

Stahlbetonstütze B5+

Stützenbemessung mit SAS 670 nach dem allgemeinen Verfahren

Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeines Verfahren	4
2.	Arbeitslinie des hochfesten Stahles SAS 670/800	4
3.	Ermittlung der Umlagerungen aus Kriechen und Schwinden	5
4.	Modifikation der Grenzdehnungen im GZT	6
5.	Modifikation der Betonarbeitslinie für die Bemessung	6
6.	Ermittlung der Verformung	7
7.	Einfluss des Beton E-Modules	7
8.	Unsicherheiten des Bauablaufes	8
9.	Bemessungszeitpunkte	8
10.	Bemessung und Tragfähigkeit	9
11.	Gesamtablauf	9
12.	Brandschutznachweis	10
13.	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	11
14.	Anwendungsgrenzen	12
15.	Umlagerung für Kriechen und Schwinden am Querschnitt mit Programm B3 nachvollziehen	13
16.	Parameterstudien	15
	Vergleich mit Betonstahl B500	16
	Vergleich Berücksichtigung von Kriechen bei der Ermittlung der Verformung	16
	Vergleich mit Ergebnissen nach dem Nennkrümmungsverfahren	16
	Variation Lastabstufung	16
	Variation Betonklassen	16
	Variation Kriechen und Schwinden	17
	Variation E-Modul des Betons	17
	Variation Bauablauf	17
	Maßgebender Bemessungszeitpunkt	18
	Maximale und minimale Parameterkombination	18
17.	Vergleichsrechnungen	18
18.	Literatur	19

► [Handbuch B5+](#)

Vorbemerkung und Anwendung zu SAS 670

Das Stahlwerk Annahütte produziert seit 1999 einen hochfesten Gewindestahl der Güte SAS 670/800, der ursprünglich für die Geotechnik entwickelt, inzwischen aber erfolgreich auch bei einer Reihe von Hochhausprojekten in Deutschland (Frankfurt, Berlin und Hamburg), Polen (Warschau) und den USA (New York) bei hochbelasteten Stützen eingesetzt wurde [1].



Bild 1: Stützenbewehrung mit SAS 670

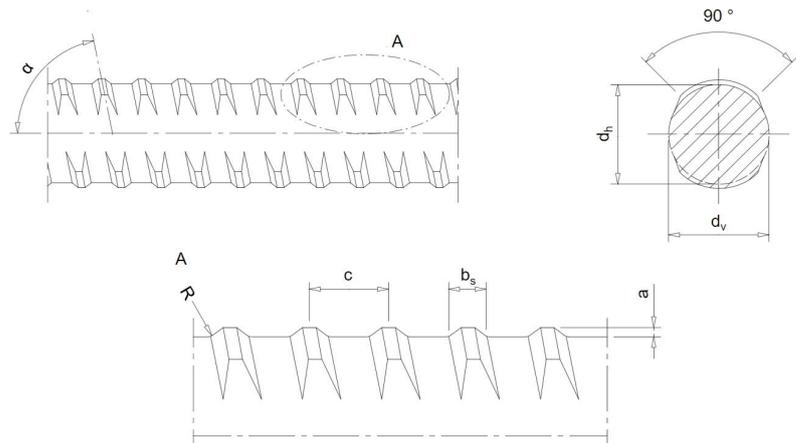


Bild 2: Stabstahl SAS 670



Bild 3: Hochhaus Omniturm, Frankfurt



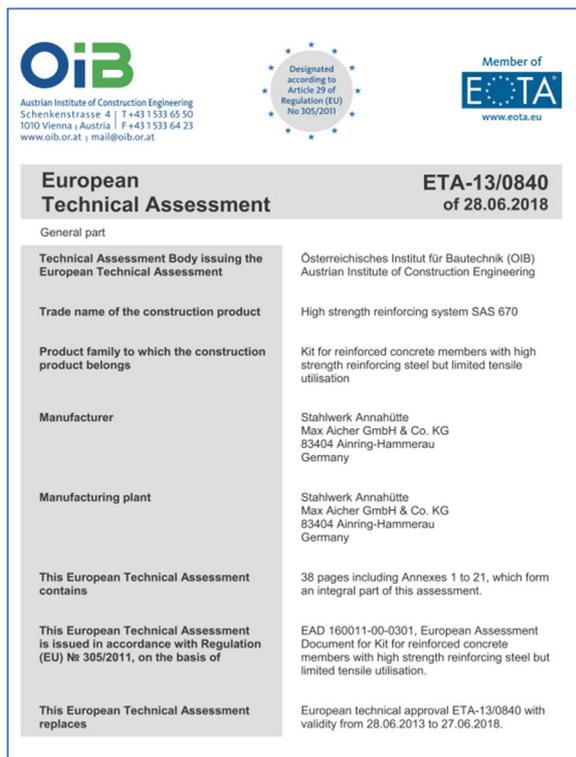
Bild 4: Hochhaus Park Avenue, New York

Verglichen mit normalem Betonstahl B500 ermöglicht dieser Stahl bei gleichem Stützenquerschnitt erhebliche Traglaststeigerungen bzw. wird bei gleicher Traglast erheblich weniger Stahl benötigt. Dadurch lassen sich Querschnitte realisieren, bei denen der normale Betonstahl an seine Grenzen stößt oder aber die Stützen

lassen sich mit kleineren Querschnitten ausführen und somit die Nutzfläche des Gebäudes vergrößern. Mit hochfestem Stahl bewehrte Hochhausstützen erweisen sich damit in vielen Fällen als eine preiswertere Alternative zu den Verbundstützen.

Die Anwendung in Deutschland erfolgte zunächst über bauaufsichtliche Zustimmungen im Einzelfall. Dafür wurden vor ca. 9 Jahren ein Verfahren und ein Bemessungstool [2] entwickelt, die eine rechnerische Ausnutzung der hohen Stahlfestigkeiten erlauben. Diese wurden in [3] überprüft und bestätigt.

Das Erscheinen der europäischen Zulassung ETA-13/0840, die in einer überarbeiteten Fassung auch als "European Technical Assessment" vorliegt [4] und die Erteilung einer Bauartgenehmigung durch das [DIBt](#) [5] ermöglichen nunmehr unter bestimmten Bedingungen (siehe [Kapitel 14 Anwendungsgrenzen](#)) eine Anwendung des hochfesten Stahles SAS 670/800 in Deutschland ohne bauaufsichtliche Zustimmung im Einzelfall.



OiB
Austrian Institute of Construction Engineering
Schenkenstrasse 4 | T +43 1 533 65 50
1010 Vienna | Austria | F +43 1 533 64 23
www.oib.or.at | mail@oib.or.at

Designated according to Article 29 of Regulation (EU) No 305/2011

Member of **ETA**
www.eta.eu

European Technical Assessment **ETA-13/0840**
of 28.06.2018

General part

Technical Assessment Body issuing the European Technical Assessment	Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB) Austrian Institute of Construction Engineering
Trade name of the construction product	High strength reinforcing system SAS 670
Product family to which the construction product belongs	Kit for reinforced concrete members with high strength reinforcing steel but limited tensile utilisation
Manufacturer	Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG 83404 Ainning-Hammerau Germany
Manufacturing plant	Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG 83404 Ainning-Hammerau Germany
This European Technical Assessment contains	38 pages including Annexes 1 to 21, which form an integral part of this assessment.
This European Technical Assessment is issued in accordance with Regulation (EU) No 305/2011, on the basis of	EAD 160011-00-0301, European Assessment Document for Kit for reinforced concrete members with high strength reinforcing steel but limited tensile utilisation.
This European Technical Assessment replaces	European technical approval ETA-13/0840 with validity from 28.06.2013 to 27.06.2018.

Bild 5: ETA-13/0840 Deckblatt



Deutsches Institut für Bautechnik **DIBt**

Zulassungstitel für Bauprodukte und Bauteile
Bauteilbesitzes Präfix
Eine vom Bund und den Ländern
gemeinsam getragene Anstalt des öffentlichen Rechts
Mitglied der EOTA, der UEAtc und der WFTAG

Datum: 15.05.2019 Geschäftszahlen: I 24-1.1-1-2019

Allgemeine Bauartgenehmigung

Nummer:
Z-1.1-285

Geltungsdauer
vom: 15. Mai 2019
bis: 15. Mai 2024

Antragsteller:
STAHLWERK ANNAHÜTTE
Max-Aicher GmbH & Co. KG
Max-Aicher-Allee 1+2
83404 Ainning - Hammerau

Gegenstand dieses Beschlides:
Stahlbetonbauteile unter Verwendung des hochfesten Bewehrungssystems SAS 670/800

Der oben genannte Regelungsgegenstand wird hiermit allgemein bauaufsichtlich genehmigt.
Dieser Bescheid umfasst vier Seiten.

DIBt

DIBt | Kolonnenstraße 30 B | D-10629 Berlin | Tel.: +49 30 78730-0 | Fax: +49 30 78730-320 | E-Mail: dibt@dibt.de | www.dibt.de

Bild 6: Deckblatt zu Z-1.1-285

Die Entwicklung eines Bemessungsmoduls für das FRILO Stützenprogramm B5+ erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Stahlwerk Annahütte, der Ed. Züblin AG Zentrale Technik [9] sowie dem Ingenieurbüro von Prof. Graubner.

