

3

97. Jahrgang
März 2020, S. 197 – 206
ISSN 0932-8351

Sonderdruck

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



Intelligent Quarters Hamburg

Zur Tragwerksplanung schwingungsentkoppelter Hochhäuser

Intelligent Quarters Hamburg

Zur Tragwerksplanung schwingungsentkoppelter Hochhäuser

Das Joint Venture der ECE Projektmanagement GmbH und der Strabag Real Estate GmbH hat auf einem Baugrundstück im Elbtorquartier der Hamburger HafenCity das Projekt „Intelligent Quarters“ umgesetzt. Neben der exponierten Lage des aus vier Bauteilen bestehenden Gebäudekomplexes musste während der Planung und Ausführung ein besonderes Augenmerk auf die Einflüsse der mehrgeschossigen Bauweise gelegt werden. Zusätzlich musste eine vollständige Schwingungsentkopplung bei schwierigen Baugrundverhältnissen umgesetzt werden, da der Gebäudekomplex über der U-Bahn-Linie U4 liegt. Mittels numerischer Methoden und im Experiment konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Schwingungsdämpfern zur Schwingungsentkopplung einzelner Bauteile im „Intelligent Quarters“ erfolgreich umgesetzt wurde.

Stichworte Hochhäuser; Baudynamik; Boden-Bauwerk-Interaktion; Schwingungsentkopplung

1 Einleitung

Auf einem Grundstück im Elbtorquartier der Hamburger HafenCity wurde durch die ECE Projektmanagement GmbH & Co. KG (ECE) sowie die Strabag Real Estate GmbH direkt an der Elbe zwischen Magdeburger Hafen, Baakenhafen und der HafenCity Universität (HCU) das Projekt „Intelligent Quarters“ (IQ) umgesetzt. Hierbei entstand im Zentrum der HafenCity direkt am Magdeburger Hafen und am Baakenhafen ein neues Quartier mit einem weit sichtbaren, rd. 70 m hohen, 18-geschossigen Bürohochhaus, zwei weiteren Gebäuden (ein sieben-geschossiges Bürogebäude, ein neungeschossiges Wohngebäude) und einer zweigeschossigen Tiefgarage auf einer Grundstücksfläche von etwa 9 100 m² (Bild 1). Eine besondere ingenieurtechnische Herausforderung für die Bebauung des Areals war die unterirdische U-Bahn-Trasse im Nordwesten des Grundstücks.

Aus dem 2011 vom Bauherrn durchgeführten Architekturwettbewerb ging das Architekturbüro Störmer, Murphy and Partners aus Hamburg als Sieger hervor. Der Entwurf sieht eine vollständige Bebauung des Grundstücks vor, wobei die Gebäude und deren Nutzung sich folgendermaßen darstellen:

- Grundstücksgröße: ca. 9 100 m²
- Brutto-Rauminhalt (BRI): ca. 160 000 m³
- Bürohochhaus *watermark* – Bauteil A: ca. 18 000 m² BGF, 18-geschossig ca. 70 m oberirdisch

Intelligent Quarters Hamburg – structural design of vibration decoupled high-rised buidlings

The joint venture between the ECE Projektmanagement GmbH and Strabag Real Estate GmbH has realized the project “Intelligent Quarters” which is located at the so-called Elbtorquartier at the HafenCity in Hamburg. The building complex is located directly at the Elbe River and consists of four different buildings. During the design and installation, focus was set on the design of fully vibration decoupled high-rise buildings due to complex location directly above the new subway U4 in Hamburg. Results of finite element calculations and experiments showed that the use of vibration dampers leads to vibration decoupled structures at “Intelligent Quarters”.

Keywords structural design of high-rise buildings; structural dynamics; soil-structure-interaction; vibration decoupling

- Bürogebäude *shipyard* – Bauteil B: ca. 9 000 m² BGF, achtgeschossig ca. 27 m oberirdisch
- Wohngebäude *freepart* – Bauteil C: ca. 10 000 m² BGF, neungeschossig ca. 32 m oberirdisch
- Tiefgarage Bauteil T: ca. 10 000 m² BGF, zweigeschossig ca. 7 m inkl. Bodenplatte

Die Autoren dieses Aufsatzes begleiteten über Jahre hinweg das Bauvorhaben im Rahmen der Projektentwicklung, Planung und Ausführung. Schwerpunkte der erbrachten Leistungen lagen in der Tragwerksplanung der



Quelle: ECE Projektmanagement

Bild 1 Das „Intelligent Quarters“ Hamburg nach der Fertigstellung
The “Intelligent Quarters” Hamburg after finalization

