

Betonfertigteile im Hochhausbau

<https://doi.org/10.14459/mbs28.07>

Hubert Bachmann



Dr.-Ing. Hubert Bachmann

1976-78 Lehre als Beton- und Stahlbetonbauer
1978-83 Studium Bauingenieurwesen
FH Karlsruhe
1983-86 Studium Bauingenieurwesen
TH Karlsruhe
1986-93 Promotion am Lehrstuhl für Massivbau der
TH Karlsruhe
1993-2020 Ed. Züblin AG Stuttgart
Seit 2020 Gründung Ingenieurbüro Bachmann Liebig
Consulting und Engineering Beratende Ingenieure
Part GmbH, Bretten

Der Beitrag befasst sich mit der Anwendung von Betonfertigteilen im Hochhausbau. Aus Kostengründen wird eine kurze Rohbauzeit gefordert, welche in der Vergangenheit durch eine Optimierung und Automatisierung der Ortbetonschalungstechnik erzielt wurde. Die Fertigteilbauweise gibt uns die Möglichkeit die Bauzeit weiter zu verkürzen. Zudem verringert sie den Personal- und Materialeinsatz auf der Baustelle und führt so zu einer Vereinfachung der Herstellung. Im weiteren wird über die Anwendung von Betonfertigteilen bei Stützen, Decken und Wänden beim Hochhausprojekt FOUR in Frankfurt a.M. berichtet. Neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten werden die Ausführung sowie statische Detailfragen erörtert.

The article deals with the use of precast concrete parts in high-rise buildings. For cost reasons, a short construction period is required, which in the past was achieved by optimizing and automating the in-situ concrete formwork technology. The prefabricated construction method gives us the opportunity to further shorten the construction time. It also reduces the use of personnel and materials on the construction site and thus simplifies production. The report also reports on the use of precast concrete elements for columns, slabs and walls in the FOUR high-rise project in Frankfurt a.M. In addition to economic aspects, the execution and static details are discussed.

Einleitung

Hochhausgebäude zeichnen sich einerseits infolge hoher Vertikal- und Horizontalbeanspruchungen durch die Anwendung von hochfesten Materialien, wie Stahl, aus, andererseits hat sich aufgrund der kontinuierlichen Bauweise und eines hohen Widerstands bei Brandbeanspruchungen der Ort beton als dominierende Bauweise etabliert. Durch eine Automatisierung der Schalungs- und Betonagetechnik können damit Hochhäuser bis ca. 400m Höhe wirtschaftlich hergestellt werden.

Nicht zuletzt die Normierung aller Baustoffe, Bemessungs-, Produktions- und Montageverfahren hat dazu geführt, dass die Qualität der Ausführenden auf der Baustelle immer schlechter wurde. Auch die Verknappung von Fachkräften hat dazu einen Beitrag geleistet. Damit stößt die konventionelle Ort betonbauweise immer mehr an seine Grenzen, weil komplexe Bauabläufe und die Anwendung anspruchsvoller Materialien auf der Baustelle nicht mehr wirtschaftlich umgesetzt werden können. Die Änderungsmentalität der Beteiligten, insbesondere der Bauherrschaft, führt zudem zu einer Verkomplizierung des Planungsprozesses und letztlich auch zu Verzögerungen oder einer Verdichtung des Arbeitsumfangs auf der Baustelle.

Die Betonfertigteilmbauweise bietet die Möglichkeit einige dieser Nachteile und Schwierigkeiten zu mindern oder gar zu eliminieren. Zuerst sei hier die Anwendung anspruchsvoller Materialien genannt. Sei dies hochfester Betonstahl, hochfester Beton oder gar nicht-metallische Bewehrungen, sie alle können im Fertigteilmwerk zielsicher eingesetzt werden. Des Weiteren sind es die Reduktion der Hilfsmittel, wie Schalungen, Rüstungen und Betonpumpen, welche die Fertigteilmbauweise gerade im Hochhausbau attraktiv

und vereinfachend machen. Der Personaleinsatz im Rohbau wird ebenfalls massiv reduziert, was zu weiteren Vereinfachungen auf einer Großbaustelle führt.