Schon mit dem Release R-2019-2 war in B5+ eine Stützenbemessung mit der hochfesten Bewehrung SAS 670 nach dem [Nennkrümmungsverfahren](#) möglich [10].

Ab dem Release R-2022-1 ist nun mit der [Zusatzoption B5-SAS](#) auch das [allgemeine nichtlineare Verfahren](#) implementiert, auf das in diesem Dokument detailliert Bezug genommen wird.

1. Allgemeines Verfahren

Die Bemessung oder der Nachweis der Tragfähigkeit erfolgt unter Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung und der nichtlinearen Betonarbeitslinie. Kriechen kann durch eine Streckung der Betonarbeitslinie oder durch rechnerische Ermittlung einer Kriechausmitte berücksichtigt werden.

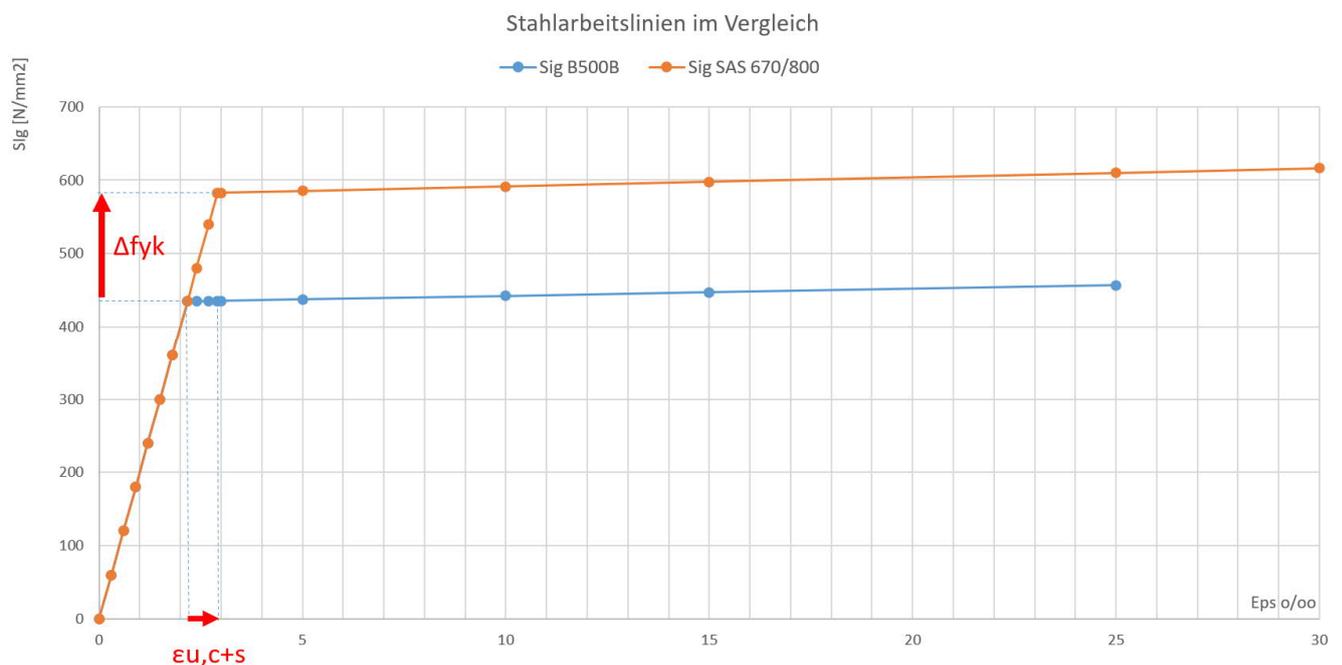
Durch die gegenüber dem Nennkrümmungsverfahren wirklichkeitsnähere Nachweisführung ergeben sich in der Regel günstigere Ergebnisse (geringere Bewehrung bzw. höhere Traglast).

Außerdem entfallen die Einschränkungen des Nennkrümmungsverfahrens bei hochfestem Beton und hochfestem Stahl, wo verfahrensbedingt eine höhere Bewehrung als mit normalen Stahl B500 erforderlich werden kann.

2. Arbeitslinie des hochfesten Stahles SAS 670/800

Da nach EN 1992-1-1 die Bruchstauchung zentrisch beanspruchter Stahlbetondruckglieder auf ϵ_{c2} begrenzt ist und auch NA in NCI zu 6.1(3) für Normalbeton maximal $\epsilon_{c2} = 0,0022$ erlaubt, ist eine Ausnutzung der hohen Stahlfestigkeit allein damit nicht möglich. Nach ETA-13/0840 kann bei Nachweis entsprechender Kriech- und Schwindumlagerungen die Bruchstauchung bis maximal zur Fließgrenze des Stahles erhöht werden.

Damit können gegenüber dem normalen Betonstahl die erforderlichen Bewehrungsmengen erheblich reduziert bzw. erheblich höhere Traglasten realisiert werden.



3. Ermittlung der Umlagerungen aus Kriechen und Schwinden

Die Umlagerungsdehnungen werden nach dem in [2] beschriebenen Verfahren von Trost ermittelt. In die Umlagerungsbeiwerte nach Trost gehen Kriechzahl, Schwindmaß und Alterungsbeiwert ein. Der Alterungsbeiwert als ein Maß für die Völligkeit der Kriechfunktion kann nach [3] mit $\rho = 0,8$ hinreichend genau angenommen werden.

Eine bei Stützen mit normalen Betonstahl B500 übliche Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden mit der Kriechzahl $\varphi(t_0, t)$ und einem Schwindmaß $\epsilon_{cs}(t_0, t)$ für einen pauschalen Belastungszeitpunkt t_0 bis zum Nachweiszeitpunkt t nach EN 1992-1-1, Anhang B kann bei einer allmählichen Eintragung der ständigen Lasten z.B. im Hochhausbau zu einer Überschätzung der Umlagerungen führen. Durch die Berücksichtigung der Lastgeschichte kann das tatsächliche Verhalten wesentlich genauer erfasst werden, nach [3] ergeben sich mit 5 - 10 Laststufen unter üblichen Randbedingungen hinreichend genaue Ergebnisse.

Der Zeitabschnitt von der letzten Laststufe bis zum Nutzungsbeginn wird im Programm Ausbauphase bezeichnet. Bis zum Bemessungszeitpunkt Bauende $t = t_B$ kommen keine weiteren kriecherzeugenden Lasten hinzu. Von der Länge der Ausbauphase hängt aber die Größe der Kriechumlagerungen bis zum Bemessungszeitpunkt ab.

Für den Bemessungszeitpunkt $t = t_{\infty}$ wird außerdem der quasi-ständige Anteil der veränderlichen Last bei der Ermittlung der Kriechumlagerungen berücksichtigt.

Ein weiterer Parameter, der das Kriechen und Schwinden beeinflusst, ist die Zementart, die vom Nutzer einzugeben ist. Je nachdem, welcher Bemessungszeitpunkt maßgebend ist, kann ein bestimmter Zement das Bemessungsergebnis günstig oder ungünstig beeinflussen. Gleiches gilt für die Luftfeuchte in der Bauphase.

Für jede Laststufe wird für jeden Belastungsabschnitt, in dem diese Last wirkt, eine Teilkriechzahl ermittelt, außerdem für jeden Belastungsabschnitt ein Teilschwindmaß. Der Schwindanteil $\epsilon_{sh}(t_s, t_1)$ vom Beginn des Kriechens (Annahme $t_s = 3d$) bis zum Eintrag der ersten Laststufe t_1 wird dabei nicht berücksichtigt, weil noch keine Last vorhanden ist, die umverteilt werden kann und die sich ergebenden Zwangsspannungen durch Mikrorissbildung abgebaut werden.

Die Umlagerungsdehnungen $\epsilon_{u,c}$ infolge Kriechen und $\epsilon_{u,s}$ infolge Schwinden bis zu einem betrachteten Zeitpunkt ergeben sich mit einer entsprechenden Berücksichtigung der bis dahin wirksamen Teilkriechzahlen und Teilschwindmaße.

In [1] wird die Ermittlung der Umlagerungsdehnungen exemplarisch dargestellt. Dabei mussten einige für eine Handrechnung vereinfachende Annahmen getroffen werden, es wird nur ein Bemessungszeitpunkt betrachtet und auf eine Berücksichtigung der Streuungen von Kriechen und Schwinden wird verzichtet. Ebenso entfällt für die anfangs unbekannte Bewehrung eine iterative Ermittlung. Abweichend wird dort das Schwinden ab der Betonage berücksichtigt, was zu höheren Umlagerungsdehnungen infolge Schwindens führt.

Nichtlineares Kriechen

Überschreiten die Betonspannungen aus ständigen Lasten den Wert $0,45 \cdot f_{ck}$, wird automatisch nichtlineares Kriechen entsprechend EC2 Gl. 3.7 berücksichtigt.

