



## Geotechnische Aspekte beim Bau der Großforschungsanlage FAIR

Dipl.-Ing. Wolfgang Kissel  
Dipl.-Ing. Engin Tokar  
Prof. Dr.-Ing. Oliver Reul



# Geotechnische Aspekte beim Bau der Großforschungsanlage FAIR

In Darmstadt entsteht derzeit mit dem neuen Teilchenbeschleuniger FAIR eine der weltweit größten Forschungsanlagen. Herzstück von FAIR ist ein großer, unterirdischer Ringbeschleuniger von 1,1 km Länge, an den sich 24 Gebäude und Tunnelabschnitte anschließen, die Raum bieten für 3,5 km Strahlführung, für Experimentier- und Speicherringe sowie für riesige Teilchendetektoren. Wegen der Anforderungen des Strahlenschutzes sind die Wände und Decken der Bauwerke, deren Gründungssohle sich z. T. bis 21 m unter der Geländeoberfläche befindet, bis zu 8 m dick.

Um die In-situ-Verformungseigenschaften des Baugrunds, i. W. kompressible Ablagerungen des Pliozän und Miozän, besser einschätzen zu können, wurde eine Probeschüttung aufgebracht sowie Pfahlprobelastungen und Ankerzugversuche durchgeführt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen sowie von 3D-Finite-Elemente-Berechnungen wurden als Gründungen für die setzungsempfindlichen Bauwerke Kombinierte Pfahl-Plattengründungen gewählt, mit denen die Setzungen und die Winkelverdrehungen auf ein verträgliches Maß reduziert werden. In der ersten Bauphase wurden bereits ca. 1350 Gründungspfähle mit einer Gesamtbohrlänge (inkl. Leerbohrungen) von rd. 60000 m und max. Bohrlängen von bis zu 62 m hergestellt.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Ergebnisse der Probelastungen präsentiert sowie geotechnische Aspekte bei der Planung der tiefen Baugruben und der Gründung im Hinblick auf die außergewöhnlichen Projekttrandbedingungen diskutiert.

**Keywords** Pfahlprobelastung; Probeschüttung; Kombinierte Pfahl-Plattengründung; Numerische Berechnungen; tiefe Baugrube; Grundwasserabsenkung

## 1 Vorhaben

In Darmstadt wird angrenzend an das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI) in den kommenden Jahren ein neues, internationales Beschleunigerzentrum für die Forschung mit Ionen und Antiprotonen entstehen. FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research ist eines der größten Forschungsvorhaben und komplexesten Beschleunigerzentren weltweit und wird eine große Vielfalt an Experimenten ermöglichen.

FAIR wird östlich der seit 1969 bestehenden GSI-Forschungsanlage auf einer Fläche von 20 ha errichtet (Bild 1), da die bestehenden GSI-Beschleuniger als Vorbeschleuniger genutzt werden. Für das Herzstück der

## Geotechnical aspects in the construction of the major research facility FAIR

With the new particle accelerator FAIR one of the world's largest research facilities is currently designed and built in Darmstadt. The centerpiece of FAIR is a large underground ring accelerator with a length of 1.1 km, connected to 24 buildings and tunnel sections that provide space for 3.5 km of beam guidance, for experimental and storage rings, as well as for giant particle detectors. Because of the requirements of radiation protection, the walls and ceilings of the buildings, some of them with foundation levels 21 m below ground level, are up to 8 m thick.

In order to evaluate the in-situ stiffness of the soil layers (mainly compressible soils of the Pliocene and Miocene) a test embankment was applied and pile load tests as well as anchor pull-out tests have been carried out. Based on these investigations and 3D finite element analyses, it was decided to found the structures extremely sensitive to deformations on piled rafts, which allow for a reduction of settlements, differential settlements and rotations to a tolerable level. In a first construction phase, approximately 1,350 foundation piles with a total drilling length of approximately 60,000 m (including empty bores) and maximum drill lengths of up to 62 m have already been installed.

Within the scope of this paper, the results of the load tests are presented as well as geotechnical aspects in the design of the deep excavations and the foundation with regard to the exceptional project boundary conditions.

**Keywords** pile load test; test embankment; piled raft; numerical simulation; deep excavation; groundwater draw down

Anlage, einen Kreisbeschleuniger von 1,1 km Umfang (SIS100, Bild 2), wird ein Tunnel bis ca. 19,5 m unter der Erde gebaut. Die zugehörigen 24 Gebäude und Tunnelabschnitte bieten auf 62000 m<sup>2</sup> Nutzfläche Platz für insgesamt 3,5 km Strahlführungsrohre, für Experimentier- und Speicherringe sowie für ausgedehnte Teilchendetektoren. Zudem muss hier eine komplexe technische Infrastruktur untergebracht werden, die von der Stromversorgung bis hin zur Kryotechnik reicht, da teilweise supraleitende Magnete den Teilchenstrahl führen. Daran angeschlossen und funktional sowie baulich miteinander verbunden finden sich verschiedene ober- und unterirdische Gebäude und Tunnelanlagen, die Experimente, Labore sowie Betriebs- und Versorgungsbauwerke beherbergen (Bild 2). Die bis zu sechsgeschossigen Bauwerke mit einer max.



**Bild 1** Luftbild GSI (links) und FAIR (Modell, rechts)  
Aerial image of GSI (left) and FAIR (model, right)

Geschosshöhe von ca. 21 m über Gelände werden zum Zweck des Strahlenschutzes bis max. ca. 20 m über Gelände überschüttet.