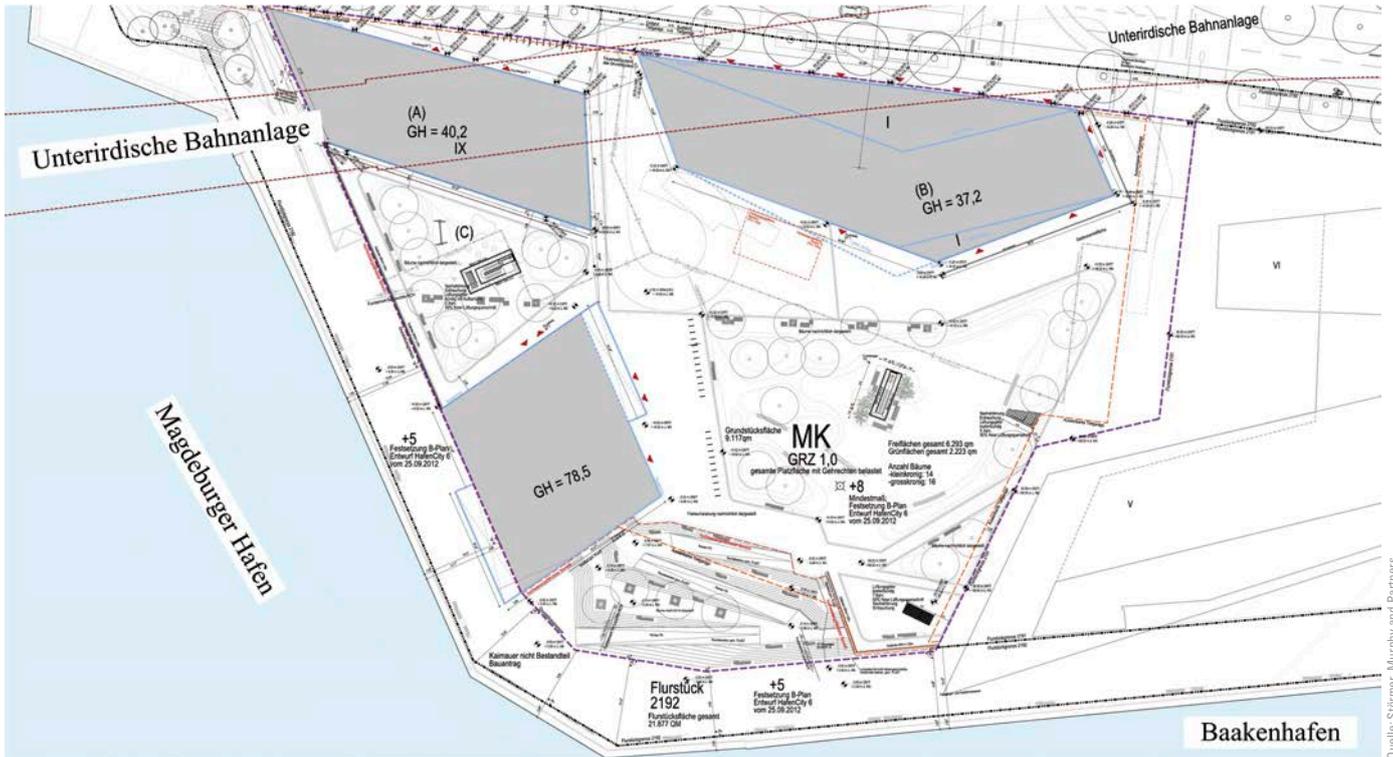


Bild 2 Lageplan der Bauteile auf dem Grundstück „Intelligent Quarters“
Layout of the buildings at the „Intelligent Quarters“ site

Hochbauten, der Objekt- und Tragwerksplanung der Ingenieurbauwerke wie Tiefgründung und Baugrube, der Planung und Überwachung der Schwingungsentkoppelung sowie der technischen Betreuung der nachbarrechtlichen Abstimmungen mit der HafenCity GmbH, der Hochbahn AG und der HafenCity Universität.

2 Besonderheiten bei der Planung und Ausführung

2.1 Baugrund und Grundstück

Das Grundstück des „Intelligent Quarters“ befindet sich etwa 1 km östlich von der Elbphilharmonie direkt am Magdeburger Hafen und am Baakenhafen. An das Grundstück grenzen das Hafenbecken, die HafenCity Universität, die U-Bahn-Linie U4 der Hamburger Hochbahn AG sowie Grundstücke der Stadt Hamburg, wie z. B. die Überseeallee und der Elbradwanderweg, an (Bild 2).

2.1.1 Baugrund

Auf Basis der durchgeführten Baugrundbeurteilung wurde festgestellt, dass im Baugrund Kleischichten anliegen, die für eine Flachgründung der Gebäude nicht geeignet sind. Der rechnerisch max. Tidewasserstand der Bemessungsturmflut der Hochwasserschutzanlagen lag laut der zum Planungszeitpunkt vorhandenen Unterlagen bei etwa +7,30 m üNN. Die Grundwasserstände sind tidenabhängig. Es sind ein Tidenhub bis 4 m und die Sunkwirkung des Grundwassers im Baugrund bei den geotechnischen Nachweisen zu berücksichtigen.



Bild 3 Bau der U-Bahn-Trasse U4 in einer Trograu (Foto aus 2004)
Construction of the subway U4 using tray excavation (picture dated 2004)

2.1.2 U-Bahn-Linie U4

An der nordwestlichen Ecke des Grundstücks befindet sich im Baugrund der U-Bahn-Tunnel der U4 (Bild 2). Anfang der 2000er-Jahre wurde der Tunnel in einer nach oben offenen Trograu in Form von mehrfach gegeneinander ausgesteiften Schlitzwänden errichtet (Bild 3), die in einer Tiefe von etwa 30 m in den dichten Geschiebemergel einbinden. Dieser Trog wurde im Erdreich belassen und musste im Rahmen der Neubaumaßnahme beachtet werden.

Die Schlitzwände des U-Bahn-Trogs durften zur Gründung des Neubaus nicht, der U-Bahn-Tunnel an sich

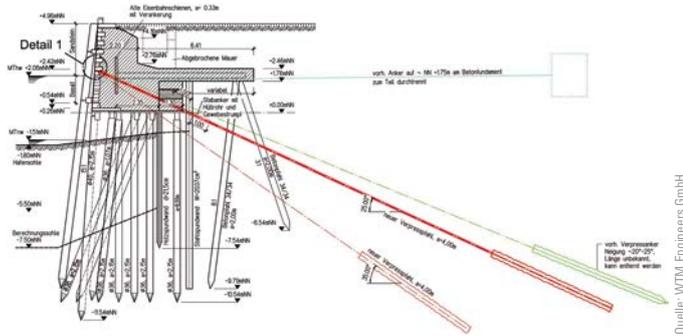


Bild 4 Schnitt durch die Kaimauer
Cross section of the quay wall

konnte jedoch zum Lastabtrag für Zusatzlasten herangezogen werden.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Hochbaulasten der beiden Hochbauten (Bauteile B und C) wie auch der Tiefgarage in die Tunnelkonstruktion über eine Flachgründung setzungsverträglich eingeleitet werden können.

2.1.3 Kaimauer

Richtung Magdeburger Hafen und Baakenhafen befindet sich im Baugrund eine Bestands-Stahlbetonwinkelstützwand als Kaimauer, die über Stahl- und Betonpfähle tiefgegründet und durch Anker im Baugrund des Baufelds rückverankert ist (Bild 4).

Bei der Planung und Ausführung des Neubaus musste beachtet werden, dass die Pfahlgründung der Gebäude nicht mit den Ankern der Kaimauer kollidiert, weshalb bei der Herstellung der Tiefgründung im Bereich der Kaimauer eine erhöhte Aufmerksamkeit durch das ausführende Unternehmen erforderlich war. Vorbereitend wurde hierfür ein Qualitätssicherungs- und Havariekonzept entwickelt.

2.2 Lastannahmen

Durch die exponierte Lage, aufgrund der komplizierten Randbedingungen zur Nachbarbebauung, durch die Höhe der Neubauten sowie die Einbindetiefen in den Baugrund waren besondere Lasten und Lastannahmen im Rahmen der Planung zu beachten. Nachfolgend seien die Lasten genannt, die nur durch spezielle Regelungen seitens der Freien und Hansestadt Hamburg abgedeckt sind oder wofür Versuche durchgeführt wurden.