Streuungen

Während die Kriech- und Schwindumlagerungen für die Biegetragfähigkeit günstig wirken, ist ihre Wirkung bei den Verformungen und damit für die Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung ungünstig. Wegen der großen Streuungen von Kriechen und Schwinden (nach EC2 30 %) sollte ein entsprechender Variationskoeffizient berücksichtigt werden.

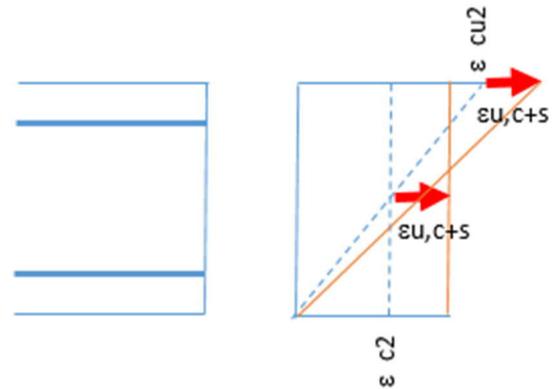
Beim konservativen Gesamtbemessungskonzept in [2] wird für die Ermittlung der Tragfähigkeit $v=1-s$ und für die Verformung $v=1+s$ berücksichtigt, nach [3] ist die Annahme einer Streuung von 15% ($s=0,15$) ausreichend. In B5+ wird abweichend zu [2] und in besserer Übereinstimmung mit dem realen Verhalten für Tragfähigkeit und Verformung der gleiche Koeffizient verwendet. Dafür werden aber je Bemessungszeitpunkt zwei Bemessungssituationen untersucht, eine mit $v=1-s$, die andere mit $v=1+s$.

Wegen des damit gegenüber [2] weniger konservativen Gesamtbemessungskonzeptes wird in [1] mit $s = 0,3$ die Berücksichtigung einer höheren Streuung entsprechend den Angaben in EC2 empfohlen und im Programm als Vorgabewert verwendet.

4. Modifikation der Grenzdehnungen im GZT

Die Grenzdehnungen nach EN 1992-1-1 Bild 6.1 werden um die Umlagerungsdehnungen $\epsilon_{u,c+s}$ erhöht, dabei wird der Wert für zentrischen Druck auf die Fließdehnung des Stahles begrenzt.

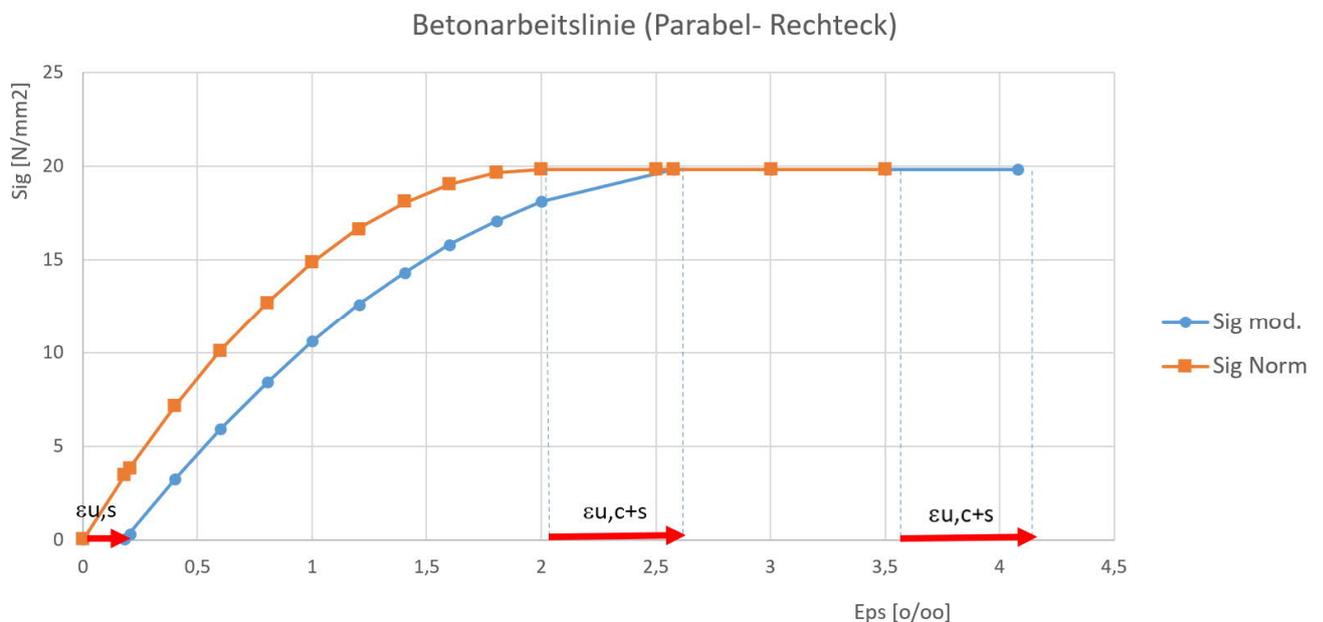
Es gilt $\epsilon_{c2} + \epsilon_{u,c+s} < \epsilon_{yd} = 670 / (1.15 \cdot 20000) = 2.91 \text{ ‰}$, darüber hinausgehende Umlagerungsdehnungen aus Kriechen und Schwinden werden gekappt.



5. Modifikation der Betonarbeitslinie für die Bemessung

Nach [2] wird zur Ermittlung der Tragfähigkeit eine mit den Umlagerungsdehnungen modifizierte Betonarbeitslinie verwendet.

Die Streckung und seitliche Verschiebung der Betonarbeitslinie führt bei der Tragfähigkeitsermittlung durch die Reduzierung der inneren Kräfte des Betons zu einem die Tragfähigkeit mindernden Einfluss.



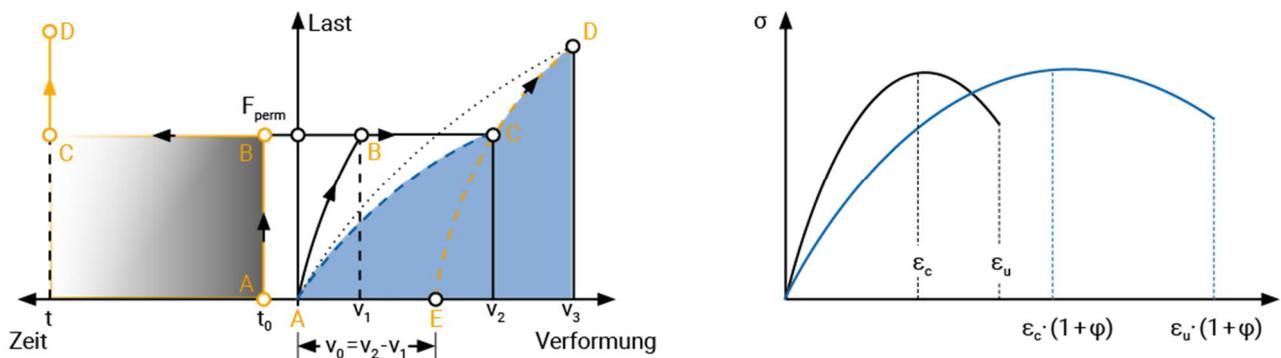
6. Ermittlung der Verformung

Die Verformung wird im Programm B5+ beim allgemeinen Verfahren sowohl geometrisch (Theorie 2. Ordnung) als auch physikalisch nichtlinear (Arbeitslinie Beton und Zustand II, ggf. mit Zugversteifung) ermittelt.

Dafür werden auf Querschnittsebene für jedes Stabelement Steifigkeiten ermittelt, durch Integration über daraus ermittelten Elementkrümmungen ergibt sich die Verformung.

Nach EN 1992-1-1 Abschnitt 5.8.6 wird die Betonarbeitslinie zur Verformungsermittlung mit dem Parameter nach NCI zu 5.8.6 (3) verwendet ($f_c = f_{cm}/\gamma_c$; $E_{cd} = E_{cm}/\gamma_{cE}$).

Kriechen kann entweder über den Ansatz einer Vorverformung infolge Kriechens (Bild links: Mehrstufenmodell nach *Westerberg*) oder über eine mit φ_{eff} verzerrte Betonarbeitslinie (Bild rechts) nach EN 1992-1-1 Abschnitt 5.8.6 (4) berücksichtigt werden.



Beim Mehrstufenmodell wird die Kriechverformung für quasi-ständige Lasten mit einer um $(1 + \varphi(t))$ verzerrten Betonarbeitslinie ermittelt, wobei sich $\varphi(t)$ entsprechend [2] aus den Umlagerungsdehnungen infolge Kriechen zu $\varphi(t, t_0) = \epsilon_{u,c}(t)/\epsilon_s(t_0)$ ergibt. Da es sich um einen die Verformung vergrößernden Parameter handelt, wird hier der ungekappte Wert der Umlagerungsdehnung infolge Kriechen $\epsilon_{u,c}(t)$ verwendet. (siehe [Kapitel 4](#))

Beim Vorgehen nach 5.8.6 (4) wird die effektive Kriechzahl $\varphi_{eff} = \varphi(t, t_0) \cdot M_{oEqB}/M_{oEd}$ entsprechend 5.8.4 ermittelt.