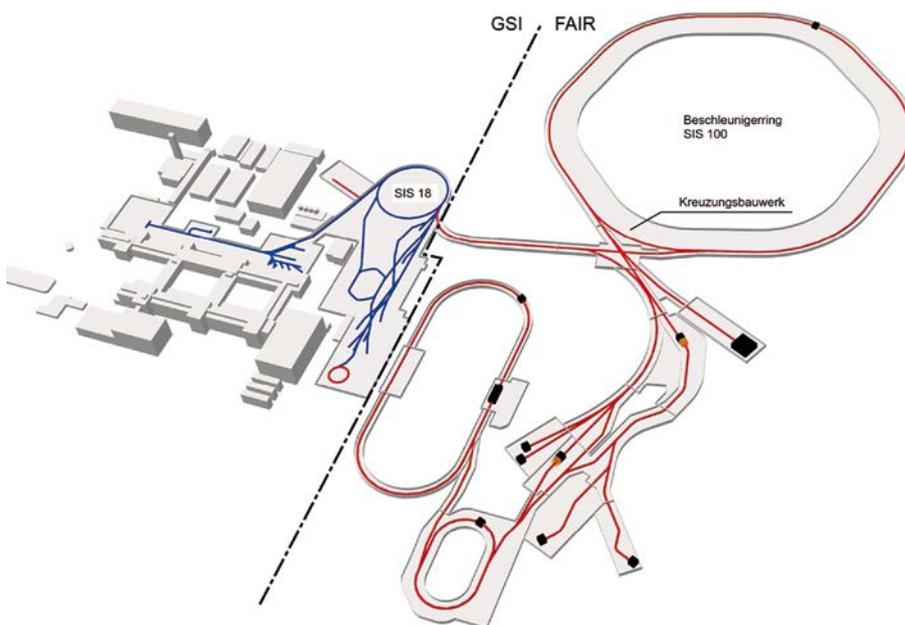
Aufgrund der bei den Forschungsexperimenten entstehenden hochenergetischen Strahlung muss der Beton der Gebäude und der Bauteilbereiche, die der Strahlung ausgesetzt sein werden, als Abschirmung dienen. Er wird deshalb so ausgelegt, dass er die ionisierten Teilchen aufnehmen und absorbieren kann und diese den Beton nicht durchdringen können. Diese Anforderung bedingt erhebliche Bauteildicken und Betonmassen, sodass insgesamt  $600\,000\text{ m}^3$  Beton und  $35\,000\text{ t}$  Baustahl verbaut werden. Eine gewisse Strahlungsmenge wird aber dennoch das Bauteil durchdringen, sodass zur weiteren Abschirmung ergänzend auch Erdschüttungen mit einer definierten Mindestrohichte vorgesehen sind. Durch eine zusätzliche Außenabdichtung muss zudem sichergestellt werden, dass die von der Betonmasse abgebremsten und absorbierten Teilchen nicht durch – infolge hydrostatischen Grundwasserdrucks oder aufgrund von Kapillarkräften – in den Beton eindringendes Grundwasser mobilisiert

werden und so nach außen ins Erdreich gelangen können. Die Außenabdichtung wird lückenlos aufgebracht, weshalb im vorliegenden Fall Gründungspfähle ohne Anschlussbewehrung stumpf an die Fundamentplatten stoßen.

## 2 Baugrundsituation

Das Planungsgebiet liegt nördlich von Darmstadt im Bereich des Oberrheingrabens. Zur Erkundung des Baugrunds wurden mehrere Kampagnen durchgeführt. In den verschiedenen Erkundungsphasen von 2000–2008 [1] wurde der Baugrund mit insgesamt 3700 Bohr-m in 68 Aufschlussbohrungen bis zu einer Tiefe von 80 m erkundet. Ergänzt wurden die Bohrungen durch Feldversuche, wie z. B. Bohrlochaufweitungsversuche, Rammsondierungen, Standard-Penetration-Tests und Pumpversuche, zur Bestimmung des Verformungsverhaltens und der Durchlässigkeit des Baugrunds sowie seismische Bohrlochmessungen mittels Down-Hole-Methode (siehe z. B. [2]), mit denen in vier Bohrlöchern die Scherwellen- und Kompressionswellengeschwindigkeit bestimmt wurden. Zudem wurden mit einem umfangreichen bodenmechanischen Laborversuchsprogramm bodenphysikalische Kennwerte, Scherfestigkeit, Kompressibilität und Verdichtbarkeit der anstehenden Böden bestimmt. Zur konkreten Planung der Baugrube des Ringtunnels im Bauabschnitt Nord (SIS100, Bild 2) wurden 2016 weitere 20 Kernbohrungen bis in Tiefen von max. 34 m abgeteuft.

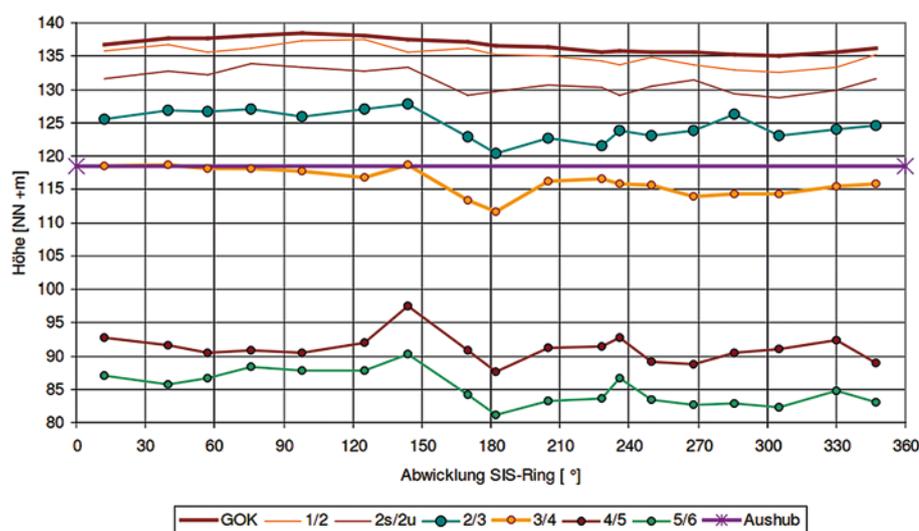
Gemäß den Ergebnissen der Baugrunderkundung [1] stehen auf dem Projektgelände zuoberst mit einer Mächtigkeit von ca. 20 m quartäre Sedimente an, die vorwiegend aus schluffigen Fein- und Mittelsanden sowie sandigen Schluffen zusammengesetzt sind. Im Liegenden folgen



**Bild 2** Beschleunigerring FAIR  
Accelerator facility FAIR

**Tab. 1** Baugrundaufbau im Planungsgebiet [1]  
Soil profile in the project area [1]

Schicht	Beschreibung	mittlere Mächtigkeit [m]	
1	Oberboden und holozäne Sande	schluffige Fein- bis Mittelsande	1,6
2	Pleistozäne Sande (2s) und Schluffe (2u)	im oberen Bereich enggestufte schluffige Fein- bis Mittelsande (Schicht 2s), gefolgt von tonigen Schluffen mit eingebetteten schluffigen Sandlagen (Schicht 2u)	10,7
3	Untere pleistozäne Sande	schluffige Fein- bis Mittelsande	8,7
4	Pliozäne Sande (4s) und Tone (4t)	unregelmäßiger Wechsel von schluffigen Tonen (Schicht 4t) und schluffigen Sanden (Schicht 4s)	24,9
5	Tertiäre Tone	schluffige Tone, an der Basis braunkohlehaltig	7,0
6	Tertiäre Klebsande und Tone	stark mittel- bis grobsandige schluffige Tone und Sand-Ton-Gemische	> 20