Schließlich ist es die Baugeschwindigkeit, die mit dem Einsatz von Betonfertigteilen im Hochhausbau weiter gesteigert werden kann. Dies ist in mehrerlei Hinsicht von wirtschaftlichem Nutzen. Zum einen können BE und BGK weiter reduziert werden. Des Weiteren benötigt die TGA für die Endmontage eine fertiggestellte Technikzentrale, meist auf dem Gebäudedach, und schließlich können die Kosten der Zwischenfinanzierung nicht unwesentlich reduziert werden.

Die Fertigteilbauweise hat jedoch auch Nachteile oder Risiken, die berücksichtigt werden müssen. Zuerst sei hier die größere Vorlaufzeit für die Planung genannt. Daneben steigt das Risiko eines Baustopps, wenn Fertigteile fehlerhaft geplant oder produziert wurden oder auf der Baustelle nicht zur Verfügung stehen. Schließlich, und dies soll im weiteren Beitrag ebenso vertieft werden, müssen Fertigteile kraftschlüssig verbunden werden.

Im Weiteren wird über den Einsatz von Betonfertigteilen beim Hochhaus-Ensemble FOUR in Frankfurt a.M. berichtet. Neben Stützen und Decken aus Betonfertigteilen, wurden auch erstmals in Deutschland Fertigteilwände in einem Hochhaus bis 100m Höhe eingesetzt.

Stützen

Stützen in Hochhäusern mit Gebäudehöhen bis ca. 300m werden in Deutschland entweder in Ortbeton, in Verbundbauweise oder in Stahlbauweise hergestellt. Wobei die reine Stahlstütze weniger verbreitet ist, weil man bei einer Verbundstütze den Beton neben seiner Tragwirkung auch als Brandschutz verwenden kann. Die Ortbetonstütze stößt jedoch, bei vernünftigen Abmessungen, infolge der begrenzten Bewehrungsmenge von 9% recht schnell an ihre Grenzen der Tragfähigkeit. Hochtragfähige Stützen werden daher meist als Verbundstütze ausgeführt.

Hochfeste Bewehrung erhöhen hier die Tragfähigkeit einer Betonstütze, zunächst jedoch nur entsprechend ihrer höheren Festigkeit. Um die Tragfähigkeit weiter zu steigern, stellt die Stahlindustrie inzwischen auch große Stabdurchmesser bis 75mm Durchmesser zur Verfügung. Eine erste An-

wendung fand beim Opernturm in Frankfurt a.M. statt. Dort wurden 2 Megastützen mit einer Designlast von mehr als 100 MN je Stütze mit einem Bewehrungsgrad von 12% realisiert. Mit Stabdurchmessern von 75mm war eine zielsichere Herstellung der Stütze mit einem Beton C50/60 problemlos möglich. Die Stützen wurden in Ortbeton und mit einem Stahlstumpfstoß hergestellt [1]. Das Stahlwerk Annahütte in Ainring hat für diese Bewehrungsstäbe (bis 63,5mm) inzwischen eine Zulassung auf europäischer Ebene [2] [3]. In [4] und [5] wird ausführlich über dieses neue Bewehrungssystem berichtet.

Für die Anwendung in Betonfertigteilstützen wird jedoch weiterhin eine Zustimmung im Einzelfall (ZIE) benötigt [6], da der Stützenstoß nicht geregelt ist. Ohnehin stellt der Stützenstoß mit hochfestem Betonstahl und hohen Bewehrungsgraden bis ca. 16% das anspruchsvollste Detail dar. Erstmals wurden die Fertigteilstützen mit hochfestem Betonstahl im Hochhausbau beim Hochhaus Tanzende Türme in Hamburg und beim Taunusturm in Frankfurt in der heute üblichen Bauweise ausgeführt [1] [7].