Schwinden spielt für die Verformungen keine Rolle, da infolge symmetrischer Bewehrungsanordnung keine zusätzlichen Krümmungen entstehen. Wegen des prinzipiell möglichen hohen Bewehrungsgehaltes erfolgt die Bestimmung der inneren Schnittkräfte des Betons mit dem Nettoquerschnitt.

7. Einfluss des Beton E-Modules

Der E-Modul des Betons ist ebenfalls ein sensibler Parameter, der sowohl die Lastumlagerung vom Beton auf den Stahl als auch die Verformung beeinflusst. Ein hoher Wert des E-Modules führt zu geringeren Umlagerungen aus Kriechen und Schwinden, aber kleineren Verformungen, ein geringerer E-Modul zu größeren Umlagerungen bei größeren Verformungen. Ein maßgebender Fall ist dabei schwer abzuschätzen. Deshalb ist eine möglichst genaue Berücksichtigung des E-Modules bei der Stützenbemessung erforderlich.

Sind die Zuschlagstoffe bei der Planung nicht bekannt, sollte berücksichtigt werden, dass der E-Modul gegenüber den in EC2 Tabelle 3.1 angegebenen Werten im Bereich von -30% bis +20% schwanken kann. In diesem Fall wird empfohlen, jeweils eine Variante mit dem Minimum und Maximum des E-Modules zu untersuchen.

Bei Vergleichsrechnungen mit gedrungenen Stützen wurden Abweichungen bei der erforderlichen Bewehrung im Bereich von -2,5% (MinEcm) bis +1,5% (MaxEcm) beobachtet.

Bei schlanken verformungssensitiven Stützen betragen die Abweichungen +1% (MinEcm) bzw. +0,5% (MaxEcm).

(siehe [Kapitel 16](#)).

8. Unsicherheiten des Bauablaufes

Früheres oder späteres Bauende t_B

Hierbei geht es um die kürzere oder längere Dauer der einzelnen Laststufen bei gleicher Höhe der Lastwerte. Durch eine verkürzte Ausbauphase oder einen insgesamt schnelleren Bauablauf kann es zu einem früheren Nutzungsbeginn kommen. Das führt bei $t = t_B$ durch geringere Umlagerungen zu einer Erhöhung der erforderlichen Bewehrung und auch bei $t = \infty$ zu höheren Kriechzahlen und damit zu höheren Verformungen und Beanspruchungen. Für die beobachteten Varianten lag die Annahme eines früheren Nutzungsbeginnes auf der sicheren Seite (siehe [Kapitel 16](#)).

Ein späterer Nutzungsbeginn wirkt in umgekehrter Weise.

Ruhende Baustelle

Erfolgt der Eintrag wesentlicher Anteile der Laststufen später, kann dies zu einer Reduzierung der Kriechumlagerungen und damit zu einer Erhöhung der erforderlichen Bewehrung führen. Bei Vergleichsrechnungen wurden Abweichungen bei der erforderlichen Bewehrung im Bereich bis +4% bei den stärker kriechenden normalfesten Betonen beobachtet. Bei den hochfesten Betonen lag die Differenz bei +1% (siehe [Kapitel 16](#)).

Da die Ergebnisse in hohem Maße von den Umlagerungen infolge Kriechen und Schwinden abhängen, ist bei größeren Zeitverschiebungen des Bauablaufes eine erneute Berechnung durch den Tragwerksplaner mit der angepassten Lastgeschichte sinnvoll und erforderlich.

9. Bemessungszeitpunkte

Zeitpunkte Nutzungsbeginn t_B und t_∞

Wegen der oben beschriebenen gegenläufigen Einflüsse von Kriechen und Schwinden für Beanspruchung und Tragfähigkeit ist der Bemessungszeitpunkt nicht wie gewöhnlich beim Beanspruchungsmaximum t_∞ , welches hier auch das Tragfähigkeitsmaximum infolge der maximalen Umlagerungsdehnungen darstellt.

Der Beginn der Nutzung ist ein weiterer signifikanter und in der Regel [2] maßgebender Bemessungszeitpunkt mit dem Minimum der Tragfähigkeit infolge der noch nicht vollständigen Ausnutzung des Stahles.

Ein möglicher Grund, dass dieser Bemessungszeitpunkt der maßgebliche ist, könnte sein, dass trotz mit der Zeit zunehmenden Schnittkräften immer noch eine durch die Zunahme der Bruchstauchungen höhere Stahlauslastung möglich ist. Außerdem sind die Verformungen für annähernd zentrisch gedrückte Pendelstützen i.d.R. gering.

Zeitpunkte $t_B \leq t < t_\infty$

Für Verformungsempfindliche Stützen kann der maßgebende Zeitpunkt theoretisch auch zwischen beiden Zeitpunkten liegen. Indikatoren dabei sind folgende Parameter:

- bei größerer Schlankheit $\lambda > 50$
- höherem Beanspruchungsgrad $\eta > 1,5$
- größere Ausmitten $e/h > 0,04$

Für solche Stützen besteht die Möglichkeit, bis zu 5 nutzerdefinierte Zeitpunkte nach Bauende zu berücksichtigen.

Zeitpunkte $t < t_B$

Außerdem können auch die Zeitpunkte der Lasteintragung der Laststufen vor Nutzungsbeginn berücksichtigt werden, um Stabilitätsversagen für frühe Zeitpunkte auszuschließen.

Diese Option steht momentan nur zur Verfügung, wenn bei der Verformungsermittlung die Berücksichtigung des Kriechens über φ_{eff} erfolgt. Bisher konnte in Vergleichsrechnungen kein Fall beobachtet werden, wo ein Zeitpunkt $t < t_B$ maßgebend wurde.

10. Bemessung und Tragfähigkeit

Die erforderliche Bewehrungsfläche wird im Rahmen einer physikalisch als auch geometrisch nichtlinearen Berechnung als Grenzwert für den Übergang zum instabilen bzw. unsicheren Tragverhalten ermittelt. Zusätzlich erfolgt für die Schnittkräfte eine Bemessung bzw. Ermittlung der Tragfähigkeit für die gewählte Anordnung der Bewehrung (doppelte Buchführung nach *Quast*). Zur Bestimmung der inneren Schnittkräfte des Betons kommt die in [Kapitel 5](#) beschriebene modifizierte Betonarbeitslinie zum Einsatz. Wegen des i.d.R. hohen Bewehrungsgehaltes wird dabei immer nur der Nettobetonquerschnitt für den Beton berücksichtigt. Es gelten die in [Kapitel 4](#) beschriebenen modifizierten Grenzdehnungen. Die Ergebnisse der Bemessung können für gegebene Schnittkräfte und Umlagerungen z.B. mit dem Programm INCA verifiziert werden ([siehe \[1\]](#)).

11. Gesamtablauf

Hinsichtlich einer normalen Stützenbemessung nach Theorie 2. Ordnung erhöht sich der Rechenaufwand erheblich, da mehrere Bemessungszeitpunkte mit jeweils zeit- und bewehrungsspezifischen Kriechumlagerungen und Kriechverformungen zu untersuchen sind, sowohl mit positiver als auch mit negativer Streuung für Kriechen und Schwinden. Das kann bei mehreren unabhängigen Einwirkungen zu einer deutlich längeren Rechenzeit führen, die sich durch die Einbeziehung weiterer nutzerdefinierter Bemessungszeitpunkte (siehe [Kapitel 9](#)) nochmals erhöht. Um die Ergebnisse der komplexen Untersuchungen bei Bedarf nachvollziehen zu können, werden je Bemessungszeitpunkt und Kriechvariante die Umlagerungsdehnungen, Verformungen, Randstauchungen, Steifigkeiten und ggf. Kriechvorverformungen je Stabelement ausgegeben. Für die maßgebenden Schnitte erfolgt am Ende des Ausgabeblockes für die Tragfähigkeit im GZT eine Zusammenfassung für jeden Bemessungszeitpunkt und Bemessungssituation.

Die erforderliche Bewehrungsfläche $A_s = 274,9 \text{ cm}^2$ in Abschnitt 1 überschreitet die eingelegte Bewehrungsfläche von $263,9 \text{ cm}^2$

Seite 16 von 20

Ergebniszusammenfassung Th. 2. O. mit e_1 (ständige/vorübergehende Bemessungssituation)

Biegebemessung (Extremwerte aus allen berechneten Zeitpunkten)

Zeitpunkt	Höhe [m]	N_d [kN]	$M_{y,d}$ [kNm]	ρ [%]	$A_{s,erf}$ [cm ²]	$A_{s,vorh}$ [cm ²]
Nutzungsbeginn - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	427.11	7.14	257.2	263.9
Nutzungsbeginn - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	394.56	7.64	274.9	263.9 !!
250 d nach NB - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	433.75	7.07	254.6	263.9
250 d nach NB - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	407.13	7.41	266.9	263.9 !!
500 d nach NB - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	435.43	7.05	253.9	263.9
500 d nach NB - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	411.68	7.34	264.4	263.9
1000 d nach NB - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	436.35	7.04	253.6	263.9
1000 d nach NB - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	417.36	7.26	261.5	263.9
1500 d nach NB - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	436.36	7.04	253.6	263.9
1500 d nach NB - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	420.06	7.23	260.2	263.9
3000 d nach NB - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	436.37	7.04	253.6	263.9
3000 d nach NB - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	421.66	7.21	259.5	263.9
unendlich - $\phi +30\%$	3.25	-18780.0	436.38	7.04	253.6	263.9
unendlich - $\phi -30\%$	3.25	-18780.0	423.50	7.19	258.7	263.9

12. Brandschutznachweis

Nach [4] verhält sich der hochfeste Stahl SAS 670/800 im Brandfall wie ein normaler Betonstahl. Die mit der Verwendung von i.d.R. großen Bewehrungsdurchmessern verbundenen großen Betondeckungen wirken sich günstig auf den Feuerwiderstand aus.