2.2.1 Windkanaluntersuchungen am Modell

Zusätzlich zu DIN EN 1991-1-4 [1] wurden für das Gesamtprojekt die Windlasten mittels Windkanaluntersuchungen ermittelt. Dadurch konnte eine naturgetreue



Bild 5 Modell des Gebäudekomplexes IQ im Windkanal
Modell of the IQ building in the wind tunnel

Simulation des standortspezifischen, atmosphärischen Windfelds in der nahen Bauwerksumgebung durchgeführt werden. Bild 5 zeigt das Gebäudemodell im Windkanal.

2.2.2 Sonderlasten: Treibgutstoß/Eisdruck/Wellendruck/Sunk

Vor dem Hintergrund der Nähe zum Hamburger Hafen müssen in der Tragwerksbemessung Lasten aus Treibgutstoß angesetzt werden. Zudem können bei tidebelasteten Hafengebieten, wie es bei der HafenCity der Fall ist, aufgrund der variierenden Wasserstände in unterschiedlichen Höhen Lasten auf das Gebäude vorwiegend auf der Wasserseite (Luv-Seite) wirken, die statisch zu berücksichtigen sind.

Da das Gebiet der HafenCity noch vor der Hamburger Hauptdeichlinie liegt, mussten für diese Fläche technische und organisatorische Voraussetzungen geschaffen werden, die den Hochwasserschutz garantieren. Nach [2] sind für die Bemessung der Uferanlagen genannte Einflussparameter durch gesonderte Lastannahmen sowie Lastfälle zu berücksichtigen. Beispielhaft seien folgende Lastfälle erwähnt:

- Treibgutstoß
- Wellendruck
- Eisdruck
- Sunk

2.3 Bauteile

2.3.1 Baugrube

Bei der Einbindung des Bauteils *watermark* in den Baugrund mit zwei Untergeschossen und einer max. Aushubkote von etwa +0,50 m üNN konnte eine offene Baugrube mit offener Wasserhaltung ausgeführt werden.



Bild 6 Baugrubenverbau in Richtung Überseeallee
Building pit lining in direction Überseeallee

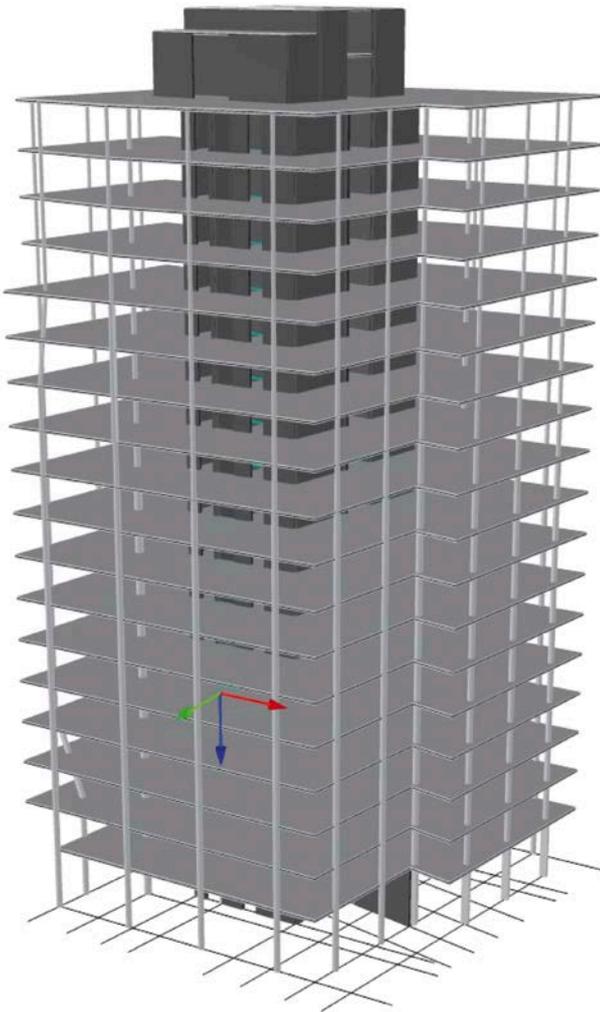


Bild 7 3-D-FEM-Berechnungsmodell
3-D FEM design model

Aufgrund der hohen Leitungsdichte im öffentlichen Straßenraum, der hohen Lasten aus der Straßennutzung und der hohen Verformungsrandbedingungen zur Straße wurde zur Überseeallee an der nördlichen Grundstücksgrenze eine einfach rückverankerte Bohrpfehlwand als steifer Verbau ausgeführt. Die aufgrund der tiefen Lage des tragfähigen Baugrunds sehr langen Anker der Bohrpfehlwand mussten teilweise durch die Schlitzwände des U-Bahn-Tunnels geführt werden, was mit Kernbohrungen realisiert wurde.

In Richtung HafenCity Universität (HCU) wurde ein Trägerbohlverbau (Berliner Verbau) gewählt, der einreihig in die Baugrube abgesteift wurde. In Richtung Süden und Westen grenzt das Grundstück mit der Kaimauer an den Baakenhafen (Süden) und Magdeburger Hafen (Westen). Hier genügte eine Böschung als Verbau, wobei die Böschungssicherung gegen Erosion mit Spritzbeton gewährleistet und auf der Böschungskrone ein Flutschutz mittels Big Bags errichtet wurde.

2.3.2 Gründung

Die Bauteile mussten überwiegend tiefgegründet werden. Aufgrund der hohen Grundwasserstände (Auftriebssicherung Gebäude) und der Sunkwirkung (erzeugt Gebäudeschrägstellung) mussten die Pfähle teilweise als Druck- und Zugglieder ausgebildet werden. Es wurden für das gesamte Projekt Teilverdrängungspfähle mit den Querschnitten 52 und 62 cm als wahlweise Einzelpfähle oder als Pfehlgruppen ausgeführt.

2.3.3 Tiefgarage – Bauteil T

Das UG war aufgrund der anstehenden Grundwasserverhältnisse gegen drückendes Grundwasser abzudichten und wurde als „Weiße Wanne“ nach WU-Richtlinie [3] ausgebildet. Weitere Zusatzmaßnahmen, wie z. B. die Verwendung einer Frischbetonverbundfolie, wurden im Bereich der Nutzungsklasse A gewählt, um das Risiko von wasserführenden Rissen zu verringern. Die Untergeschosse und die Bodenplatte wurden als fugenloses Bauwerk erstellt. Die Stahlbetonbodenplatte verfügt über eine Dicke von 0,50 m bis ca. 2,00 m.