**Bild 3** Verlauf der Schichtgrenzen entlang der Abwicklung des Beschleunigerrings SIS100 [1]  
Gradient of soil layer boundaries along the accelerator ring SIS100 [1]

tertiäre Ablagerungen des Pliozän und Miozän, die im Randbereich des Oberrheingrabens Mächtigkeiten bis ca. 75 m erreichen. Die Böden des Tertiärs werden überwiegend aus Tonen und Sanden, untergeordnet auch aus Braunkohlen gebildet. Das Grundwasser steht oberflächennah mit einem Flurabstand von 2 m bis 5 m an, wobei die pleistozänen Sande den Hauptgrundwasserleiter darstellen. Der Baugrundaufbau im Projektgebiet ist in Tab. 1 zusammengestellt. Bild 3 zeigt den Verlauf der Schichtgrenzen entlang der Abwicklung des geplanten Beschleunigerrings (SIS100, Bild 2).

### 3 Probelastungen

#### 3.1 Motivation

Zur Verbesserung der Planungs- und Kostensicherheit wurden im Jahr 2011 weitergehende Erkundungsmaßnahmen durchgeführt. Im Einzelnen handelte es sich um Pfahlprobelastungen, Ankerzugversuche und eine Pro-

beschüttung sowie zusätzliche Aufschlussbohrungen an dem jeweiligen Versuchsstandort.

#### 3.2 Pfahlprobelastungen

An drei verrohrt hergestellten Bohrpfählen (Pfahldurchmesser  $d_p = 1,2$  m) wurden lastgesteuerte, statische Pfahlprobelastungen nach dem Osterberg-Verfahren [3] zur Ermittlung der charakteristischen Pfahlwiderstände durchgeführt. Die Unterkante der Probepfähle lag dabei in bis zu ca. 60 m Tiefe, wobei die Bohrlöcher oberhalb des betonierten Abschnitts bis zur Geländeoberkante mit Kies verfüllt wurden. Bei der Ausführung der Pfahlbohrarbeiten musste eine Entsandungsanlage im Lufthebeverfahren eingesetzt werden, um das Bohrwasser von den Feinteilen aus den sandigen Bodenschichten zu reinigen.

Beim Osterberg-Verfahren wird eine hydraulische Presse in den Bewehrungskorb der Pfähle eingebaut, die das obere und das untere Pfahlsegment mit einer steuerbaren



**Bild 4** Statische Pfahlprobelastungen nach dem Osterberg-Verfahren  
 Static pile load test based on the Osterberg method – measurement devices

Last auseinanderdrückt. Die Länge der Pfahlsegmente variierte für die einzelnen Probepfähle zwischen 6 m und 11,7 m, wobei die Segmentlängen und die Tiefenlagen der Osterberg-Zellen so gewählt wurden, dass die aufbringbare Kraft eine Verschiebung der Pfahlsegmente zuließ und im oberen und unteren Pfahlsegment theoretisch etwa der gleiche Grenzpfahlwiderstand mobilisiert werden konnte. Die Pfahlverformungen wurden entsprechend den in der EA-Pfähle [4] definierten hohen Anforderungen an jedem Probepfahl mittels in fünf bis sieben Ebenen jeweils paarweise installierten Dehnungsaufnehmern, jeweils vier Wegaufnehmer im Bereich der Osterberg-Zelle sowie jeweils zwei Wegaufnehmer am Pfahlkopf und Pfahlfuß, beobachtet. Der aufgebrauchte Pressendruck in den einzelnen Laststufen wurde mittels eines Manometers und eines Drucksensors unabhängig voneinander gemessen. Bild 4 zeigt beispielhaft die Instrumentierung eines Probepfahls.

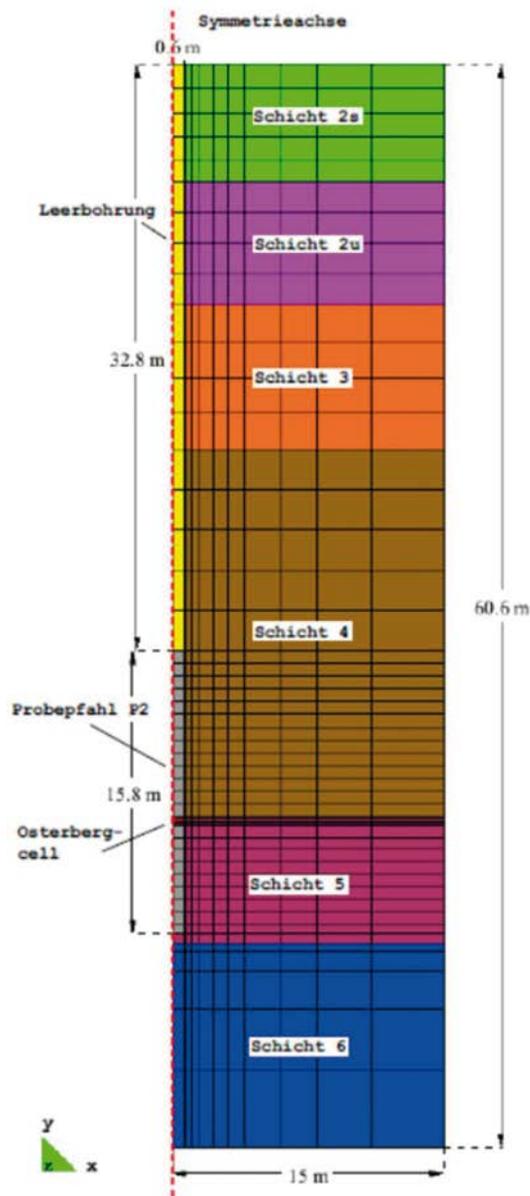
Im Ergebnis der Probelastungen wurden bei Prüfkraften zwischen  $P_p = 3,2 \text{ MN}$  und  $P_p = 6,9 \text{ MN}$  Verschiebungen des oberen Pfahlsegments von ca.  $u = 5,4 \text{ cm}$  bis  $u = 13,3 \text{ cm}$  gemessen. Die auf Grundlage der Grenztragfähigkeiten aus dem Gründungsgutachten [1] abgeschätzten Pfahlwiderstände wurden mit den max. Prüfkraften bei allen Probepfählen erreicht. Die aus den Messwerten der Dehnungsaufnehmer und der Pfahlsteifigkeit ermittelten Grenzwerte der Mantelreibung lagen innerhalb der unteren pleistozänen Sande (Schicht 3) überwiegend bei rd.  $q_s = 100 \text{ kN/m}^2$ . Innerhalb der pliozänen Sande und Tone (Schicht 4) und der tertiären Tone (Schicht 5) schwankten die Messwerte in Abhängigkeit vom lokal vorhandenen Sandgehalt stark, sodass dort Grenzwerte der Mantelreibung zwischen rd.  $q_s = 60 \text{ kN/m}^2$  und  $q_s = 200 \text{ kN/m}^2$  gemessen wurden. Der Grenzwert des Spitzendrucks wurde mit  $q_b \geq 1300 \text{ kN/m}^2$  (Schicht 4) bis  $q_b \geq 1600 \text{ kN/m}^2$  (Schicht 5) ermittelt.