Die bei Hochhäusern geforderte Brandwiderstandsdauer ist erheblich größer als im üblichen Hochbau, je nach Nutzung und LBO kann sie zwischen R120 und R180 liegen.

Für Stahlbetonquerschnitte mit praxisüblichem Bewehrungsgehalt und Bewehrungsstäbe mit einem maximalen Durchmesser von 30 mm darf nach [11] die Bewehrung bei der thermischen Analyse vernachlässigt werden. Weiter heißt es dort: „Bei einem Stabdurchmesser von mehr als 30 mm treten signifikante Abweichungen auf, so dass eine Vernachlässigung der Bewehrung bei der thermischen Analyse nicht empfohlen wird.“

Anhand von eigenen Untersuchungen mit dem FRILO-Programm TA lässt sich erkennen, dass eine Berücksichtigung der Bewehrung zu einer größeren Durchwärmung im Inneren des Querschnittes führt, für den außen liegenden Stahl aber einen kühlenden Effekt ergeben kann.

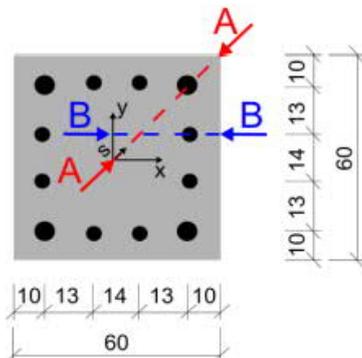
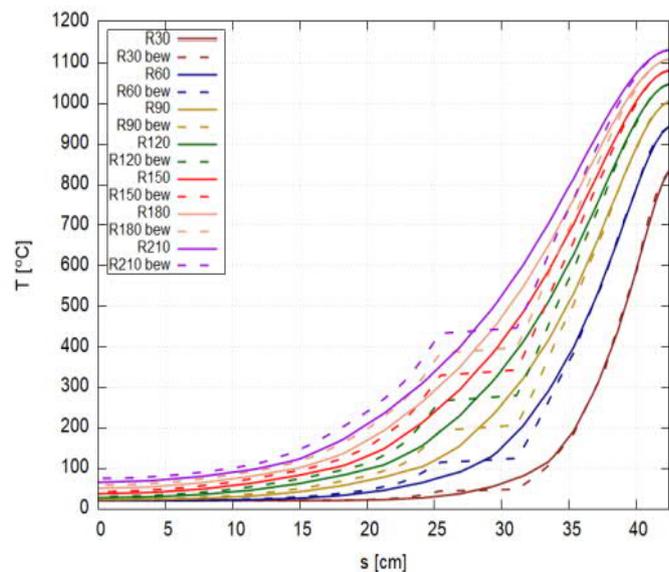
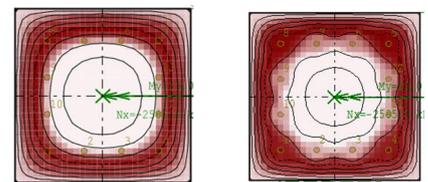


Abb.: Temperaturverlauf entlang des A-A Schnittes

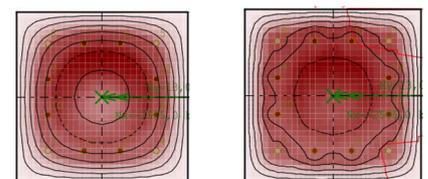


Die Ausgabegrafik des Programms B2 zeigt Spannungen im Brandfall, links ohne, rechts mit Berücksichtigung des Betonstahles. Eine dunklere Einfärbung entspricht höherer Spannung:



Bei Branddauern von 90 min ist die ermittelte Steifigkeit damit sogar etwas größer - siehe Grafik rechts.

Bei einer Branddauer von 180 min führt aber der stärkere Ausfall des Betons infolge der stärkeren Durchwärmung im Inneren des Querschnittes zu einer kleineren Steifigkeit - siehe Grafik rechts.



Daher sollte die spezifische thermische Leitfähigkeit des Betonstahles bei der thermischen Analyse berücksichtigt werden, vor allem bei Durchmessern größer 30 mm, bei Bewehrungsgraden größer 9% und einer Branddauer größer 120 min.

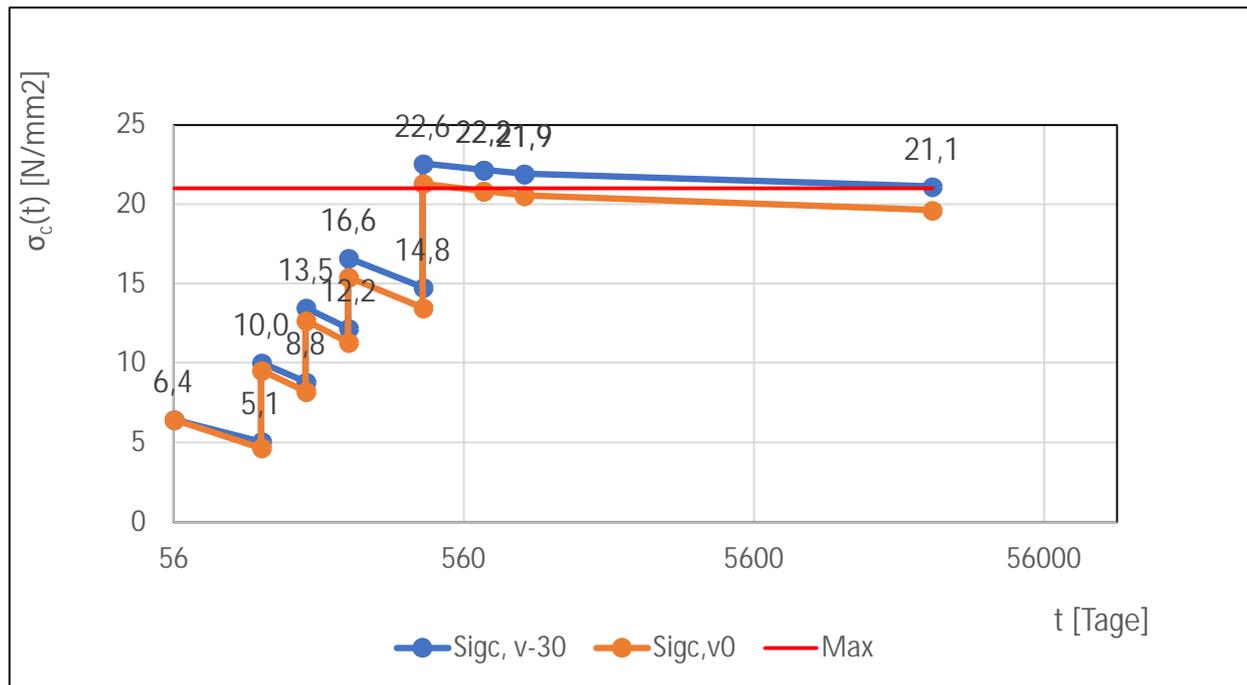
13. Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Bei Hochhäusern, die kein üblicher Hochbau sind, ist der Nachweis der Spannungen erforderlich.

Betondruckspannung charakteristisch Lastkombinationen $0,6 \cdot f_{ck}$:

Die Schnittkräfte werden unter Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung, jedoch entsprechend EN 1992-1-1 Abschnitt 5.2 (3) ohne den Ansatz von Imperfektionen ermittelt.

Optional können auch die Spannungen vor Bauende zum Zeitpunkt der Eintragung der Laststufe ermittelt werden.



Das Bild oben zeigt einen typischen Spannungsverlauf der Betonspannungen unter Berücksichtigung der Lastgeschichte mit und ohne Berücksichtigung der Streuungen bei Kriechen und Schwinden (blau und orange).

Betonstahlspannung charakteristisch Lastkombinationen $0,8 \cdot f_{yk}$:

Auf einen Nachweis der Stahlspannungen wird verzichtet, da Stauchungen von 2,68 ‰ im GZG nicht zu erwarten sind.