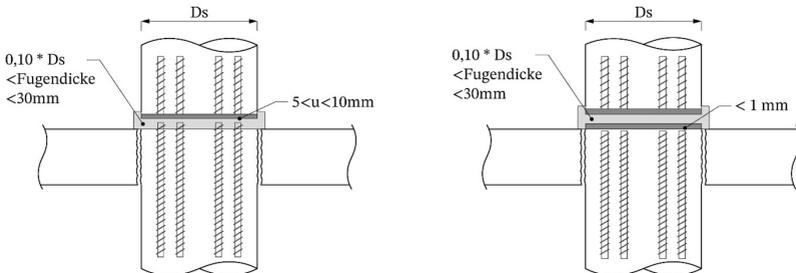


Abb. 1: Kraftdurchleitung im Deckenbereich bei Stützen mit hochfestem Bewehrungsstahl

Beim BV Four wurden die Stützen beim Turm RT4 ($H = 100\text{m}$) und RT1 ($H = 235\text{m}$) ab dem 6. OG in Fertigteilbauweise hergestellt. Die Unregelmäßigkeiten in der Gebäudegeometrie vom EG bis zum 5. OG führten zu dieser Entscheidung. Grundsätzlich verlaufen die Fertigteilstützen bei Hochhäusern immer bis zur Deckenoberkante, da ansonsten die Kraftdurchleitung enorme Probleme bereiten würde. Abb. 1 zeigt die Möglichkeiten der Kraftdurchleitung bei Verwendung von hochfesten Betonstählen mit großen Stabdurchmessern. Die linke Variante verzichtet auf eine untere Stahlplatte, wobei die Bewehrungsstäbe sehr nahe an die obere Stahlplatte geführt werden müssen. Der Spalt von ca. 5-7mm muss dabei sorgfältig

vergossen werden. Eine technisch einfachere Variante stellt der rechte Stoß mit 2 Stahlplatten dar. Der Kraftfluss verläuft dabei direkt durch die Stahlplatten und den dazwischen liegenden Mörtel, wobei die Stahlplatten weniger die Stabkraft verteilen, als vielmehr die Querdehnung des Stützenbetons sowie des Mörtels behindern und dadurch in den angrenzenden Bereichen einen 3-achsialen Druckspannungszustand erzeugen. Diese Querdehnungsbehinderung erlaubt es den Mörtel mit einer Festigkeit von 80 N/mm^2 mit einer Druckspannung bis zu 600 N/mm^2 im GZT zu beanspruchen. Die nachfolgende Abb. 2 zeigt den Bewehrungsquerschnitt einer Fertigteilstütze sowie die Ansicht der Stütze im Fertigteilwerk. Als Besonderheit wurde der Stützenkopf mit der Deckenauskrantung hergestellt, wobei die Stütze geneigt eingebaut wurde, während der Deckenbereich natürlich in der Horizontalen liegt.

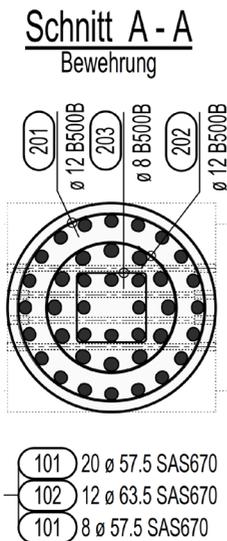


Abb. 2: Stützenquerschnitt und Ansicht einer Fertigteilstütze beim RT1

Decken

Die Decken wurden bei den beiden Hochhaustürmen RT1 + RT4 als Halbfertigteilkonstruktion entworfen. Der ursprüngliche Entwurf sah eine bereichsweise vorgespannte Ortbetondecke vor. Insbesondere die Unregelmäßigkeit der Decken im Grundriss ließen einen hohen Schalungs- und Rüstungsaufwand erwarten. Um die Ausführung zu beschleunigen, wurde die in Abb. 3 dargestellte Lösung mit Halbfertigteilelementen umgesetzt.