2.3.4 watermark – Bauteil A Hochhaus

Das Hochhaus *watermark*, welches für Büronutzungen vorgesehen ist, wurde als Stahlbetonskelettbau konzipiert. Neben den zwei innen liegenden Erschließungskernen, die der Gebäudestabilisierung dienen, erfolgt der



Bild 8 Gebäudeschnitt durch Bauteil A – Schrägstützen, druckwasserdichte Fassade
Cross section of unit A – inclined compression members, watertight facade

vertikale Lastabtrag über die Stützen. Die Decken wurden als punktgestützte, unterzugsfreie Stahlbetondecken ausgeführt.

Das Gebäude wurde im Rahmen der Genehmigungsstatik mittels eines kompletten dreidimensionalen Finite-Element-Modells entsprechend Bild 7 bemessen und durch ebene Vergleichsrechnungen plausibilisiert.

Die Fassade ist nicht tragend ausgeführt, besteht aus einer keramischen Außenhaut und wird vorgehängt. Das Warftgeschoss (1. KG), welches zur Hafenseite frei zugänglich ist, musste durch einen Flutschutz gesichert werden. Im Projekt wurde ein kombinierter Flutschutz verwendet, der über zwei Schutzebenen verfügt. So wurde die Glasfassade des Warftgeschosses mit einer druckwasserfesten Fassade ausgebildet (Bild 8). Da dann im Zusammenhang mit den Sonderlasten aus Containerstoß eine unwirtschaftliche Konstruktion vorliegen würde, wurde im Projekt entschieden, im Innenraum des Warftgeschosses eine zweite Schutzlinie in Form der dort vorhandenen Stahlbetonwände anzuordnen (Bild 9).

2.3.5 shipyard – Bauteil B Bürogebäude

Bauteil B wurde wie auch Bauteil A als Bürogebäude konzipiert. Das Gebäude steht mit der westlichen Seite über dem U-Bahn-Tunnel. Aufgrund der geplanten Nutzung als Bürogebäude und der Lage zum U-Bahn-Tunnel war eine Schwingungsentkopplung hier nicht erforderlich.

2.3.6 freeport – Bauteil C Wohngebäude

Bauteil C ist ein Wohngebäude und wurde in Schottbauweise mit linienförmig gelagerten Flachdecken konzipiert. Um das Erdgeschoss in Stützen auflösen zu können, wurden weitgespannte wandartige Träger über dem EG ausgeführt. Im Gegensatz zu allen anderen Gebäuden, liegt

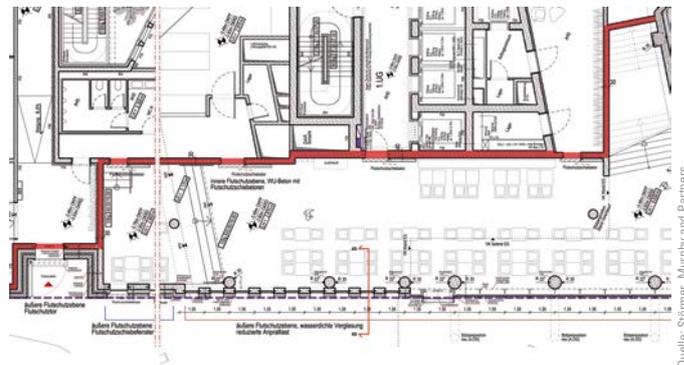


Bild 9 Flutschutz Bauteil A – hintere Schutzebene über Stahlbetonwände (rote Linie)
Flood protection unit A – rear protection level by reinforced concrete walls (red line)

Bauteil C fast vollständig über der U-Bahn-Linie 4. Vor dem Hintergrund der Nutzung als Wohngebäude liegen hohe Anforderungen an den Schallschutz vor. Aus diesem Grund wurden entsprechend den gutachterlichen Empfehlungen schwingungsdämpfende Maßnahmen gegen Erschütterungen durch den U-Bahn-Verkehr ausgeführt (Abschn. 3).

2.4 Tragwerksplanung

Üblicherweise wird aus Vereinfachungsgründen im Rahmen der Tragwerksplanung ein zu berechnendes Bauteil aus einem komplexen Bauwerk herausgelöst. Entscheidend für die Richtigkeit des Bemessungsergebnisses des „herausgelösten“ Bauteils ist, dass die Lagerungs- und Belastungsbedingungen das reale Umfeld möglichst wirklichkeitsnah abbilden. So haben nach [4] neben den elastischen Lagerungsbedingungen versteifende Bauteile mitunter signifikanten Einfluss auf die Tragwerkeigenschaften. Wird die Schnittgrößenverteilung des zu bemessenden Bauteils maßgeblich durch die Steifigkeitsverteilungen des realen Bauwerks beeinflusst und können die Steifigkeitsverteilungen nicht durch geeignete Maßnahmen im 2-D-Modell abgebildet werden, bleibt nur die Berechnung als 3-D-Modell. Nicht zuletzt infolge der stetigen Weiterentwicklung von Building Information Modeling und zunehmender Kapazitäten numerisch gestützter Berechnungs- und Bemessungsprogramme verbinden Ingenieure die Berechnung an einem komplexen Gesamtmodell mit einer wirklichkeitsnäheren Modellbildung und damit auch mit genaueren Ergebnissen. Es gibt allerdings Ausnahmen – sogar solche, bei denen die Berechnung am 3-D-Modell zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt. Um Verfälschungen der Ergebnisse am durchgeführten 3-D-Modell zu vermeiden, wurden für das Bauteil A folgende Einflussparameter in der Tragwerksplanung berücksichtigt:

- Bauablauf
- Baufortschritt
- Verformungszunahme nach Rohbaufertigstellung
- Bauwerksüberhöhungen

2.4.1 Bauablauf

Wie in [4] gezeigt, kann die Vernachlässigung des Einflusses des Bauablaufs zu erheblichen Abweichungen in der Schnittgrößenermittlung am Gesamtmodell führen. In [5, 6] ist beschrieben, dass die Betrachtung der elastischen Anteile der Stützenstauchungen im Bauzustand genügt. Die Vereinfachung begründet sich insbesondere auf dem zumeist bemessungsrelevanten Stabilitätsversagen, bei dem der Lasthorizont mitunter signifikant unter dem Querschnittsversagen liegen kann.