14. Anwendungsgrenzen

Querschnitt überdrückt und begrenzte Lastausmitte unter kriechwirksamen Beanspruchungen

Die Kriechumlagerungen nach *Trost* werden unter der Annahme von zentrischem Druck ermittelt. Um sicherzustellen, dass diese auch bei Momentenbeanspruchung ausreichend genau sind, wird in [2] gefordert, dass der Querschnitt unter kriechwirksamen Lasten überdrückt ist. Wegen den beim allgemeinen Verfahren geringeren Sicherheitsreserven wird im Programm B5+ zusätzlich die bezogene Ausmitte der kriechwirksamen Lasten begrenzt, d.h. bei Nichteinhaltung dieser Bedingung erfolgt eine Warnung im Programmausdruck.

Grenzwert: $e_{kw}/h < 0,05$ mit $e_{kw} = M_{0,perm}/N_{perm} + e_i$

Bei Nichteinhaltung dieser Bedingung erfolgt eine Warnung im Programmausdruck.

zweiachsige Beanspruchung:
$$e_{kw}/h = \sqrt{(e_y / d_y)^2 + (e_z / d_z)^2}$$

$$e_y = M_{0z,perm}/N_{perm} + e_{i,y}$$

$$e_z = M_{0y,perm}/N_{perm} + e_{i,z}$$

Art der Beanspruchung nach [4]

Statische oder überwiegend statische Lasten in Gebäuden und Ingenieurbauwerken.

Erdbeben: Anwendungsfälle, für die eine Duktilitätsklasse B ausreichend ist.

Beton [4]

C20/25 bis C80/95

Bauartgenehmigung in Deutschland [5]

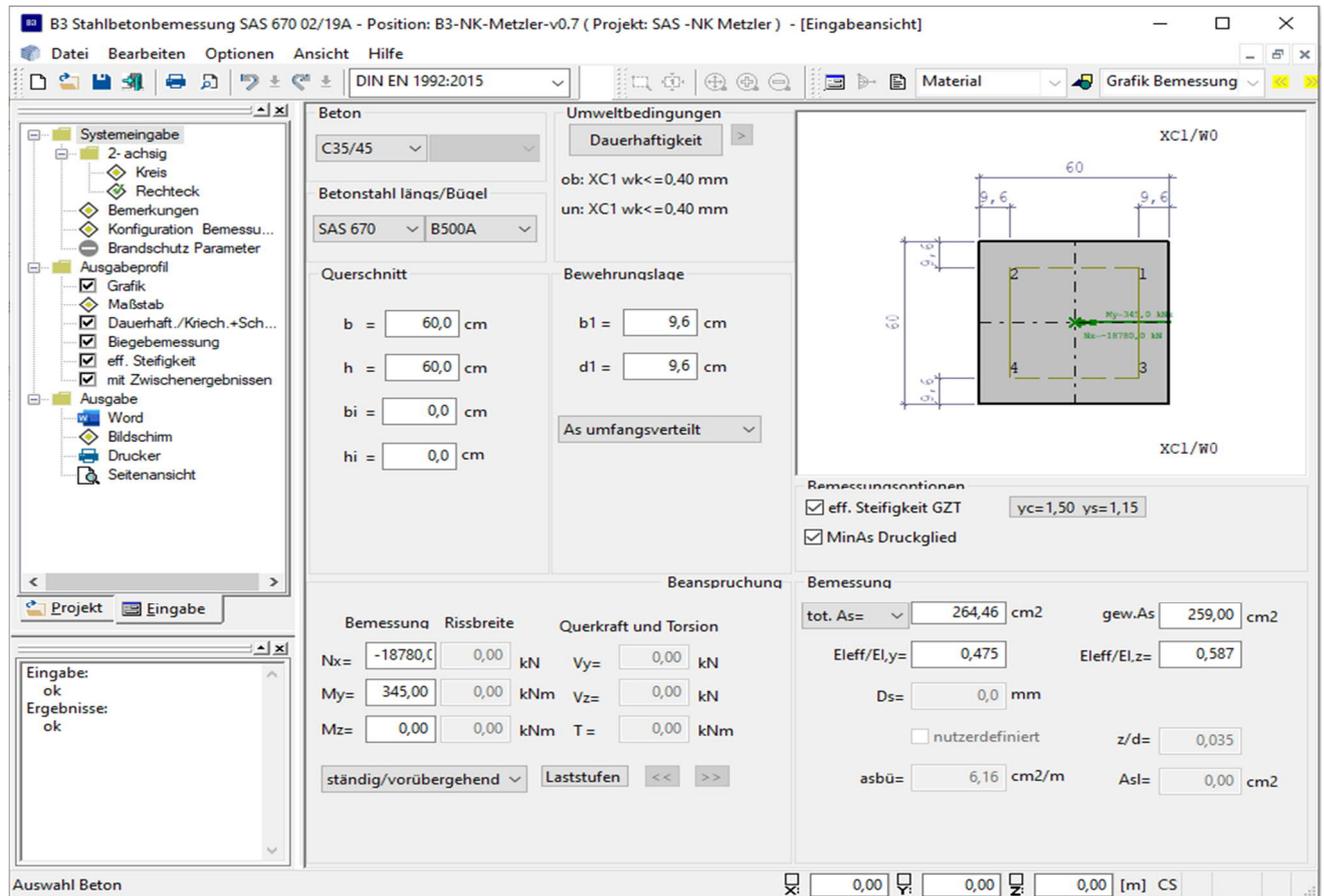
Für einen Bewehrungsgrad, der den nach DIN EN 1992-1-1/NA zulässigen Wert von 9% überschreitet, ist i.d.R. eine Zulassung im Einzelfall einzuholen.

Gleiches gilt, wenn die nach Eurocode zulässigen lichten Bewehrungsabstände als auch die infolge Dauerhaftigkeit und Verbund erforderlichen Randabstände nicht eingehalten werden. Im Programmausdruck wird darauf hingewiesen.

Anwendung in Österreich und Polen

Es gelten die Bestimmungen der ETA [4], es sind keine Einschränkungen bekannt.

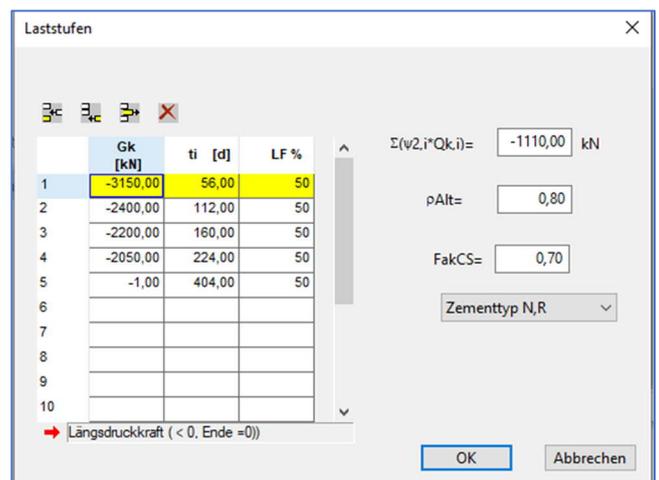
15. Umlagerung für Kriechen und Schwinden am Querschnitt mit Programm B3 nachvollziehen



Das Programm dient der Bemessung von Druckgliedern mit hochfester Bewehrung nach ETA-13/0840.

In einem speziellen Dialog können bis zu 10 Laststufen des Bauablaufes eingegeben werden.

Die Ermittlung der Umlagerungsdehnungen kann über detaillierte Zwischenergebnisse nachvollzogen werden.



Ausgabedokument mit allen Teilkriechzahlen und Teilschwindmaßen

Nr.	ti	Nxd [kN]	Myd [kNm]	Mzd [kNm]	$\epsilon_{u,c+s}$ o/oo	$\epsilon_{u,c}$ o/oo	$\epsilon_{u,s}$ o/oo	ϵ_1 o/oo	ϵ_2 o/oo	ϵ_3 o/oo	ϵ_{4s} o/oo	tot. As [cm ²]
1	tB too	-18780.0	365.88	0.00	0.665 0.945 #1	0.458 0.639	0.207 0.274	-3.19 -3.53	-3.19 -3.53	-1.72 -1.72	-1.97 -2.03	252.27 246.35

infolge Umlagerungsdehnung erhöhte Bruchstauchung bei mittigen Druck
#1: die Umlagerungsdehnung $\epsilon_{u,c+s}$ wird mit $\max(\epsilon_{u,c+s})$ gekappt

Untersuchung nichtlineares Kriechen t= tB

Laststufe i	$\sigma_{c,uc}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,cs}$ [N/mm ²]	$\sigma_c(Gk,i)$ [N/mm ²]	σ_{ceff} [N/mm ²]	k ϕ
1	-0.00	-0.00	-6.52	-6.52	1.000
2	-5.18	-1.50	-4.97	-8.64	1.000
3	-9.07	-1.74	-4.55	-11.88	1.000
4	-12.47	-1.98	-4.24	-14.73	1.000
5	-15.11	-2.34	-0.00	-15.06	1.000

$\sigma_{c,uc}$ Betonspannung nach Kriechen vor Eintragung der Laststufe i
 $\sigma_{c,cs}$ Betonspannung infolge Schwinden vor Eintragung der Laststufe i
 $\sigma_c(Gk,i)$ Betonspannung infolge Gk,i der Laststufe i