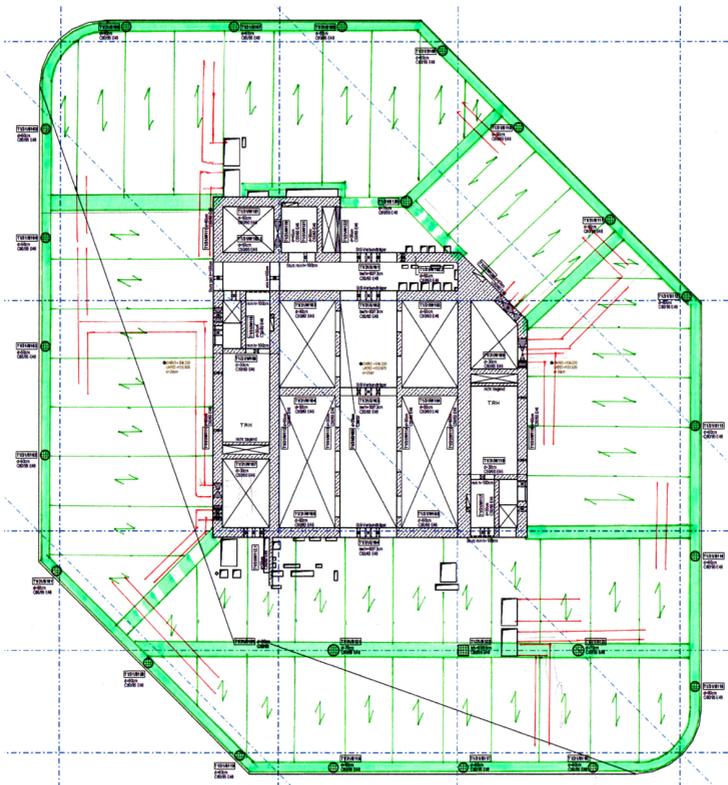


Abb. 3: Deckengrundriss mit Unterzügen als Halbfertigteildecke beim RT1

Da eine Umstellung auf eine Unterzugdecke mit dünner Deckenplatte nicht mehr möglich war, konnten die Unterzüge nur in einer Höhe von 8 cm ausgeführt werden (vgl. Abb. 4). Daher nutzte man einen Teil des Hohlraumbodens um einen Überzug von 11 cm und damit einen Unter-/Überzug mit einer Gesamthöhe von 46 cm zu generieren. Bei einer Spannweite von bis zu 12 m wurde diese stark vorgespannt.

Gleichzeitig wurde die Decke mit 27 cm selbst etwas dünner ausgebildet um Gewicht zu sparen. Die Deckenelemente wurden als vorgespannte Elementdecken eingebaut und schließlich alles mit dem Aufbeton und der oben liegenden Stützbewehrung zu einer kontinuierlichen Decke ausgebildet. Für die Führung von Elektro- und Medienkabel wurden in den Überzügen zusätzliche Durchbrüche geschaffen.

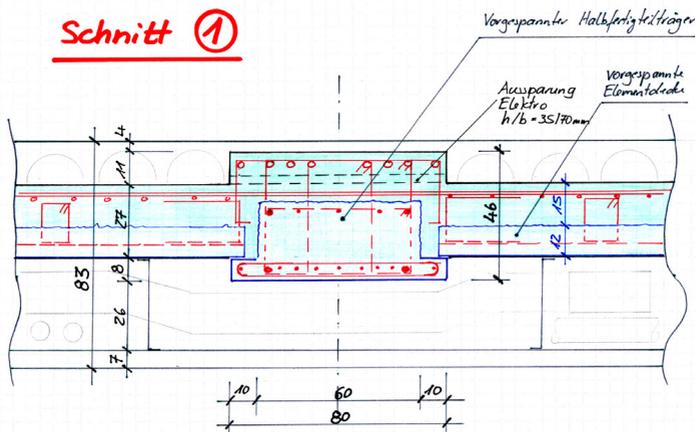


Abb. 4: Unterzugquerschnitt der Halbfertigteildecke

Zur Komplettierung wurde noch ein Randunterzug angeordnet, welcher als Auflager für die Innenunterzüge und Elementdecken diente und gleichzeitig die Verformungen für die Fassade gering halten konnte. Abb. 5 zeigt die Montage der Träger. Nach einer Eingewöhnungsphase konnte die Decke mit der Fläche von ca. 1650 m² in einem 4-Tages-Takt fertiggestellt werden.