Zur Kalibrierung des Berechnungsmodells für die Setzungsberechnungen der geplanten FAIR-Anlage wurden die Probelastungen im Sinne einer back-analysis mithilfe von Finite-Elemente-Berechnungen numerisch simuliert (Bild 5). Die in den Nachrechnungen verwendeten Stoffkennwerte des elastoplastischen Hardening-Soil-Modells [5] zur Beschreibung des Materialverhaltens des Untergrunds wurden dabei innerhalb realistischer Grenzen bis zu einer ausreichenden Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen und den Berechnungen variiert. Die Bilder 5b und 5c zeigen am Beispiel der Widerstandsetzungslinien der beiden Pfahlsegmente und der Pfahlkraftverläufe die Gegenüberstellung der Mess- und Berechnungswerte.

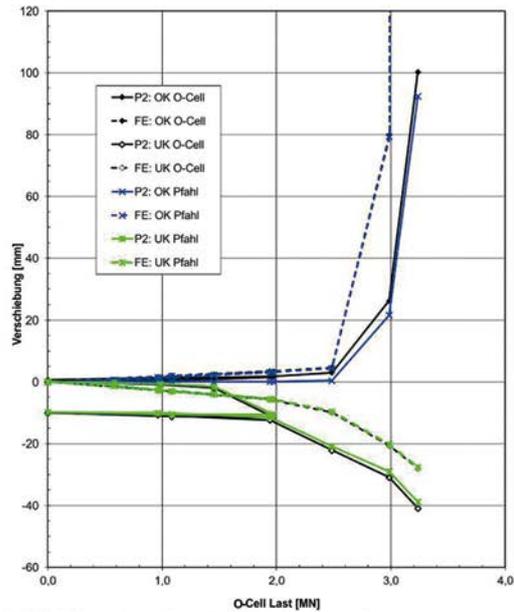
### 3.3 Ankerzugversuche

Aufgrund der zur Sicherung der Baugruben erforderlichen großen Anzahl von Anker und der damit verbundenen wirtschaftlichen Relevanz wurden zur Verbesserung der Planungs- und Kostensicherheit Zugversuche gemäß DIN EN 1537 [6] an zwölf vertikalen Verpressankern durchgeführt. Die Ankerprüfungen dienen der Ermittlung der charakteristischen Herausziehwiderstände von Verpressankern in den für den Baugrubenverbau maßgeblichen Baugrundsichten. Die lokale Baugrundsichtung wurde am Standort der Ankerzugversuche durch zusätzliche Baugrundaufschlüsse ermittelt.

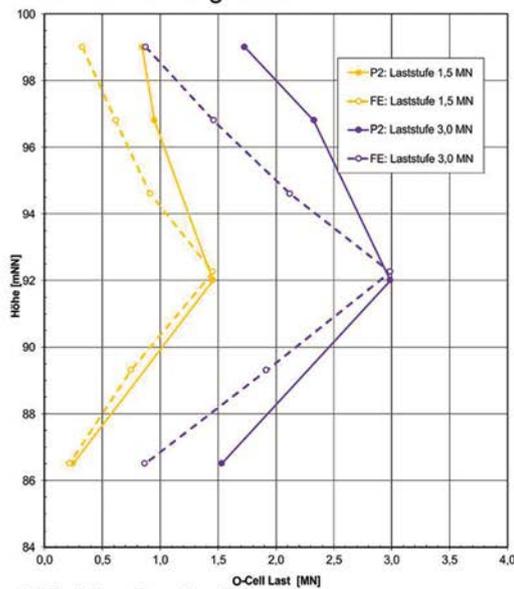
Bei den Probeankern handelte es sich um  $8 \times 0,6''$  Litzenanker mit einer Krafteintragungslänge von  $L_{\text{fixed}} = 6 \text{ m}$ , deren Herstellung bis zur Endtiefe verrohrt ( $d = 13,3 \text{ cm}$ ) mit Wasserspülung erfolgte. Nach dem Erhärten des Verpressguts wurde mit Verpressmörtel zweimal nachverpresst, wobei für die Zementsuspension CEM I 32,5R



a) Finite Elemente Netz



b) Widerstandssetzungslinien der beiden Pfahlsegmente



c) Pfahlkraftverlauf

**Bild 5** Kalibrierung des Berechnungsmodells durch Nachrechnung der Probebelastung an Pfahl P2  
Calibration of the numerical model by means of a back-analysis of the load test on pile P2

verwendet wurde. Bild 6 zeigt den Versuchsaufbau für die Ankerprüfungen.

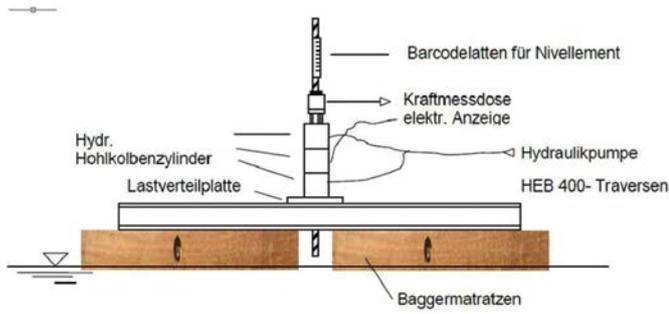
Die in den Ankerzugversuchen gemessene Bandbreite der Herauszieh Widerstände  $R_{a,m}$  ist in Tab. 2 für die drei untersuchten Baugrundsichten zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Ankerzugversuche weisen für die Anker mit Krafteintragungslängen in den Schichten 2u und 3 vergleichsweise hohe Herauszieh Widerstände auf. Für Schicht 2u war hierfür der mit rd. 35% im Bereich des Testfelds vergleichsweise hohe Sandanteil ursächlich. Gemäß [1] variiert der Anteil der in den Schluffen der Schicht 2u eingelagerten schluffigen Fein- bis Mittelsande von schwach bis stark. Die als Grundlage für die Planung

der Baugrubensicherung anzusetzenden charakteristischen Herauszieh Widerstände  $R_{a,k}$  wurden daher im Vergleich zu den in den Ankerzugversuchen gemessenen Herauszieh Widerständen  $R_{a,m}$  abgemindert.

### 3.4 Probeschüttung

Um die In-situ-Verformungseigenschaften des oberflächennahen Baugrunds und dessen Zeit-Setzungsverhalten besser einschätzen zu können, wurde auf einer Fläche von 20 m × 20 m eine rd. 5 m hohe Schüttung (Bild 7a) aufgebracht und deren Setzungsverhalten mittels elektronischen Horizontal-Inklinometerketten und Sohldruckgebern in der Aufstandsfläche sowie Extensometern



a) Systemskizze



b) Ansicht während der Ausführung

Quelle: Stitzer: Arbeitsgemeinschaft Probabelastung FAIR Darmstadt

**Bild 6** Versuchsaufbau für die Ankerprüfungen (oben: Systemskizze, unten: Foto während der Ausführung)  
Test set-up for the tests on ground anchors

(Bild 7b) gemessen. Größere Schüttkörper waren aufgrund der begrenzt verfügbaren Flächen zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

Die Setzungen der Inklinometer lagen in der Mitte der Probeschüttung bei rd.  $s = 15$  mm. Anhand des Vierfach-

**Tab. 2** Ergebnisse der Ankerzugversuche  
Results of the tensile tests on ground anchors

Schicht	Gemessener Herauszieh-widerstand $R_{a,m}$ [kN]
2u Pleistozäne Schluffe	960 bis 1 100
3 Untere pleistozäne Sande	$\geq 1 460$ bis $\geq 1 600$
4 Pliozäne Sande und Tone	490 bis $\geq 650$

Extensometers E2, dessen Verankerungsstellen in Tiefen von 7 m, 20 m, 35 m und 61 m unter Gelände lagen, wurden Verformungen bis in 35 m Tiefe in mm-Größenordnung gemessen. Zur Kalibrierung des Berechnungsmodells für die Setzungsberechnungen der geplanten FAIR-Anlage wurde die Probeschüttung im Sinne einer back-analysis mithilfe von dreidimensionalen Finite-Elemente-Berechnungen (3-D FE) numerisch simuliert (Bild 8). Dabei wurde eine schrittweise Abfolge der Belastungszustände aus der Schüttung simuliert. Auf Grundlage der Ergebnisse der back-analysis konnte die Steifigkeit der oberflächennahen Schichten in den nachfolgenden Verformungsberechnungen zur Gründungsoptimierung erhöht werden.

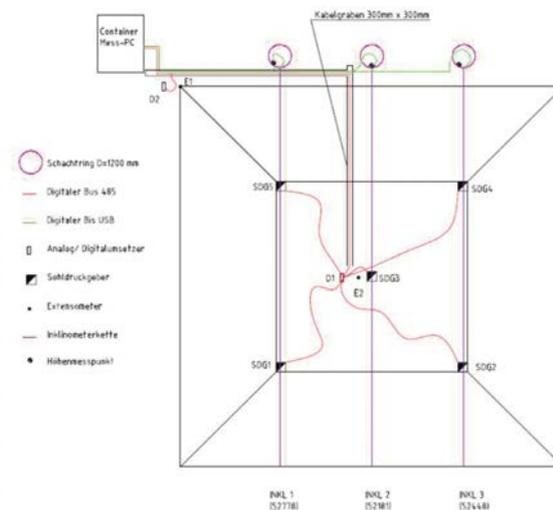
## 4 Tiefbaumaßnahmen

### 4.1 Gründung

Die Gründungselemente der Forschungsanlage dienen der sicheren Abtragung der aus den Bauwerken und Überschüttungen resultierenden hohen Lasten in den anstehenden Baugrund. Mit den Erkenntnissen aus der Baugrunderkundung und der Probelastungen wurden Varianten zur Gründung der Forschungsanlage untersucht. Dabei war zu beachten, dass ein Teil der Gebäude

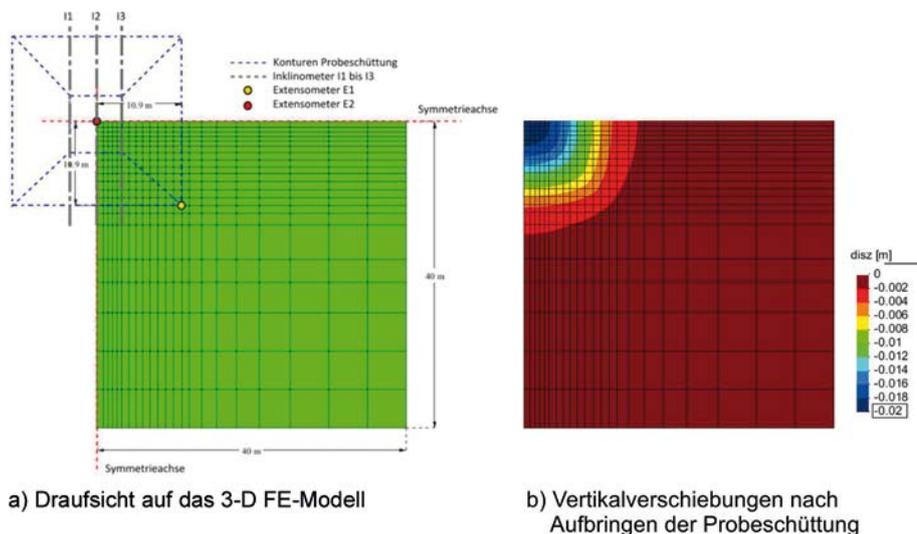


a) Ansicht



b) Instrumentierung

**Bild 7** Probeschüttung  
Test embankment



**Bild 8** Kalibrierung des Berechnungsmodells durch Nachrechnung der Probeschüttung  
Calibration of the numerical model by means of a back-analysis of the test embankment

bis zu 21 m tief unter Gelände und damit bereichsweise auf der Schichtoberkante der tertiären Tone gegründet, während sich die Gründungssohlen der hoch liegenden Gebäude in den quartären Sanden und Schluffen befinden.