Kriechzahlen und Schwindmaße mit nichtlinearen Kriechen und Streuungsfaktor t= tB

i	$\phi(t_i,t_2)$	$\phi(t_i,t_3)$	$\phi(t_i,t_4)$	$\phi(t_i,t_5)$	$\phi(t_i,t_{oo})$
1	0.80	0.95	1.07	1.25	1.72
2		0.67	0.84	1.06	1.50
3			0.68	0.95	1.40
4				0.83	1.32
5					1.17

$\epsilon_{cs}(tE1)$ o/oo	$\epsilon_{cs}(tE2)$ o/oo	$\epsilon_{cs}(tE3)$ o/oo	$\epsilon_{cs}(tB)$ o/oo	$\epsilon_{cs}(t_{oo})$ o/oo
0.172	0.204	0.235	0.286	0.400

Beginn des Schwindens $t_s = 1d$

Umlagerungsbeiwerte nach Trost t= tB (As= 252.26 cm² Ai= 4832 cm² $\alpha = 0.307$)

i	$c_d(t_i,t_2)$	$c_d(t_i,t_3)$	$c_d(t_i,t_4)$	$c_d(t_i,t_5)$	$c_d(t_i,t_{oo})$
1	1.46	1.53	1.59	1.66	1.84
2		1.40	1.48	1.58	1.76
3			1.40	1.53	1.72
4				1.48	1.69
5					1.63

i	$c_s(t_i,t_2)$	$c_s(t_i,t_3)$	$c_s(t_i,t_4)$	$c_s(t_i,t_5)$	$c_s(t_i,t_{oo})$
1	0.84	0.81	0.79	0.76	0.70
2		0.86	0.83	0.79	0.73
3			0.86	0.81	0.74
4				0.83	0.76
5					0.78

16. Parameterstudien

In einer umfangreichen Parameterstudie wurden folgende Parameter variiert:

Querschnitt: Quadrat, Rechteck, Kreis

Schlankheit: $\lambda = \{34,6 \dots 69,3\}$

Beton: C35/45, C50/60, C80/95

Bezogene Ausmitte kriechwirksame Lasten e_{kw}/h : 0,02 ... 0,11 (ekw= Mkw/Nkw)

Bezogene Längskraft $N_{Bez} = N_{Ed}/(A_c \cdot f_{cd})$: 0,67 ... 2,63

Bewehrungsgrad: 0,05 ... 0,19

Laststufen: 2, 4, 5, 8

Kriechen und Schwinden:

Max CEM S, LF40

Min CEM R, LF70

Streuung 0%, 15%, 30%

Baublauf längere und kürzere Bauzeit, ruhende Baustelle

Beanspruchung ein- und zweiachsige Bemessung kalt, Heißbemessung

1	Pos.	QS	Lamda	fck	fyk	Nbez	e1N	ekw/h	Rho	LS	tA	tB	s	1/2 A	LK
2	Av Metzler v0	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,07	4	180	404	0	1A	4
3	Av Metzler v0-E	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,07	4	180	404	0	1A	4
4	Av Metzler v0+E	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,07	4	180	404	0	1A	4
5	Av Metzler v15	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,07	4	180	404	15	1A	4
6	Av Metzler v30	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,08	4	180	404	30	1A	4
7	Av Metzler v30-E	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,07	4	180	404	30	1A	4
8	Av Metzler v30+E	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,08	4	180	404	30	1A	4
9	Av Metzler v30 - 8LS	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,08	8	180	404	30	1A	4
10	Av Metzler v30 - 2LS	Q60	37,5	35	670	2,63	1,3	0,02	0,08	2	180	404	30	1A	4
11	Av K70 v30	K70	37,1	35	670	2,46	1,3	0,02	0,07	4	180	404	30	1A	4
12	AV Column 3	Q95	69,282	50	670	1,73	3,91	0,04	0,1	5	90	455	30	2A	4
13	AV Column 3 tRed	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	0	150	15	2A	4
14	AV Column 3 tRed cs--	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	0	150	15	2A	4
15	AV Column 3 tRed cs--E-	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,11	5	0	150	15	2A	4
16	AV Column 3 tRed cs--E+	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	0	150	15	2A	4
17	AV Column 3 tErh	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	90	1055	15	2A	4
18	AV Column 3 tErh cs++	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	90	1055	15	2A	4
19	AV Column 3 tErh cs++E-	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	90	1055	15	2A	4
20	AV Column 3 tErh cs++E+	Q95	69,3	50	670	1,73	3,9	0,04	0,10	5	90	1055	15	2A	4
21	AV Column 4	Q95	69,3	50	670	2,20	9,2	0,11	0,19	5	50	450	15	1A	8
22	AV Column 5	Q30	46,2	50	670	1,56	1,6	0,05	0,06	5	90	455	30	1A	8
23	AV Col5K	K95	45,7	50	670	1,46	1,6	0,04	0,05	5	90	455	30	1A	8
24	ET202	Q60	32,4	80	670	0,82	1,2	0,02	0,07	5	0	800	30	1A	4
25	EdgeTower1000	R100/60	41,6	80	670	1,95	1,3	0,02	0,11	5	0	800	30	1A	4
26	EdgeTower1000-E	R100/60	41,6	80	670	1,95	1,3	0,02	0,11	5	0	800	30	1A	4
27	EdgeTower1000+E	R100/60	41,6	80	670	1,95	1,3	0,02	0,12	5	0	800	30	1A	4
28	TaTu 1 - Kopfmom-1A	R45/38	34,6	50	670	0,74	2,0	0,03	0,17	5	0	250	15	1A	8
29	TaTu 1 - Kopfmom-2A	R45/38	34,6	50	670	0,70	2,2	0,05	0,18	5	0	250	15	2A	8
30	TaTu 1 - Kopfmom-2Ar	R45/38	34,6	50	670	0,72	1,7	0,04	0,17	5	0	250	15	2A	8
31	P1A	Q60	40,4	80	670	0,67	1,9	0,03	0,18	5	50	300	30	2A	4
32	P1B	Q60	40,4	80	670	0,67	1,9	0,03	0,18	5	50	300	30	2A	4

Vergleich mit Betonstahl B500

Die maximale Ausnutzung der Stahlfestigkeit von SAS 670 aller untersuchten Varianten ergab eine um 22% geringere Bewehrung (hoch- und mittig beanspruchte Stütze), bei theoretisch möglichen 25%. Die minimale beobachtete Reduktion der Bewehrung lag bei 7,2% .

Für die Beispielstütze nach [1] ergeben sich 17%, unter Einbeziehung der Streuung von Kriechen und Schwinden 12% Einsparung der erforderlichen Bewehrung.

Vergleich Berücksichtigung von Kriechen bei der Ermittlung der Verformung

Bei Stützen mit normaler Bewehrung B500B ist die Verformungsermittlung nach der Kriechbiegeline die günstigere Variante, bei der sich i.d.R. eine geringere Bewehrung ergibt.

Bei Stützen mit hochfester Bewehrung kehrt sich dieses Bild um, überwiegend ergibt sich mit der um φ_{eff} verzerrten Betonarbeitslinie eine etwas geringere Bewehrung (bis 1,8%). Das lässt sich mit der hier viel genauer, entsprechend der Lastgeschichte ermittelten Kriechzahl, begründen. Diese ist viel kleiner als die sonst pauschal mit einem Belastungsalter von 28 Tagen ermittelte Kriechzahl.

Beispielstütze in [1]: $\varphi_{\text{eff}}(t_i, t_{\infty}) = 0,577$, mit B500 $\varphi_{\text{eff}}(t_0 = 28\text{d}, t_{\infty}) = 1,14$.

Vergleich mit Ergebnissen nach dem Nennkrümmungsverfahren

Bekanntermaßen ergeben sich beim Nennkrümmungsverfahren und hochfesten Beton bei Verwendung hochfester Bewehrung unwirtschaftliche Ergebnisse, d.h. die erforderliche Bewehrung kann größer sein als bei Verwendung von B500B.

Beim allgemeinen Verfahren ergeben sich durchgehend günstigere Ergebnisse als mit normalen Betonstahl (siehe oben). In der Regel ergeben sich auch günstigere Ergebnisse gegenüber dem Nennkrümmungsverfahren (bis 15%), im Fall der gedruckten hochbelasteten Stütze mit geringer Betonfestigkeit auch bis 2% ungünstigere.

Im Falle der Position „Tatu 1 – Kopfmoment 2A“ mit einer zweiachsigen Beanspruchung ist das Nennkrümmungsverfahren, für das die Bedingungen, wie einachsig zu rechnen, gegeben sind, um 12% günstiger. Ursache ist die beim allgemeinen Verfahren in beiden Richtungen angesetzten ungewollten Ausmitte. Reduziert man das Maß der Ausmitte so, dass diese lediglich in Richtung des resultierenden Momentes den vollen Wert hat, reduziert sich die Differenz auf 5%.