Abb. 5: Montagezustand der Halffertigteildecke

Aussteifung - Koppelriegel

Die Aussteifung von Hochhäusern bis ca. 300 m Höhe erfolgt normalerweise über die Kernwände. So auch bei den hier vorgestellten Hochhäusern. Infolge der Nutzung der Kerne für die Aufzugsschächte ist zwingend eine Aufzugslobby -Zugang zu den Aufzügen- erforderlich. Dies führt nun dazu, dass der rechteckige Kerngrundriss mehr oder weniger in 2 Teilgrundrisse getrennt wird, welche nur über die Riegel über den Aufzugszügen, den sogenannten Koppelriegeln, verbunden sind. Diese Koppelriegel erfahren eine recht hohe Beanspruchung. Aufgrund der großen Breite der Aufzugslobby beim RT1 (235m) von 3,55 m werden die Koppelunterzüge extrem stark beansprucht. Insgesamt wurden 42 Koppelriegel mit extrem hohen Beanspruchungen in Stahlbauweise ausgeführt, 10 weitere mit hochfestem Betonstahl und C80/95 (Riegel mit größeren Höhen) und 52 Stück mit niedrigeren Beanspruchungen in den oberen Geschossen als Fertigteil.

Die Regelkoppelriegel (112 Stück) wurden hingegen als vorgespanntes Fertigteil ausgeführt. Abb. 6 und Abb. 7 zeigen den Querschnitt sowie die Ansicht mit der gewählten Bewehrung. Bei Abmessungen von

b/h = 80/73 cm liegen maximal ein Moment $M_{Ed} = 4,53$ MNm bei gleichzeitig wirkender Querkraft von $V_{Ed} = 2,57$ MN an. Das Unangenehme ist nun, dass das Moment über eine Länge von 3,55 m zu 100% durchschlägt, während die Querkraft konstant ist. In Feldmitte gibt es demnach einen Momenten Nullpunkt mit gleichzeitiger hoher Querkraftbeanspruchung. Das größte technische Problem war jedoch die geforderte Biegesteifigkeit, denn die Eigenfrequenz des Kernquerschnitts durfte nicht verringert werden. Der Betonquerschnitt war nur ausreichend steif, wenn keine Rissbildung im Gebrauchszustand auftritt. Hierzu wurde der Koppelriegel mit insgesamt 80 Litzen und einer Vorspannkraft von ca. 10 MN zentrisch vorgespannt. Damit konnte eine Rissbildung im GZT für den 60jährigen Wind verhindert werden. Abb. 8 zeigt den hergestellten Koppelriegel im FT-Werk.

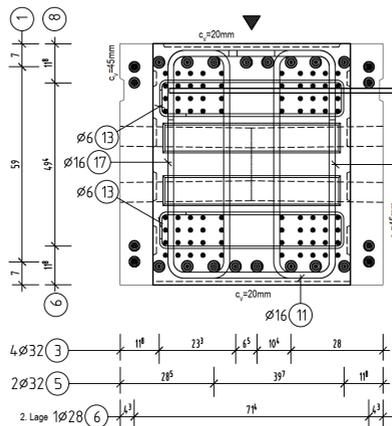


Abb. 6: Querschnitt eines Koppelriegels als vorgespanntes Fertigteil mit C100/115