2.4.2 Baufortschritt

Der elastische Verformungseinfluss je Baufortschritt kann auf Grundlage der Elastizitätstheorie erfolgen. Hierbei sind eigentlich für jedes Geschoss die geschossweise auftretenden Lasten, die Stützenquerschnitte und die elastische Lagerung bei der Tragwerksberechnung zu berücksichtigen. Vereinfachend werden folgende Annahmen getroffen:

- vertikal starre Lagerung unter dem untersten Geschoss (Tiefgründung vorhanden)
- Dehnsteifigkeit ist über die gesamte Bauwerkshöhe annähernd konstant
- Lastzuwachs je Geschoss ist annähernd gleich
- Geschosshöhen h der „ n “-Geschosse variieren nur gering

Durch die Annahmen annähernd gleicher Dehnsteifigkeiten, Lastzuwächse und Geschosshöhen können diese Einflussparameter nach [4, 6] durch „1“ als Einheitsgröße substituiert werden. Daraus folgt, dass die Stützenstauchung im Geschoss k infolge Lastzunahme durch Baufortschritt proportional zum betrachteten Geschoss ist.

2.4.3 Verformungszunahme nach Rohbaufertigstellung

Nach Rohbaufertigstellung treten Beanspruchungen infolge Ausbau und Bauwerksnutzung auf. Aufbauend auf [6] kann die Stützenstauchung je Geschoss ebenfalls nach der Elastizitätstheorie berechnet werden.

2.4.4 Bauwerksüberhöhungen

Die Berechnungen der Stützenstauchungen im Bauzustand und im Endzustand nach dem Verfahren nach [6] basiert auf Einheitsgrößen. Analog dazu können die Stauchungen der signifikant steiferen Hochhauskerne bestimmt und das Maß der Differenzstauchung zwischen Kern und Stütze berechnet werden. Um große Differenzverformungen infolge baubedingter Stützenstauchungen zu vermeiden, werden bei Gebäuden mit mehreren Geschossen die Stützen überhöht ausgeführt. Nach ROMBACH [5] ist jedoch zu beachten, dass Verformungsberechnungen am numerischen Gesamtmodell nur für den Endzustand gelten. Die Berücksichtigung bauzustands-

bedingter Stützenüberhöhungen erfordert die Anpassung der Stützensteifigkeiten [5].

3 Schwingungsentkopplung

3.1 Einführung

Durch den U-Bahn-Verkehr werden Erschütterungen in den umgebenden Baugrund und folgend auf nahe gelegene Bauwerke übertragen. Je nach Anregungscharakteristik des Schienenverkehrs und der Beschaffenheit von Gründung und Tragwerkskonstruktion der Gebäude können die eingetragenen Erschütterungen zu spürbaren Deckenschwingungen oder hörbarem Sekundärluftschall führen.

Um die Immissionen schon frühzeitig, möglichst im Zuge der Tragwerksplanung ermitteln und beurteilen zu können, waren messtechnische Untersuchungen auf dem Baugrundstück durchzuführen. Ausgehend von diesen Schwingungsmessungen im Baugrund sollten die zu erwartenden Erschütterungsimmissionen für die Neubauten prognostiziert und nach Normen oder Vorgaben der Bauherrn bewertet werden.

So wurden für die Bauwerke *freeport* und *shipyard* dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle erstellt. Im Zuge der FE-Berechnungen erfolgte die detaillierte Abbildung der geplanten Baukonstruktion. Unter Einprägung der gemessenen dynamischen Lastfunktionen wurden die Bauteilschwingungen zunächst ohne, folgend – für das Wohngebäude *freeport* – mit Berücksichtigung von Dämmmaßnahmen berechnet. Für das Gebäude *shipyard* mit ausschließlicher Büronutzung waren daraufhin schwingungsmindernde Maßnahmen nicht erforderlich.

3.2 Anforderungen „Intelligent Quarters“

Die im vorliegenden Fall interessierende Beurteilung für Wohnungen und Schlafräume erfolgt nach DIN 4150, Teil 2, und erfordert einen Vergleich von messtechnisch oder durch Prognoseberechnungen für Fußböden ermittelten KB_{Fmax} -Werten mit Schwingstärkeanhaltswerten A aus der Norm.

Laut Flächennutzungsplan Hamburg ist das Baugrundstück als gemischte Baufläche (§7 BauNVO) eingestuft. Demnach können für die Beurteilung der Schwingungsimmissionen grundsätzlich die Anhaltswerte der DIN 4150-2, Tabelle 1, Zeile 3, angewendet werden. Aufgrund des erhöhten Komfortanspruchs wurden im vorliegenden Fall jedoch die Anhaltswerte der DIN 4150-2, Tabelle 1, Zeile 4 angesetzt:

- tags: $A_u = 0,15$ $A_o = 3$ $A_r = 0,07$
- nachts: $A_u = 0,1$ $A_o = 0,2$ $A_r = 0,05$

Zur Beurteilung von sekundären Luftschallpegeln in Innenräumen infolge der Anregung aus umliegendem

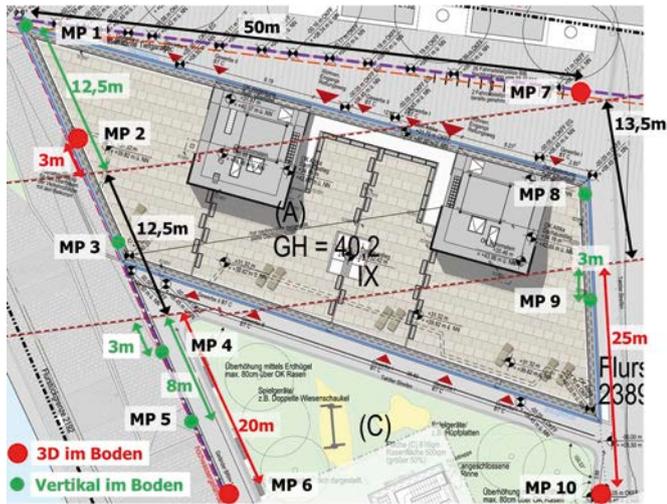


Bild 10 Skizze zur Lage der Messpunkte (MP)
Sketch of the location of the measuring points (MP)

Schienenverkehr können die 24. BImSchV, die TA-Lärm oder auch VDI 2719 herangezogen werden. Mit einem mittleren Maximalwertpegel von 27 dB(A) bzw. einem Mittelungspegel in der lautesten Nachtstunde von 20 dB(A) wurden seitens des Bauherrn für das Wohngebäude *freeport* im Vergleich zu den genannten Richtlinien noch deutlich höhere Komfortansprüche festgelegt.

Zum Schutz der Gebäude nahe des U-Bahn-Tunnels wurde seitens der HVV im Gleisbett der U4 eine Unterschottermatte eingebaut. Aufgrund der genannten sehr hohen Anforderungen an den Schwingungs- und vor allem Sekundärluftschallschutz war jedoch nicht davon auszugehen, dass die genannten Richtwerte im Gebäude *freeport*, welches unmittelbar oberhalb des Tunnels angeordnet werden sollte, sicher eingehalten werden können.

3.3 Schwingungsmessungen

Zur Erfassung der Schwingungsanregung durch den U-Bahn-Verkehr im Tunnel der U4 wurden Schwingungsmessungen sowohl auf dem Baufeld als auch an der Tunnelwand vorgenommen.

An den in Bild 10 eingezeichneten Baugrundmesspunkten, installiert in Schürfen, wurden die Freifeldschwingungen von 18 U-Bahn-Fahrten je Richtung erfasst. Bild 11 beinhaltet Grafiken der aus den Messergebnissen berechneten mittleren Terzspektralen der Schwinggeschwindigkeit. Den Spektren kann entnommen werden, dass die maßgeblichen Frequenzinhalte zwischen 30 Hz und 40 Hz bzw. für einzelne Messpunkte sehr tieffrequent unter 10 Hz zu finden sind.

Die gemessenen Schwingungsimmissionen sind unter Beachtung der seitens der HVV vorgesehenen Maßnahme zur Minderung der Emissionen mittels der Unterschottermatte gerade für den Frequenzbereich über 20 Hz als zu hoch zu bewerten.

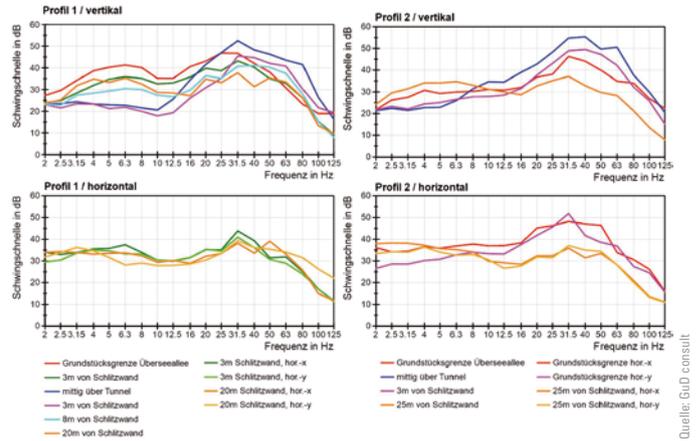


Bild 11 Gemessene Freifeldanregung in Form energetisch gemittelter Terzspektralen der Schwinggeschwindigkeit
Measured free field stimulation in the form of energetic mean terce spectra of the vibration velocity

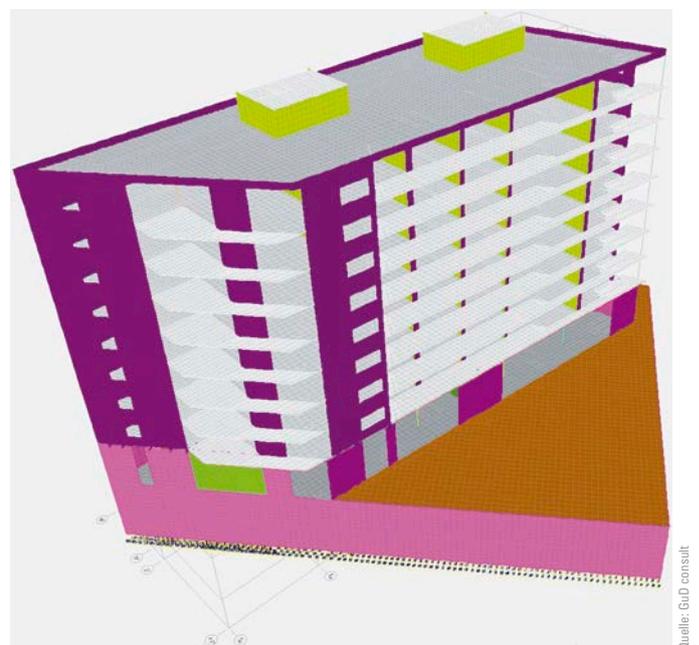


Bild 12 Finite Elemente-Modell Bauteil freeport
Finite element model unit freeport

3.4 Prognoseberechnungen

Zur Prognose von Erschütterungen in Gebäuden, die wie im vorliegenden Fall dicht an einer Erschütterungsquelle gegründet werden, waren komplexe Modelle wie die der Finiten Elemente erforderlich.

Hierzu wurde das *freeport* mit seinen acht OG, dem EG sowie zwei UG im Rohbau in Form von Balken-, Platten- und Volumenelementen in einem numerischen Modell abgebildet (Bild 12). Die UG verbinden das Bauwerk mit weiteren Gebäudeteilen des Bauvorhabens. Um den Lastabtrag des ab EG aufgehenden Bauwerks möglichst realitätsnah zu erfassen, war es erforderlich, für die UG einen größeren Bereich in die Abbildung einzubeziehen.

Aufgrund der nicht tragfähigen Bodenschichten unterhalb der geplanten Sohlplatte war eine Gründung auf Pfahltrag-

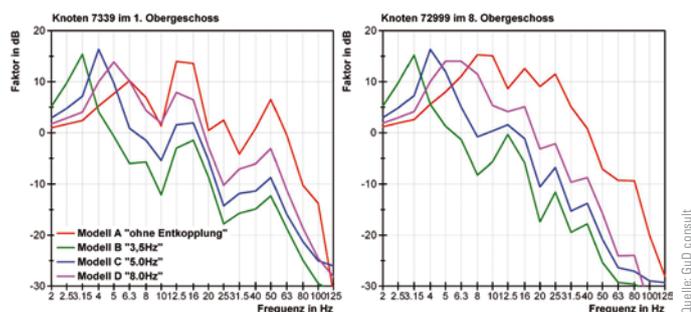


Bild 13 Übertragungsfunktionen Tragwerksdecke/Baugrund für die untersuchten Modellvarianten
Transfer functions floor/subsoil for the investigated model variants

gliedern in Form von Teilverdrängerpfählen erforderlich. Für diese wurden die dynamischen Ersatzsteifigkeiten mithilfe eines numerischen Berechnungsverfahrens abgeschätzt.

Aufgrund der hohen Anforderungen an den Schwingungsschutz wurde eine elastische Entkopplung erforderlich. Die Planung dafür sah die Trennung des EG von den weiteren aufgehenden Geschossen mittels Stahlfederdämpferelementen vor. Dem Planungsstand entsprechend Jan./Feb. 2015 konnten zunächst noch nicht die endgültigen Steifigkeiten für die vorgesehenen Stahlfederelemente der Firma Gerb berücksichtigt werden. Daher wurden die Abstimmfrequenzen innerhalb der Modellrechnung variiert. Diese Abstimmfrequenzen sind dabei theoretischer Natur und stellen die Resonanzfrequenz des Bauwerks oberhalb der elastischen Lager unter der Modellannahme eines starren Auflagers dar. Die zugehörigen Steifigkeits- und Dämpfungsparameter jedes einzelnen elastischen Lagers wurden unter Zugrundelegung der statischen Lasten an den lokalen Knotenpunkten der Lagerelemente bestimmt. Für alle Federelemente wurde eine viskose Dämpfung von 4% berücksichtigt.

Anhand der erstellten Modelle wurden die ersten Eigenfrequenzen und Eigenformen berechnet. Tab. 1 beinhaltet eine Auflistung der Eigenfrequenzen gleicher Eigenformen für vier Modellvarianten mit unterschiedlichen Abstimmfrequenzen. Es wird ersichtlich, dass sich aufgrund der Nachgiebigkeit der Gründung und des Bauwerks erwartungsgemäß tiefere Eigenfrequenzen für die Eigenformen des Baukörpers oberhalb des EG auf den Federelementen einstellen.

Die Schwingungsanregung des Gebäudes infolge des Schienenverkehrs erfolgt über den Baugrund bzw. die Pfahlgründung. An den Fußpunkten der Ersatz-Feder-

dämpferelemente konnte die Schwingungsanregung in Form eines „weißen Rauschens“, unter Berücksichtigung von entfernungsbedingter Amplitudenabnahme und Phasenlage, eingeprägt werden.

Aus den Schwingungsantworten an ausgewählten Knotenpunkten auf den Deckenfeldern wurden Übertragungsfunktionen „Freifeld→Deckenebene“ berechnet. Für jeweils einen Knotenpunkt auf den Fußböden im 1. und 8. OG wurden diese Übertragungsfunktionen für die vier untersuchten Modellvarianten gegenübergestellt. Sie verdeutlichen die Schwingungsreduktion in Abhängigkeit von der gewählten Abstimmfrequenz der Schwingungsentkopplung. Die max. Überhöhungen von bis zu 16 dB liegen in den vertikalen Systemeigenfrequenzen (Mode 4). Die Schwingungsreduktion im Frequenzbereich um 50 Hz, bezogen auf die Modellvariante A (ohne Entkopplungsmaßnahme), beträgt je nach Modell zwischen 10 und 18 dB.

Durch Multiplikation der Übertragungsfunktionen mit der gemessenen Freifeldanregung wurden für die vier untersuchten Modellvarianten die resultierenden KB-Werte und sekundären Luftschallpegel berechnet. Die prognostizierten Deckenschwingungen weisen generell Werte von $KB_{Fmax} < 0,1$ auf und liegen somit auch unterhalb der menschlichen Fühlbarkeitsschwelle. Die Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Deckenschwingungen werden auf Basis der Vorgaben der DIN 4150-2 auch ohne Berücksichtigung einer Entkopplungsmaßnahme im gesamten Gebäude *freeport* erfüllt.

Überschreitungen um bis zu 10 dB der Anforderungen an den sekundären Luftschall wurden demgegenüber für das nicht schwingungstechnisch entkoppelte Modell A berechnet. Für das 8-Hz-Modell wurde darüber hinaus für das 1. OG ein geringfügig höherer als der zulässige Wert für den mittleren Maximalwertpegel (27 dB(A)) prognostiziert.

Auf Grundlage der Prognoseergebnisse dieser Vorstudie wurde die Notwendigkeit bestätigt, die sekundären Luftschallpegel in den Wohneinheiten des Bauwerks mittels elastischer Lagerelemente zu reduzieren. Die Abstimmfrequenz für Gebäudelagerungen auf Stahlfederelementen liegt üblicherweise zwischen 3 Hz und 4 Hz. Daher wurde in Abstimmung mit dem Bauherrn und der Firma Gerb festgelegt, die OG auf Stahlfederelementen mit einer Abstimmfrequenz von 3,5 Hz bei einer Dämpfung von ca. 4% zu lagern.

Tab. 1 Eigenfrequenzen
Eigen frequencies

Modell/ Theoretische Abstimmfrequenz	Mode 1 Kippen	Mode 2 Torsion	Mode 3 Kippen	Mode 4 Vertikal
ohne Entkopplung	1,8 Hz	1,8 Hz	3,1 Hz	5,9 Hz
3,5 Hz	0,9 Hz	1,1 Hz	1,8 Hz	3,1 Hz
5,0 Hz	1,1 Hz	1,3 Hz	2,2 Hz	4,0 Hz
8,0 Hz	1,4 Hz	1,4 Hz	2,6 Hz	5,1 Hz



Bild 14 Installation der Feder-Dämpferelemente der Firma Gerb im Jahr 2016: a) Stahl-Feder-Dämpfer-Elemente in der Detailansicht nach Fertigstellung, b) Positionierung der Stahl-Feder-Dämpfer-Elemente auf den Wandscheiben

Installation of the spring damper elements of Gerb in 2016

3.5 Installation der Federelemente

Die Installation der Stahlfederdämpferelemente erfolgte im Sommer/Herbst 2016 und wurde durch einen Baudynamiker überwacht. Die unterschiedlich steifen Elemente mussten exakt entsprechend dem Lastabtrag bzw. nach Verlegeplan positioniert werden (Bild 14).

Die Stahlfederelemente wurden hierbei im vorgespannten Zustand installiert. Erst nach Fertigstellung des Rohbaus und somit der Aufbringung der maßgeblichen statischen Lasten wurden die Elemente entspannt, sodass die Schwingungsisolation wirksam wurde.

Neben der qualitätsgerechten Positionierung der Federdämpferelemente war im Zuge der Ausführungsplanung und folgend im Zuge des Baufortschritts auf zahlreiche Details zu achten, um die bewegliche Bauwerksfuge oberhalb des EG sicherzustellen. Hierbei war u.a. die qualitätsgerechte Ausführung der Entkopplung im Bereich der Aufzüge, der Innentrepfen, der Fassadenelemente sowie sämtlicher Rohrdurchführungen vom EG in das 1. OG zu gewährleisten.

3.6 Auswertung der Schwingungsmessungen nach Abschluss der Maßnahme

Im Jan. 2017 wurden Schwingungsmessungen im Rohbau und im Mai 2018 im fertiggestellten Gebäude durchgeführt. Während beider Messungen war nahezu die Gesamtmasse des Bauwerks wirksam und die Federelemente bereits entspannt. Auf verschiedenen Deckenebenen bzw. Deckenfeldern wurden Geofone zur Erfassung der vom U-Bahn-Verkehr ausgehenden Gebäudeschwingungen aufgestellt.

Nach Auswertung und Vergleich der registrierten Messdaten mit den Prognosedaten konnte bestätigt werden, dass die seitens des Bauherrn gestellten Anforderungen im gesamten Gebäude erfüllt werden.

Darüber hinaus zeigen die relativ hohen Messergebnisse bzgl. des sekundären Luftschalls im nicht schwingungsentkoppelten EG, dass ein Verzicht auf die zusätzliche schwingungsmindernde Maßnahme in den oberen Geschossen zu einer Überschreitung der Richtwerte geführt hätte. Die hohen Komfortansprüche für die Eigentumswohnungen konnten somit nur mittels einer Schwingungsisolation in der Art, wie sie für dieses Projekt detailliert geplant wurde, erzielt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Joint Venture zwischen der ECE Projektmanagement GmbH & Co. KG und der Strabag Real Estate GmbH hat direkt an der Elbe zwischen dem Magdeburger Hafen, Baakenhafen und der HafenCity Universität das Projekt „Intelligent Quarters“ umgesetzt. Es entstand im Zentrum der HafenCity ein neues Quartier mit einem weit sichtbaren, rd. 70 m hohen, 18-geschossigen Bürohochhaus sowie zwei weiteren Gebäuden und einer zweigeschossigen Tiefgarage auf einer Grundstücksfläche von etwa 9 100 m². Neben den sich aus der exponierten, flussnahen Lage ergebenden Anforderungen an das Gebäude mussten bei der Auslegung des Gebäudekomplexes Einflüsse aus der mehrgeschossigen Bauweise sowie der überbauten U-Bahn-Linie U4 beachtet werden. Der vorliegende Beitrag gibt einen Einblick in die Komplexität des Bauwerkskomplexes „Intelligent Quarters“ in der Hafencity in Hamburg und berichtet über die ingenieurmäßige Vorgehensweise bei der Auslegung schwingungsentkoppelter Hochhäuser. Die Arbeitsgemeinschaft, bestehend aus den Ingenieurbüros grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG, Hannover und GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin. Sie hat das Projekt von der Entwurfs- bis zur Ausführungsphase begleitet. Dabei konnten mittels numerischer Berechnungen die Einflüsse aus Bauwerksanregung durch U-Bahn-Verkehr approximiert und erforderliche schwingungsentkoppelnde Maßnahmen ausgelegt werden, deren Eignung durch In-situ-Messungen verifiziert wurde.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei allen am Bauprojekt beteiligten Personen. Ein besonderer Dank geht an die Bauherrn von der ECE Projektmanagement GmbH & Co. KG sowie der Strabag Real Estate GmbH, das Architekturbüro Störmer, Murphy and Partner, den Generalbauunternehmer BAM sowie die Prüfingenieure von wkc, Hamburg.

Literatur

- [1] DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1 (2010) Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten. Berlin: Beuth Verlag. Ausgabe Dez. 2010.
- [2] Freie und Hansestadt Hamburg – Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer [Hrsg.] (2002) *Sollhöhen und Lastannahmen für den Stadtteil HafenCity*.
- [3] DAfStb-Richtlinie (2006) Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie), inkl. Erläuterungen. DAfStb-Heft 555. Berlin: Beuth Verlag.
- [4] Lochte-Holtgreven, S. (2017) *Hochhaus „Grandaire“ Voltairestraße, Berlin-Mitte – Statik von komplexen räumlichen Tragsystemen* [online]. Vortrag grbv Symposium, Hannover, 5. Sept. 2017. http://www.hs-bremen.de/internet/de/forschung/veroeffentlichungen/detail/index_63360.html
- [5] Rombach, G. (2011) *Tragwerksplanung am Gesamtmodell – Realität – Modellprobleme – Prüfung* in: Landesvereinigung der Prüfengeure Baden-Württemberg [Hrsg.] Tagungsbericht 39. Arbeitstagung Baden-Baden, 1./2. Juli 2011.
- [6] Weischede, D.; Stumpf, M.; Spreng, S. (2010) *Bürohochhaus im Palais Quartier – ein besonderes Bauprojekt in der Innenstadt von Frankfurt/Main* in: Bautechnik 87, H. 4, S. 195–203.

Autoren

Dipl.-Ing. Thomas Hensel
t.hensel@grbv.de
grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG
Wichmannstraße 6
10787 Berlin

Dipl.-Ing. (FH) Michael Wiechert
m.wiechert@grbv.de
grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG
Wichmannstraße 6
10787 Berlin

Dr.-Ing. Silke Appel
appel@gudconsult.de
GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH
Darwinstraße 13
10589 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Stephan Lochte-Holtgreven (Korrespondenzautor)
stephan.lochte-holtgreven@hs-bremen.de
Hochschule Bremen
Fakultät Architektur, Bau und Umwelt
Lehrstuhl für Stahlbau und Statik
Neustadtswall 30
28199 Bremen

Zitieren Sie diesen Beitrag

Lochte-Holtgreven, S.; Hensel, Th.; Wiechert, M.; Appel, S. (2020) *Intelligent Quarters Hamburg*. Bautechnik 97, H. 3, S. 197-206. <https://doi.org/10.1002/bate.201900049>



INGENIEURE IM BAUWESEN

Hauptsitz Hannover

Expo Plaza 10
30539 Hannover
Telefon +49 511 98494-0
Telefax +49 511 98494-20
info@grbv.de
www.grbv.de

Niederlassung Berlin

Wichmannstraße 6
10787 Berlin
Telefon +49 30 3001316-0
Telefax +49 30 3001316-20
berlin@grbv.de

Wasserbau

Hochbau

Ingenieurbau

Industriebau

Windenergie