Digitalisierung in der Geotechnik

Digitalisierung in der Geotechnik – Zum Arbeitsstand des Arbeitskreises 2.14 der DGGT . . 211
Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jörg Bauer / Dr. rer. nat. Michael Molzahn / Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke / Dr. rer. nat. Klaus Tilger

Brenner-Nordzulauf – Digitales Planen eines Großprojektes mit Hilfe von Baugrundmodellen . . 221
Helena Loga M.Sc. / Meike Paeslack B.Eng

Erfahrungen beim Einsatz des digitalen Zwillings während der Bauausführung von geotextilummantelten Sandsäulen am Autobahnprojekt A26 Los 3.2 Hamburg 231
Dipl.- Ing. (FH) Daniel F. Scheer / Dipl.- Ing Marcus Daubner

Fachmodell Baugrund – Möglichkeiten und Herausforderungen am Beispiel der DB NBS Gelnhausen – Fulda 237
Dr.-Ing. Lisa Wilfing / Thomas Hausperger / Dr. Joachim Michael / Dipl.-Ing. Simon Hippe / Thomas Schneider

Normung / Eurocode 7

Aktuelle Entwicklungen zur Finalisierung der zweiten Generation des Eurocode 7 245
Dr.-Ing. Stefan Weihrauch / Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann / Dr.-Ing. Robert.-B. Wudtke / Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt

Bauen im Bestand

Hochhaus MYND – Komplexer Spezialtiefbau in einem Bestandsgebäude 257
Dr.-Ing. Simon Meißner / Maximilian Kies M.Eng. / Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter / Dipl.-Ing. Bianca Prohl

Bahnprojekt Stuttgart-Ulm:
Abfangung der Bruckwiesenwegbrücke für den Vortrieb der Tunnel nach Obertürkheim 267
André Reinhardt M.Eng. L.LM / Dr.-Ing. Martin Wittke / Prof. Dr.-Ing. Michael Blaschko

Hochhausgründung neben sensitiven Infrastrukturbauwerken 273
Dipl.-Ing. Matthias Seip / Mohamed Hassan M.Sc. / Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach / Prof. Dr.-Ing. Steffen Leppla

Digitalisierung in der Geotechnik – Zum Arbeitsstand des Arbeitskreises 2.14 der DGGT

Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jörg Bauer, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr. rer. nat. Michael Molzahn, DB Netz AG, Hamburg
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
Dr. rer. nat. Klaus Tilger, A+S Consult GmbH, Dresden

Infolge der in den letzten Jahren stetig zunehmenden Anzahl von BIM-Projekten wird vermehrt eine Berücksichtigung des digitalen Baugrundmodells in den Projekten eingefordert. Mit dem Ziel der Erarbeitung von Empfehlungen für den Umgang mit BIM in der Geotechnik wurde 2018 der Arbeitskreis 2.14 „Digitalisierung in der Geotechnik" der DGGT gegründet. Der vorliegende Beitrag berichtet von dessen Arbeitsstand und zeigt noch zu erarbeitende Voraussetzungen für BIM auf.

1 Einleitung

Nach der Einführung von Building-Information-Modeling (BIM) für alle neuen Infrastrukturprojekte von öffentlichen Auftraggebern im Verantwortungsbereich des *Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)* im Jahr 2015 (BMVI, 2015) soll spätestens ab dem Jahr 2025 eine flächendeckende Anwendung von BIM als Regelprozess erfolgen.

Mit BIM wird eine Arbeitsmethode bezeichnet, bei der alle Informationen eines Hochbau- oder Infrastrukturprojekts in einem Gesamtmodell erfasst, verwaltet und zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht werden. Diese Informationen umfassen den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts – also von der Planung und Ausführung bis zum Betrieb. Das Gesamtmodell ergibt sich dabei aus der Gesamtheit aller einzelnen, gewerkspezifischen Fachmodelle, die je nach Zuständigkeit von den Projektbeteiligten erstellt werden. So liefern bspw. der Vermesser sein Fachmodell mit dem Digitalen Geländemodell (DGM), der Sachverständige für Geotechnik das Fachmodell Baugrund und die Planer Fachmodelle mit den Planungsinhalten wie z.B. Baugruben, Gründungselemente und Bauwerke. Die Interaktion dieser einzelnen Fachmodelle findet im Gesamtmodell statt (Abbildung 1-1).