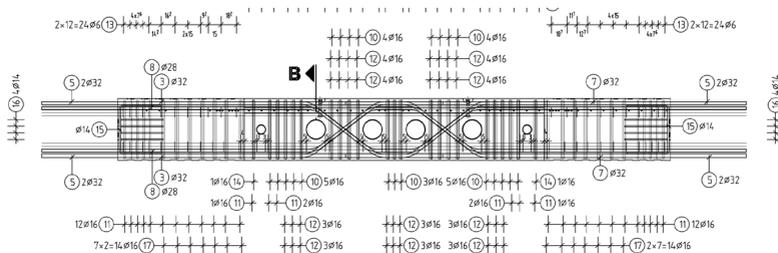


Abb. 7: Querschnitt eines Koppelriegels als vorgespanntes Fertigteil mit C100/115



Abb. 8: Koppelriegel im Fertigteilwerk (Bild Fa. Rekers, Spelle)

Wände

Mit Ausnahme der oben vorgestellten Koppelriegel wurden die Kernwände im Turm RT1 in Ortbeton ausgeführt. Aus Gründen des Bauablaufs wurden die Aufzugsvorwände als Elementwände ausgebildet. Beim Turm RT4 (H = 100m) hingegen wurden für die Innenwände des aussteifenden Kerns Betonfertigteile eingesetzt. Verbunden wurden diese über Schubdollen in den horizontalen Fugen, die Querkräfte in den vertikalen Wandfugen wurden mittels Seilschlaufen übertragen. Teilweise wurden die Seilschlaufen in 2 Reihen angeordnet. Von den Schubfugen abgesehen stellen die Kernwände selbst bei Hochhäusern statisch kein großes Problem dar. Diese liegen vielmehr in der optimalen Montageanordnung und dem Schließen der Fugen, da die Zugänglichkeit insbesondere im Bereich der Aufzugsschächte relativ begrenzt ist. Mögliche Fugenausbildungen sind in [8] abgebildet.

Ein wesentlicher Vorteil der Innenwände als Vollfertigteile ist die vertikale „Trennung der Baustelle“ in den Deckenbereich außen und den Innenbereich des Kerns. Die Umfassungswände des Kerns wurden in Ortbeton geschossweise vorbetoniert und die Kletterschalung nach oben gezogen. Dann konnte die Außendecke direkt nachgezogen werden. Schalungstechnik, Krankapazität und Manpower für die Innenwände wurden stark reduziert und die Wände ca. 2 Stockwerke nachgezogen. So konnten diese immer in den Zeitlücken der Decken und Kernaußenwände erstellt werden.



Abb. 9: Kernwände als Betonfertigteile

In asiatischen Ländern werden inzwischen auch Versuche gestartet die Kernwände von Hochhäusern komplett vorzufertigen. Die Problematik, neben der Krankapazität, ist die Ausbildung der Schubfugen. In den Umfassungswänden wirken deutlich größere Schubkräfte als in den Innenwänden und gerade an den Ecken ist eine konstruktive Ausbildung besonders schwierig. Die bisher vorliegenden Verbundmittel bei Fertigteilen beschränken sich auf Dollen und Seilschlaufen. Eine Ausbildung mit Bewehrungsüberstand und Schalungstechnik ist nicht im Sinne der Fertigteiltechnik und stellt keine zukunftsfähige Lösung dar.

Die Fa. Precast India entwickelt eine Verbindungstechnik über Bewehrungsstäbe, die in Hüllrohren verlegt werden. Der anschließende Mörtelverguss führt zu einer sehr tragfähigen Schubverbindung mit Bewehrungsstäben bis $d25/15\text{cm}$. Abb. 10 zeigt das System als Prinzip Skizze.

Für das mit W2W \Rightarrow wall-to-wall bezeichnete System wird derzeit eine abZ in Deutschland angestrebt. Die Erteilung wird in 2025 erwartet. Das System wird bereits in einigen asiatischen Ländern mit zunehmendem Erfolg angewendet.

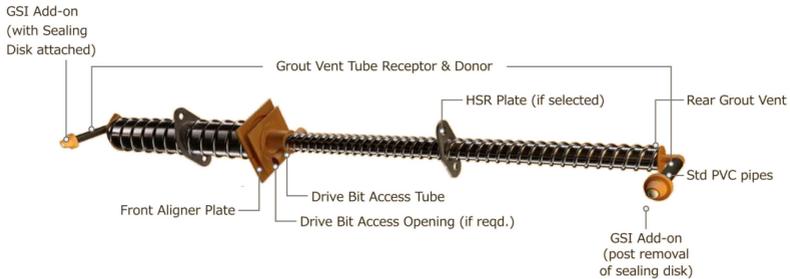


Abb. 10: W2W – System zur tragfähigen Schubverbindung von Wänden und Trägern (Precast India, Pune)

Fazit

Bei konsequenter Anwendung von Betonfertigteilen kann der Bauablauf bei Hochhäusern weiter beschleunigt werden. Ein 4-Tages-Takt ist heute bereits machbar. Die Baugeschwindigkeit richtet sich jedoch nach dem langsamsten Bauteil, was derzeit die Herstellung der Kernwände ist. Eine Vorfertigung der Kernwände wird angestrebt.

Neben der Verlagerung der Arbeiten, weg von der Baustelle hin in das Fertigteilwerk, können und sollten bei den Fertigteilen die hochwertigen Materialien Anwendung finden. Der Einsatz von hochfestem Beton bei gleichzeitiger Reduktion der Betonmengen (und des Gebäudegewichtes) sowie der Einsatz kostengünstiger Vorspannung im Fertigteil bei gleichzeitiger Reduktion der Betonstahlmenge führt neben einer wirtschaftlichen auch zu einer nachhaltigen Konstruktion.

Beim Bauvorhaben FOUR in Frankfurt a.M. konnte gezeigt werden, dass die Möglichkeiten des Einsatzes von Betonfertigteilen mit hochtragfähigen Betonen bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind. Parallel dazu müssen die Verbindungstechniken für Betonfertigteile weiterentwickelt und angewendet werden.

Abschließend möchte ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern vom Büro Werner Sobek Frankfurt für die planerische Umsetzung und die angenehme Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

- [1] Bachmann, H.: Hochfester Betonstahl für Stützen im Hochhausbau. Der Prüfenieur, Mai 2014, S. 12 – 27, Bundesvereinigung der Prüfenieure für Bautechnik e.V., ISSN 1430-9084
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine Bauartgenehmigung Z-1.1-285: Stahlbetonbauteile unter Verwendung des hochfesten Bewehrungssystems SAS 670/800, 2019 (gültig bis 2024)
- [3] Österreichisches Institut für Bautechnik, Europäische Technische Bewertung ETA-13/0840: Hochfestes Bewehrungssystem SAS 670/800, 2020.
- [4] H. Falkner, D. Gerritzen, D. Jungwirth und L. Sparowitz, „Das neue Bewehrungssystem; Druckglieder mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800: Teil 1: Entwicklung, Versuche, Bemessung, Konstruktion; Beton- und Stahlbetonbau 2008, Heft 5; Verlag Ernst & Sohn, Berlin“.
- [5] Bachmann, H., Benz, M., Falkner, H., Gerritzen, D., Wlodkowsky, H.: Das neue Bewehrungssystem; Druckglieder mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800: Teil 2: Opernturm Frankfurt - Anwendung. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008) Heft 8, Ernst und Sohn Verlag, Berlin
- [6] Bachmann, H., Benz, M.: Technischer Bericht zur Erlangung einer ZIE für die Herstellung der Hochhausstützen mit hochfestem Betonstahl S670/800 beim Hochhaus Taunusturm in Frankfurt, Stuttgart, 2012.
- [7] Bachmann, H., Schmitt, R., Wacker, J., Ruppert, S., Berger, A.: Betonkalender 2024-Band 1, Hochhausbau in der Praxis. S. 101-201, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2024.
- [8] Bachmann, H.; Tillmann, M., Urban, S.: Betonkalender 2021-Band 1, Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. S. 59-303, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2021.