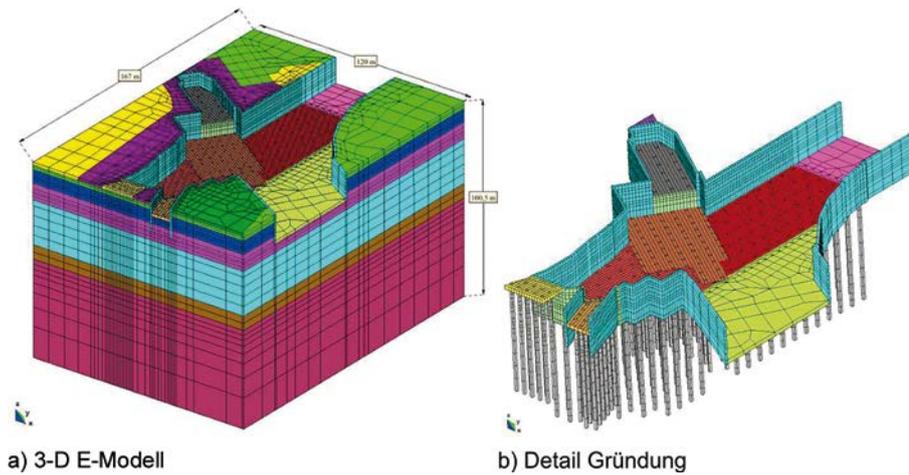
Da für die zunächst untersuchte Referenzvariante einer Flächengründung auf einer Last verteilenden Fundamentplatte stark variierende Setzungen in der Größenordnung zwischen  $s = 5$  cm und  $s = 40$  cm und unverträgliche Winkelverdrehungen von bis zu  $1/250$  prognostiziert wurden, war die Anordnung von Bohrpfählen als Setzungsbremse zur Gewährleistung einer gebrauchstauglichen Gründung erforderlich. Mit zunehmender Planungstiefe wurde die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP), die sich zur Abtragung von hohen Bauwerkslasten in verformungsempfindlichem Baugrund in besonderem Maße bewährt hat (siehe z. B. [7, 8]), als wirtschaftlichste Lösung herausgearbeitet. Mit der gezielten Anordnung von Pfählen unter den schweren Bauteilen und dem Heranziehen der Fundamentplatte zum Lastabtrag können mit der KPP die Setzungen vergleichmäßig und die Winkelverdrehungen auf ein verträgliches Maß reduziert werden. Zudem wird die Zeitdauer bis zum Abklingen der Setzungen verringert, wodurch der Einbau der verformungsempfindlichen Anlagentechnik zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen kann.

Die Verformungsanalysen für die Optimierung der KPP wurden auf der Grundlage der durch die back-analysis der Probelastungen kalibrierten Bodenkennwerte durchgeführt. Aufgrund der enormen Grundfläche der Forschungsanlage wurde das Tragverhalten der Bauwerke mit insgesamt sieben sich überlappenden Teilmodellen simuliert. Bild 9 zeigt ein dreidimensionales Finite-Elemente-Netz beispielhaft für das Berechnungsmodell des Kreuzungsbauwerks (s. Bild 2). Die einzelnen FE-Modelle bestehen aus bis zu 450 000 quaderförmigen, achtknotigen Elementen mit linearem Verschiebungsansatz.

Im Rahmen der Verformungsanalysen wurden die Pfahlanordnung und die Pfahllängenstaffelung so optimiert, dass sich für die Bauwerke verträgliche Winkelverdrehungen von  $< 1/500$  ergaben. Die rechnerisch prognostizierten Endsetzungen liegen nunmehr bei rd.  $s = 5$  cm für den Beschleunigerring SIS100 und bei bis zu  $s = 16$  cm für die übrigen Forschungsgebäude, wobei bei aneinandergrenzenden Gebäuden vergleichbare Setzungen auftreten, sodass die Verdrehungen gering und die Setzungen insgesamt als verträglich einzustufen sind. Aus den Berechnungen resultiert ferner, dass die auf die Forschungsanlagen wirkenden Setzungen stark von dem Zeitpunkt des Einbaus der Überschüttung der Gebäude abhängig sind, sodass die Überschüttung möglichst weit vorausgehend zur Installation der wissenschaftlichen Anlagen erfolgen sollte.

Wesentlich für die Bestimmung des richtigen Einbauzeitpunkts sind die Ergebnisse der baubegleitenden Setzungsmessungen, die im Rahmen eines umfangreichen Messprogramms durchgeführt werden. Hierzu gehören neben den ca. 140 geplanten geodätischen Messpunkten auf Oberkante Fundamentplatte auch geotechnische Messungen zur Überprüfung des Tragverhaltens und des Kraftflusses der KPP entsprechend der KPP-Richtlinie [9]. Es werden Sohl- und Porenwasserdruckgeber unter der Fundamentplatte, Kraftmessdosen, Dehnungsaufnehmer und Integralmesselemente in den Pfählen sowie Extensometer unter den seitlichen Schüttflächen eingebaut und ab Herstellung der Baugruben bis zum Abklingen der Setzungen gemessen.

Die zu Planungsbeginn abgeschätzte Gesamtpfahllänge von  $n \times L_p = 109\,000$  m konnte im Zuge der Gründungsoptimierung auf  $n \times L_p = 50\,000$  m reduziert werden. Die ca. 1350 Stück Gründungspfähle ( $d_p = 1,2$  m) der kombinierten Pfahl-Plattengründung weisen Längen bis zu 55 m unterhalb der Gründungssohle auf und wurden im ersten Bauabschnitt des Vorhabens im Zeitraum März 2013 bis



**Bild 9** 3D FE-Modell für das Kreuzungsbauwerk  
3D finite element model of the intersection building

Mai 2014 bereits hergestellt [10]. Einige Bauwerke (wie z. B. der Beschleunigerring SIS100, Bild 2) erhalten eine Flächengründung auf Fundamentplatten. Die Fundamentplatten der einzelnen Bauwerke sind monolithisch miteinander verbunden.