Variation Lastabstufung

Eine feinere Lastabstufung bei gleichem Last- und Zeitniveau führt zu geringfügig höheren Kriech- und Schwindumlagerungen und im Falle eines maßgebenden Bemessungszeitpunkt $t = t_B$ zu einer geringfügigen Reduzierung der erforderlichen Bewehrung. Eine gröbere Abstufung führt hingegen zu einer höheren Bewehrung. Für die Beispielstütze in [1], die mit 4 Laststufen gerechnet wurde, ergab sich bei äquivalenten 8 Laststufen eine um 1% geringere Bewehrung, bei 2 Laststufen eine um 2% höhere Bewehrung.

Variation Betonklassen

Hochfeste Betone haben mit zunehmender Festigkeit eine höhere Bruchstauchung ε_{c2} , wodurch der hochfeste Stahl auch ohne Kriechen und Schwinden schon höher ausgenutzt werden kann. Allerdings gleicht sich dieser positive Effekt wieder aus durch die bei hochfesten Betonen geringere Neigung zu Kriechen und Schwinden.

Variation Kriechen und Schwinden

- **Streuung:**
Die Beispielstütze in [1] wurde ohne Berücksichtigung einer Streuung untersucht. Mit Annahme einer Streuung von 30% ergibt sich eine um 4,9 % höhere Bewehrung, bei einer Streuung von 15 % beträgt die Differenz 2,6%.
- **Zement:**
Die Beispielstütze in [1] wurde mit einem normal erhärtendem Zement N untersucht. Für einen schnell erhärtenden Zement R ergeben sich infolge des größeren Schwindmaßes bei geringfügig kleinerer Kriechzahl größere Umlagerungsdehnungen und damit eine um 1,85% geringere Bewehrung
- **Luftfeuchte**
Die Beispielstütze in [1] wurde mit einer Luftfeuchte von 50% untersucht. Mit 70% Luftfeuchte ergeben sich geringere Umlagerungsdehnungen aus Kriechen und Schwinden und eine um 1,2% höhere Bewehrung.

Variation E-Modul des Betons

Der E-Modul von Beton kann je nach Art der Zuschlagstoffe zwischen $MinEcm = 0,7 \cdot Ecm$ und $MaxEcm = 1,2 \cdot Ecm$ variieren, wenn Ecm der Wert nach EC2 Tabelle 3.1 ist.

Bei normalen Betonstahl ergeben sich mit $MinEcm$ höhere Verformungen und damit das Maximum an Bewehrung. Bei Verwendung von hochfestem Stahl kann sich ein abweichendes Verhalten einstellen.

- gedrungene Beispielstütze ($\lambda = 37,5$) nach [1]:
 $As(MinEcm) = As(Ecm) - 2,5\%$ $As(MaxEcm) = As(Ecm) + 1,5\%$
 Durch den geringeren E-Modul ergeben sich höhere Umlagerungsdehnungen und damit ist eine höhere Stahlausnutzung möglich. Der Verformungszuwachs ist gering.
 Die Annahme von $MaxEcm$ liegt auf der sicheren Seite.
- schlanke verformungssensitive Stütze ($\lambda = 70$):
 $As(MinEcm) = As(Ecm) + 1\%$ $As(MaxEcm) = As(Ecm) + 0,5\%$
 Sowohl die mit $MaxEcm$ geringeren Umlagerungen bei geringeren Verformungen als auch die mit $MinEcm$ höheren Umlagerungen bei größeren Verformungen waren ungünstiger als das Original.
 Die Annahme von $MinEcm$ liegt auf der sicheren Seite.

Variation Bauablauf

Es wurden die Varianten t_{Red} (um 1 Jahr schnellere Fertigstellung) und t_{Erh} (gleichmäßig verdoppelte Bauzeit) und t_{Ruh} (eine nach der 1. Laststufe für 2 Jahre ruhende Baustelle) untersucht.

t_{Red}	gedrungenen Beispielstütze ($\lambda = 37,5$) nach [1]	$\Delta As = + 6\%$	
	schlanke verformungssensitive Stütze	$\Delta As = + 0,4\%$	
t_{Erh}	gedrungenen Beispielstütze ($\lambda = 37,5$) nach [1]	$\Delta As = + 0,2\%$	($\Delta As = -1,1\%$ siehe ¹⁾)
	schlanke verformungssensitive Stütze	$\Delta As = + 0\%$	

wegen des späteren Bemessungszeitpunktes wird eine höhere Umlagerung und damit Stahlausnutzung erwartet. Entscheidend ist aber auch das Alter der Erstbelastung, welches bei Beibehaltung der Anzahl der Laststufen sich erhöht und für insgesamt geringere Kriechumlagerungen sorgt.

¹⁾ Verdoppelt man die Anzahl der Laststufen, ergibt sich das gleiche Erstbelastungsalter und damit höhere Umlagerungsdehnungen und eine um 1,1% geringere Bewehrung.

t_{Ruh}	gedrungenen Beispielstütze ($\lambda = 37,5$) nach [1]	$\Delta As = + 3,9\%$
	schlanke verformungssensitive Stütze	$\Delta As = + 1,1\%$

Ein Großteil der ständigen Last wird später eingetragen, was zu geringeren Umlagerungsdehnungen und damit zu einer Bewehrungserhöhung führt.

Maßgebender Bemessungszeitpunkt

Bei allen untersuchten Stützen lag der maßgebende Bemessungszeitpunkt beim Nutzungsbeginn mit negativer Streuung ($t_B, -s$) für Kriechen und Schwinden, wobei die Bewehrungsdifferenz zu $t_{00,+s}$ zwischen 10% – 0,3% lag.

Die bei $t_{00,+s}$ infolge größerer Verformungen höheren Momente konnten durch eine höhere Ausnutzung der Bewehrung kompensiert werden. Bei gedrunenen und mittig belasteten Stützen ergaben sich die größten Bewehrungsdifferenzen, mit zunehmender Sensitivität für Verformungen, d.h. schlankeren Stützen ($\lambda = 70$) mit zunehmender Lastausmitte waren diese geringer ausgeprägt.

Maximale und minimale Parameterkombination

Werden die Parameter hinsichtlich Kriechens und die Streuung des E-Modules und des Bauablaufes zu den Extremen kombiniert, so ergibt sich folgendes Bild:

- gedrunenen Beispielstütze ($\lambda = 37,5$) nach [1]:
die Bandbreite der Ergebnisse beträgt 13,6%.
MaxAs ergab sich um 8,3% höher (Kombination MaxEcm, tRed, MinKS)
MinAs ergab sich um 5,3% geringer (Kombination MinEcm, tErh, MaxKS)
- schlanke verformungssensitive Stütze ($\lambda = 70$):
die Bandbreite der Ergebnisse ist mit 4% deutlich geringer.
MaxAs ergab sich um 3% höher (Kombination MinEcm, tRed, MinKS)
MinAs ergab sich um 1% niedriger (Kombination Ecm, tErh, MaxKS).

17. Vergleichsrechnungen

Zur Absicherung der Berechnungsergebnisse des Programmes wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen durchgeführt

- Beispielstütze Prospekt Annahütte [1]
- Projekt TBK-S [9], Vergleich mit Exceltool [2]
- Projekt ARGE FRILO + IBG
- Eigene Vergleiche mit B5+ und Nennkrümmungsverfahren

18. Literatur

- [1] SAS 670 / 800 Grundlagen der hochfesten Bewehrungstechnik; SAH 09/2019
- [2] Falkner, Gerritsen, Krokowski: "Gutachterliche Stellungnahme zu dem Bemessungsprogramm, den Nomogrammen und den Tabellen zur Bemessung von Stützen mit hochfester Bewehrung (SAS 670)", Falkner und Partner 2010
- [3] Graubner: "Gutachterliche Stellungnahme zur Beurteilung der grundlegenden Bemessungsansätze für Stahlbetonstützen mit hochfester Bewehrung", 2010
- [4] European Technical Assessment ETA-13/0840 vom 20.12.2021 mit EAD 160011-00-0031
- [5] Z-1.1-285:15.05.2019- 5.05.2024: Allgemeine Bauartgenehmigung "Stahlbetonbauteile unter Verwendung des hochfesten Bewehrungssystems SAS 670/800"; DIBT 2019
- [6] Falkner, Gerritsen, Jungwirth, Sparowitz: "Das neue Bewehrungssystem; Druckglieder mit hochfesten Betonstahl SAS 670/800"; Beton und Stahlbetonbau 56/2008, S. 304 ff.
- [7] Gutachterliche Stellungnahme Nr. G07011 zum Brandverhalten von Stützen mit hochfesten Stahl SAS 670/800 beim Bauvorhaben Opernturm Frankfurt
- [8] Rüschi, Jungwirth, Hilsdorf: „Creep and Shrinkage“; Springer Verlag 1983
- [9] Ed. Züblin AG – Zentrale Technik, Untersuchungs- und Ergebnisbericht „Bemessung von Stahlbetonstützen mit hochfester Bewehrung mittels Softwarelösungen, Rev 1 11/ 2020
- [10] Stahlbetonstütze mit hochfester Bewehrung SAS 670, Besonderheiten bei der Bemessung nach dem Nennkrümmungsverfahren mit FRILO B5+,
- [11] VfdB Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 4. Auflage 2020

Bildnachweis: Der Abdruck der Bilder 1, 2, 3 und 4 erfolgte mit freundlicher Genehmigung der Stahlwerke Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG