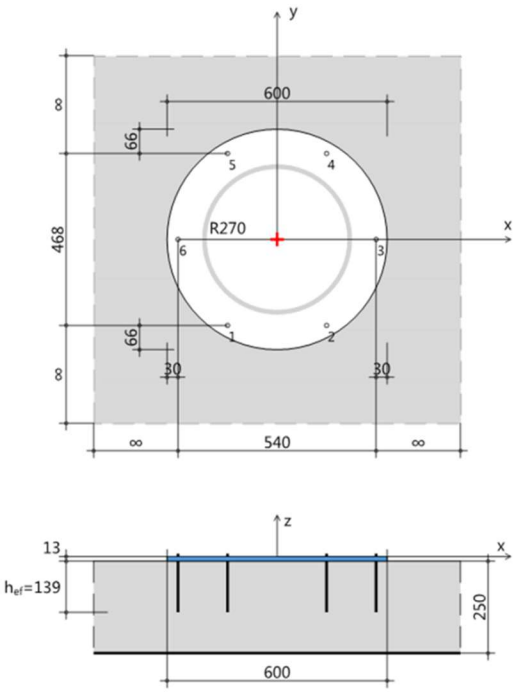
Tafel.4.3 Berechnung des Gruppen-Widerstandes beim Kombiversagen mit elastischer Ankerplatte [2]

4.3 6fach Befestigung mit runder Ankerplatte unter Biegebeanspruchung

In Bild 4.6 sind die Randbedingungen des Beispiels angegeben. Aus einer aktuellen Bemessungssoftware eines Dübel-Herstellers wäre diese Befestigung mit folgenden Parametern bei einer Auslastung von 100% zu realisieren:

- Verbundanker M12 mit ETA und der optimierten Verankerungstiefe von 139 mm
- Erforderliche Ankerplattendicke von mindestens 13 mm.

Die mittels biegestarrer Ankerplatte berechnete höchste Ankerzugkraft beträgt 12,2 kN (Bild 4.7).



Einwirkungen:
N_{Ed} = 8 kN,
$M_{Ed,x}$ = 8 kNm
$M_{Ed,y}$ = 10 kNm

Untergrund: • Gerissener Beton, Bauteildicke h=250mm
Festigkeitsklasse C20/25, $f_{ck,cube}$=25,0N/mm²

Ankerplatte: • S 235 (St 37), E=210000N/mm²
f_{yk}=235N/mm², γ_s=1,5
• Angenommen: elastische Ankerplatte
• Verwendete Dicke: 13,0mm
σ/f_{yd} =127,8/156,7=81,6%

Profil: • Rohr: Geometrie benutzerdefiniert
H x W x T x FT [mm]: 406 x 406 x 10,0

Bild 4.6 Randbedingungen des Bemessungsbeispiels 4.3

Eine Vergleichsrechnung mit der elastischen Ankerplatte [2] ergibt jedoch die in Bild 4.8 dargestellte Ankerzugkraft-Verteilung. Die so ermittelte höchste Ankerzugkraft beträgt 21 kN. Die Auslastung bei der elastischen Ankerplatte beträgt somit 197% >> 100% (Tafel 4.4).

Ankerzugkräfte nach Balkentheorie [kN]

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	4,744	
2	0,000	
3	0,397	
4	6,820	
5	12,205	N^h
6	11,168	

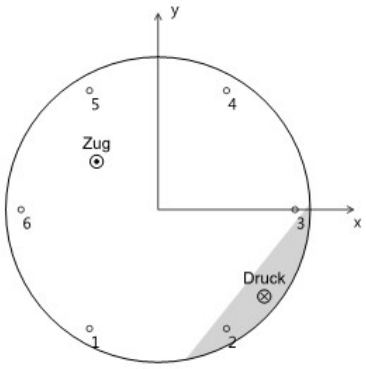
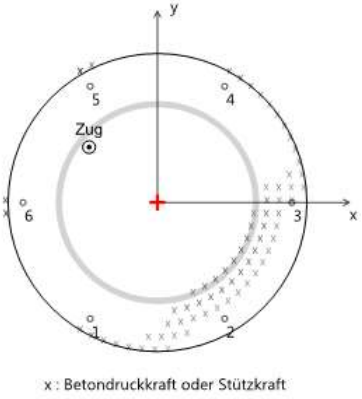


Bild 4.7 Berechnete Ankerzugkraft-Verteilung mit M12 und biegestarrer Ankerplatte [2]

Ankerzugkräfte bei elastischer Ankerplatte t_{fix} = 13 mm
Ankerfederkonstante Cg = 116,5 kN/mm.

Anker-Nr.	Normalkraft	
1	4,381	
2	0,132	
3	0,000	
4	8,770	
5	21,033	N^h
6	18,701	



x : Betondruckkraft oder Stützkraft

Bild 4.8 Ermittelte Ankerzugkraft-Verteilung mit M12 und elastischer Ankerplatte (t_{fix} =13 mm) [2]

Kombiversagen (durch Herausziehen und Betonausbruch)

$N_{Rk,p}=N^0_{Rk,p}\cdot\psi_{A,Np}\cdot\psi_{s,Np}\cdot\psi_{g,Np}\cdot\psi_{ec,Np}\cdot\psi_{re,Np}$ $N^0_{Rk,p}=\pi\cdot d\cdot l_b\cdot\tau_{Rk}\cdot\psi_c$ [N] $\psi_{A,Np}=A_{p,N}/A^0_{p,N}$ $N_{Rd,Np}=N_{Rk,Np}/\gamma_{Mp}$

$s_{cr,Np}=20\cdot d\cdot(\tau_{Rk,ucr}/7.5)^{0.5}\le 3\cdot l_b$ $\psi_{g,Np}=\psi^0_{g,Np}-(s_m/s_{cr,Np})^{0.5}\cdot(\psi^0_{g,Np}-1)\ge 1.0$

l_b = Verbundlänge, h_{ef} = Effektive Verankerungstiefe. Grundkennwerte für den Nachweis des Kombiversagens:

τ_{Rk} [N/mm²]	$\tau_{Rk,ucr}$ [N/mm²]	ψ_c	d [mm]	h_{ef} [mm]	$s_{cr,Np}$ [mm]	$c_{cr,Np}$ [mm]	l_b [mm]	k	$f_{ck,cube}$ [N/mm²]	γ_{Mp}
5,5	12,0	1,00	12,0	139,0	303,6	151,8	139,0	2,3	25,0	1,80

Alle zugbeanspruchten Anker (1, 2, 4, 5, 6) sind in einer Gruppe ($s\le s_{cr,Np}$).

$N^0_{Rk,p}$ [kN]	$A_{p,N}$ [mm²]	$A^0_{p,N}$ [mm²]	$\psi_{A,Np}$	$\psi_{s,Np}$	h_{ef} [mm]	$s_{cr,Np}$ [mm]	$c_{cr,Np}$ [mm]	l_b [mm]	c_{-x} [mm]	c_{+x} [mm]	c_{-y} [mm]	c_{+y} [mm]
28,821	416721	92160	4,522	1,000	139,0	303,6	151,8	139,0	-	-	-	-

$\psi^0_{g,Np}$	s_m [mm]	$\psi_{g,Np}$	$\psi_{re,Np}$	$e_{Np,x}$ [mm]	$e_{Np,y}$ [mm]	$\psi_{ec,Np,x}$	$\psi_{ec,Np,y}$	$\psi_{ec,Np}$	$N_{Rk,Np}$ [kN]	$N_{Rd,Np}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,p}$
1,816	309,5	1,000	1,000	83,3	111,5	0,646	0,576	0,372	48,505	26,947	53,016	**1,967**

Kombiversagen auf Einzeldübel (Zusätzlicher Nachweis bei elastischer Ankerplatte analog zu ETAG 001 Anhang C Gl. (5.2f))

$N^0_{Rk,ep}=N_{Rk,Np}/\psi_{ec,Np}$ $N_{Rk,ep}=N^0_{Rk,ep}/n$ $N_{Rd,ep}=N_{Rk,ep}/\gamma_{Mp}$ $\gamma_{Mp}=1{,}80$

Anker-Nr.	$N_{Rk,Np}$ [kN]	$\psi_{ec,Np}$	$N^0_{Rk,ep}$ [kN]	$N_{Rk,ep}$ [kN]	$N_{Rd,ep}$ [kN]	N_{Sd} [kN]	$\beta_{N,ep}$
5	48,505	0,372	130,320	26,064	14,480	21,033	**1,453**

Tafel.4.4 Berechnung des Gruppen-Widerstandes beim Kombiversagen bei elastischer Ankerplatte [2]

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Bemessung von Befestigungen mit Ankerplatten ist in FprEN 1992-4 [1] allgemein geregelt. Dazu entstehen bei der Anwendung diverse Fragen. Diese Fragen wurden im vorliegenden Beitrag mit Bemessungsbeispielen untersucht und diskutiert. Die Untersuchungen ergeben die folgenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

Die Rechenannahme der linearen Dehnungsverteilung entlang der Ankerplatte (Balkentheorie) in [1] Abschnitt 6.2.1 (1) für die Berechnung der Ankerzugkraft-Verteilung ist nicht allgemein verwendbar, weil eine unrealistische Ankerplattendicke benötigt wird, um eine äquivalente Ankerzugkraft-Verteilung wie aus der Balkentheorie zu erreichen. Bei normalen Ankerplattendicken kann die reale höchste Ankerzugkraft viel höher sein als die aus der Balkentheorie. Dies liegt eindeutig auf der unsicheren Seite. Diese Ergebnisse stimmen mit dem Hinweis von ACI 355 [15] überein.

Die Rechenannahme der Balkentheorie in [1] Abschnitt 6.2.1 (1) steht mit der Elastizitätstheorie in [1] Abschnitt 6.1 (5) in Widerspruch, weil dabei die Verformungen von Ankerplatten und Ankern sowie ihre Kompatibilität nicht berücksichtigt sind.

Die Abstützeffekte können mit der Balkentheorie nicht erfasst werden. Das elastische Ankerplatten-modell berücksichtigt die Abstützkräfte an der Ankerplatte.

Die Steifigkeitsbedingung in [1] Abschnitt 6.2.1 (2) ist technisch fraglich und zurzeit nicht mit ETA konform anwendbar, weil die Biegeverformungen der Ankerplatte und die axiale Ankerverschiebung nur unter ihrer Verformungs-Kompatibilität ermittelt werden können und dafür die Ankersteifigkeit unter der Gebrauchslast benötigt wird. Diese Ankersteifigkeit wird zurzeit in den ETAs nicht angegeben.

Aus den o. g. Gründen kann eine ausreichend steife bzw. biegestarre Ankerplatte nach [1] Abschnitt 6.2.1 (2) nicht nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass bei der Bemessung die elastischen Ankerplatten-Biegeverformungen berücksichtigt werden müssen. Dies ist aber zurzeit nach [1] nicht möglich, weil die für die Berechnung benötigte Ankersteifigkeit nicht spezifiziert ist. Zudem ist das Bemessungsmodell in [1] für die Ankerwiderstände nicht für die elastischen Ankerplatten geeignet [12].

Die o. g. Situation zeigt, dass die Reglungen zu den Ankerplatten in [1] widersprüchlich sind und nicht in Praxis umgesetzt werden können. Diese Situation wird dazu führen, dass keine Steifigkeits-Bedingung für die Ankerplatten nach [1] in die Bemessungspraxis eingeführt werden kann und die

Ankerplattendicke wie bisher nach Spannungsbedingung bestimmt wird. Dadurch bestehen die Sicherheitslücken in der Praxis der Ankerbemessung. Um diese Sicherheitslücken zu schließen, sind folgende Maßnahmen erforderlich:
-Ergänzung der Ankersteifigkeit unter der Gebrauchslast in der Ankerspezifikation ETA, wie z.B. analog zu ACI 355.2 [16]
-Ergänzung zur Berechnung der Anker-Widerstände für elastische Ankerplatten in [1]
Damit können die Ankerzugkraft-Verteilung mit der Elastizitätstheorie berechnet und die Bemessung von Befestigungen allgemein mit elastischen Ankerplatten durchgeführt werden.

6. Danksagung

Die Forschung an elastischen Ankerplatten wurde vom Land Baden-Württemberg mit Innovationsgutschein B Hightech 2015 gefördert. An dieser Stelle bedanken wir uns ganz herzlich!

Literatur

[1] Draft FprEN 1992-4 Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 4 Design of fastenings for use in concrete, CEN/TC 250 N 1454, 2016-03-17
[2] Dr. Li Anchor Profi GmbH: Herstellerunabhängige Anker-Bemessungssoftware *Anchor Profi* 3.1.0, Mai 2017
[3] ETAG 001, Annex C: DESIGN METHODS FOR ANCHORAGES, EOTA, 1040 Brussels, Amended October 2001
[4] EOTA TR029 Design of Bonded Anchors, Edition June 2007, EOTA, 1040 Brussels, Amended September 2010
[5] Technical specification CEN/TS 1992-4: Design of Fastenings for Use in Concrete, European Committee for Standardization, 2009
[6] fib bulletin 58: Design of anchorages in concrete, ISSN 1562-3610, July 2011
[7] Fichtner, S.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Gruppenbefestigungen unter Berücksichtigung der Ankerplattendicke und einer Mörtelschicht, Dissertation Universität Stuttgart 2011
[8] Li, L.: Required Thickness of Flexurally Rigid Baseplate for Anchor Fastenings, proceedings of fib Symposium Maastricht 2017, High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, DOI 10.1007/978-3-319-59471-2 109, © Springer International Publishing AG 2018
[9] Li, L.: Erforderliche Dicke für die biegesteife Ankerplatte, Stellungnahme zu CEN/TC 250 N 1454, Abschnitt 6.2.1 Tension loads, an DIN, NA 005-07-01-01 AK, March 2016
[10] Schneider, H.: Zum Einfluss der Ankerplattensteifigkeit auf die Ermittlung der Dübelkräfte bei Mehrfachbefestigungen, August 1999 (nicht veröffentlicht)
[11] Schneider H.: Ich glaube mit der Annahme, dass man die Ankerplatten nur ausreichend steif machen muss, um die postulierte lineare Pressungsverteilung (… diese Annahme hat im Übrigen nicht im Entferntesten etwas mit „Elastizitätstheorie“ zu tun!) zu bekommen, wird man keinen Erfolg haben. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Referat 45 Bautechnik, Bauökologie, Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart, E-Mail 05 Juni 2014 (nicht veröffentlicht)
[12] DRAFT MINUTES of *fib* TG 2.9 meeting “Fastenings to structural concrete and masonry” (formerly SAG 4) TU Dresden (Dresden, Germany) 26-27 October 2015 (nicht veröffentlicht)
[13] FMPA Stuttgart: Bericht über Belastungsversuche an einbetonierten Kopfbolzengruppen, Bericht II.4-14 151, 16. Mai 1983 (nicht veröffentlicht)
[14] ACI 355.3R-11: Guide for Design of Anchorage to Concrete: Examples Using ACI 318 Appendix D, ISBN 978-0-87031-425-4, ACI May 2011
[15] ACI 355: Seminar “Anchorage to Concrete”, page 163, Email Annex of Ronald A. Cook, Ph.D., P.E., F.ACI, F. ASCE, F.SEI, Professor Emeritus, Department of Civil Engineering University of Florida, 06 April 2017
[16] ACI 355.2: Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete and Commentary, ISBN 978-0-87031-247-2, ACI 355.2-07