## 4.2 Baugrube und Wasserhaltung

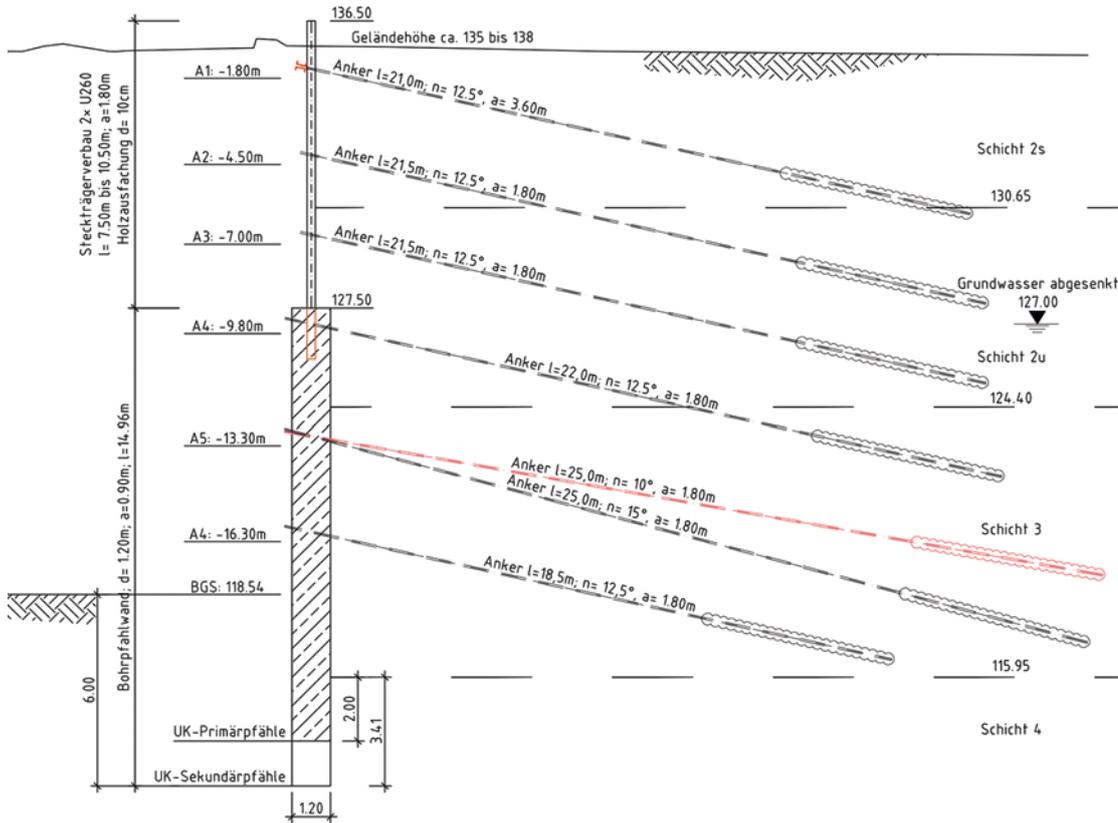
Der überwiegende Teil der Baugrubenumschließung der Baugrube des Beschleunigerrings SIS100 ist als mehrfach verankerte, überschnittene Bohrpfehlwand  $d_p = 1,2$  m geplant. Die Höhe des zu sichernden Geländesprungs beträgt bis zu rd. 20 m. Der Bereich bis ca. 9 m unter GOK ist aufgrund wasserrechtlicher Belange als durchlässiger Steckträgerverbau mit Holzausfachung vorgesehen. Das Grundwasser wird in diesem Bereich generell durch Brunnen um ca. 6 m abgesenkt. Lokal sind größere Absenkziele um bis zu ca. 12 m erforderlich. Bild 10 zeigt den Prinzipschnitt des Baugrubenverbaus im Bereich des Beschleunigerrings gemäß Entwurfsplanung für den Anlagenbereich Nord. Die Baugruben der hoch liegenden Bauwerke im Anlagenbereich Süd werden überwiegend geböscht hergestellt. Die Absenkziele betragen dort bis zu ca. 3 m.

Die messtechnische Überwachung des Baugrubenverbaus erfolgt mittels Inklinometermessungen, geodätischer Messpunkte auf und an der Verbauwand und Ankerkraftmessungen (Bild 11). Hierzu ist die Anordnung von insgesamt 14 Messquerschnitten geplant. Die Messung der Kopfverformungen soll an den 14 Messquerschnitten (an Inklinometerköpfen) sowie an weiteren 31 Messpunkten erfolgen. Ferner sind an den Messquerschnitten über die Tiefe verteilt geodätische Messpunkte (bis zu drei Punkte je Messquerschnitt) angeordnet. Die Inklinometermessungen erfolgen über elektronische Messketten in den Messquerschnitten. An allen Ankerlagen der gewählten Messquerschnitte werden die Ankerkräfte mit Druckmessdosen vom Einbau bis zum Verfüllen des Arbeitsraums in der jeweiligen Höhe gemessen.

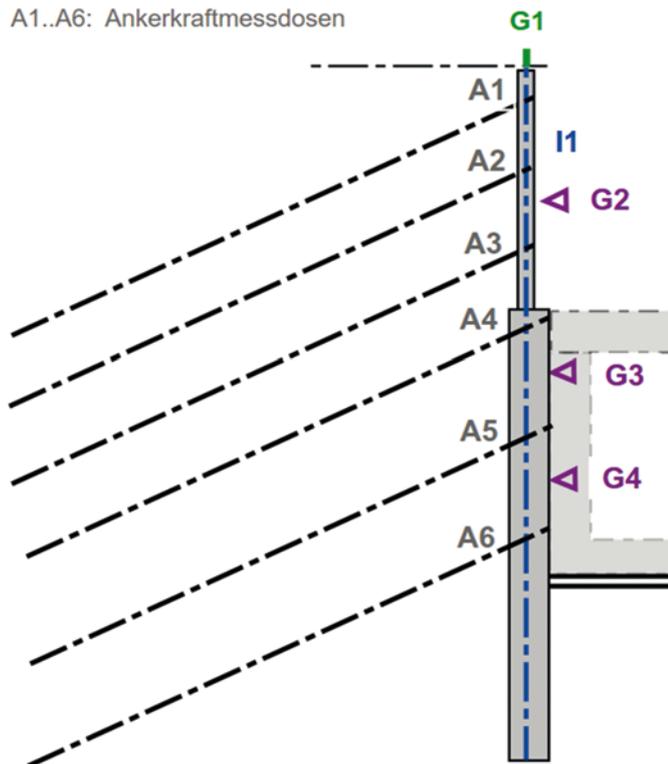
Die Entnahmebrunnen zur Grundwasserhaltung werden im Bau Feld Nord zwischen der Rückverankerung der Baugrubensicherung in einem Abstand von rd. 20 m angeordnet. Die nach den derzeitigen Bauablaufplanungen ca. 168 Brunnen werden mit Bohrtiefen bis 25 m bis auf die Basis des Grundwasserleiters (OK Schicht 4) abgeteuft. Durch die enge Brunnenanordnung werden Redundanzen bei Ausfall einzelner Pumpen geschaffen. Die Förderraten der Brunnenpumpen betragen nach Modellberechnungen [11] zwischen ca.  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Es ist vorgesehen, das geförderte Grundwasser bei mittleren und niedrigen Grundwasserständen vollständig über 74 Infiltrationsbrunnen in den Untergrund zu reinfiltrieren. Das Grundwassermanagement ist damit bilanzneutral und der regionale Grundwasserhaushalt wird nicht beeinflusst. Bei hohen Grundwasserständen ist u. U. temporär eine geringfügige Ableitung von bis zu  $10 \text{ l/s}$  in eine benachbarte natürliche Vorflut erforderlich, um die naturschutzfachlich begründeten Zielgrundwasserstände an ausgewählten, bereits vorhandenen Überwachungsmessstellen einzuhalten und vorhandene Gebäude der GSI vor Vernässungen zu schützen.

Durch die Grundwasserentnahme in den äußeren Absenkbrunnen kann die Druckhöhe der Sand-/Schlufflinien in der tonigen Aquiferbasis (Schicht 4) nicht gesichert reduziert werden. Für die Wasserhaltung im Inneren der Baugrube sind daher Entspannungsbohrungen und Entspannungsbrunnen sowie eine offene Wasserhaltung vorgesehen. Die Entspannungsbohrungen dienen dem Potenzialabbau dieses tief liegenden gespannten Grundwasserleiters. Weiterhin sind die Entspannungsbrunnen in der Aushubzone verfiltert und werden aktiv bepumpt, um den Grundwasserspiegel im wasserundurchlässigen Bereich der Baugrube (überschnittene Bohrpfehlwände) abzusinken, die Restwasserhaltung sicherzustellen und das über die Entspannungsbohrungen zutretende Wasser abzuführen. Unterstützend sollen sie auch zum Lenzen im wasserdurchlässigen Bereich der Baugrube (Steckträger) eingesetzt werden.



- G1: Geodätischer Messpunkt (Lage + Höhe)
- G2..G4: Geodätischer Messpunkt (Lage + Höhe)
- I1 : Inklinometer
- A1..A6: Ankerkraftmessdosen



Sowohl die Entspannungsbrunnen als auch die Entspannungsbohrungen sind im Endaushubzustand und während der Rohbauarbeiten und Rückverfüllung aktiv. Das über die mittleren Entspannungsbrunnen und Entspannungsbohrungen zuströmende Wasser wird bis zur Gewährleistung der Auftriebssicherheit über einen Sohlfilter und die außerhalb des Rohbaus im Arbeitsraum befindlichen Entspannungsbrunnen abgefördert.

Zur Sicherstellung der Wasserwegsamkeit im Endzustand ist im Bereich des Beschleunigerrings oberhalb der Tunneldecke der Einbau eines Flächenfilters mit einer Dicke von 1 m vorgesehen.

**Projektbeteiligte**

- |  |   |
|--|---|
| Baugrundgutachten:   | Dipl.-Ing. W. Romberg Beratender Ingenieur  |
| Gründungsplanung, Geotechnische Begleitung und Planung Baugrube: | CDM Smith Consult GmbH  |
| Grundwassermanagement:   | Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH   |
| Prüfer:  | Prof. Dipl.-Ing. GÜNTER ERNST   |
| Geotechnischer Prüfsachverständiger:                             | Prof. Dr.-Ing. MATTHIAS VOGLER  |
| Projektsteuerung:  | Drees & Sommer Frankfurt GmbH   |
| Planung:   | Arge ion42, bestehend aus DGI Bauwerk und schneider+schumacher Architekten  |
| Tragwerksplanung:  | Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG  |
| Ausführung Probelastungen:                                       | Arbeitsgemeinschaft Probelastung FAIR Darmstadt, bestehend aus BAUER Spezialtiefbau GmbH und Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH |

## Literatur

- [1] Dipl.-Ing. W. Romberg Beratender Ingenieur: *Geotechnisches Standortgutachten; Teil 1: Baugrundgutachten vom 26.06.2008. Geotechnisches Standortgutachten; Teil 2: Gründungsgutachten (Rev C) vom 25.06.2009.*
- [2] VRETOS, C.: *Bodendynamik.* In: Witt, K.-J. (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, 7. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [3] OSTERBERG, J. O.: *New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing.* Int. Conf. On Piling and Deep Foundations, London: Balkema, 1989, S. 421–431.
- [4] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), AK 2.1: *Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle – EA Pfähle.* 2. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [5] FEAT: *Tochnog Professional.* 2017.
- [6] DIN EN 1537: *Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau), Verpressanker.* Juli 2014.
- [7] REUL, O.; RANDOLPH, M. F.: *Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 130 (2004), No. 1, pp. 1–13.
- [8] REUL, O.: *Entwurfsoptimierung von Hochhausgründungen.* Bauingenieur 85 (2010), H. 4, S. 177–187.
- [9] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)/Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): *Richtlinie für den Entwurf, die Bemessung und den Bau von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen (KPP) – KPP-Richtlinie.* 2001.
- [10] MOSER, M.; KULLMANN, S.; KISSEL, W.; TOKER, E.; BERNARDS, M.: *Mehr als 1.300 Bohrpfähle für Teilchenbeschleuniger „FAIR“ in Darmstadt.* BBR – Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie, Jahresmagazin 65 (2014), H. 12, S. 36–42.
- [11] BGS Umweltplanung GmbH: *Grundwassermanagement (äußere Wasserhaltung), Erläuterungsbericht zur Entwurfs- und Ausführungsplanung.* Mai 2017.

### Autoren

Dipl.-Ing. Wolfgang Kissel  
CDM Smith Consult GmbH  
Neue Bergstr. 13  
64665 Alsbach  
wolfgang.kissel@cdmsmith.com

Dipl.-Ing. Engin Toker  
CDM Smith Consult GmbH  
Neue Bergstr. 13  
64665 Alsbach  
engin.toker@cdmsmith.com

Prof. Dr.-Ing. Oliver Reul  
Universität Kassel  
Fachgebiet Geotechnik  
Mönchebergstr. 7  
34125 Kassel  
o.reul@uni-kassel.de



**CDM  
Smith**

**Neubau des internationalen  
Beschleunigerzentrums FAIR**

Geotechnische Beratung  
Objekt- und Tragwerksplanung Baugrube  
Fachbauüberwachung

cdmsmith.com

Beratung · Planung · Bauüberwachung