Mit der Einführung von BIM ergeben sich für alle Projektbeteiligten auf Auftraggeber- wie Auftragnehmerseite viele Herausforderungen und Fragen. Zur Erfahrungsgewinnung der technischen Umsetzbarkeit von BIM sowie zur Herausarbeitung von offenen Fragestellungen und Lösungsstrategien wurden bereits unmittelbar nach Veröffentlichung von BMVI (2015) Pilotprojekte im Verkehrswasserbau, Eisenbahnbau und Straßenbau initiiert. Diese Pilotprojekte waren zumeist Bauprojekte, die unabhängig von BIM bereits große technische Herausforderungen darstellen und lange Laufzeiten bei der Planung und Umsetzung erforderten. Die Geotechnik fand dabei kaum eine Beachtung.

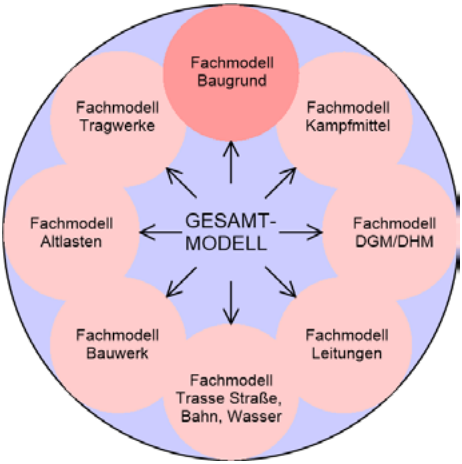

Abbildung 1-1: Einbettung des Fachmodells Baugrund im Gesamtmodell aus Molzahn et al. (2021a)

Inzwischen wird BIM auch bei einer stetig zunehmenden Anzahl kleinerer Bauprojekte angewendet. Dabei versuchen die öffentlichen Auftraggeber ihrer Verpflichtung zur Implementierung von BIM nachzukommen und Erfahrungen auf technischer und organisatorischer Ebene zu gewinnen. Auch Auftragnehmer bieten zunehmend die Anwendung von BIM zur eigenen Erfahrungssammlung und zur Generierung eigener Referenzprojekte an – nicht selten auch, obwohl der Auftraggeber die Anwendung von BIM im Projekt gar nicht explizit fordert. Mit dieser Zunahme von BIM-Projekten rückt auch die Geotechnik zunehmend in den Fokus.

2 Aktueller Stand der Umsetzung von BIM in der Verkehrsinfrastruktur

Im Anschluss an die Veröffentlichung des *Stufenplans Digitales Planen und Bauen* (BMVI, 2015) wurden vom BMDV bis heute über 50 weitere Dokumente zu BIM in der Infrastruktur veröffentlicht. Diese enthalten u. a. Definitionen und Konzepte und sind Leitfäden und Vorlagen für die Umsetzung von BIM. Des Weiteren liegen Berichte zu den Ergebnissen von Pilotprojekten vor (abrufbar unter https://www.bimdeutschland.de/service/downloads). Mit dem Ziel, die Aktivitäten, Erkenntnisse und Erfahrungen zum Einsatz von BIM zusammenzuführen, wurde 2020 vom *BMDV* und dem *Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI)* die Arbeitsgruppe *BIM Deutschland* gegründet, die neben der Informationsbündelung u. a. auch die für BIM notwendigen Standardisierungen vorantreiben soll.

Als maßgebliche Organisation zur Förderung einer BIM-Strategie, unabhängig von konkreten Softwareanbietern (*openBIM*), ist international *buildingSMART* tätig. Unter anderem wurde von *buildingSMART* das Datenformat *IFC* entwickelt, das seine Entwicklungsgrundlage jedoch im Hochbau und nicht im Infrastrukturbau hat. *IFC* dient der Datenübergabe von beliebigen geometrischen und beschreibenden Informationen (*properties*) zwischen Softwareapplikationen, unabhängig vom konkreten Anbieter der verwendeten Softwareapplikation. Dabei enthält *IFC* neben frei definierbaren auch vordefinierte (und damit standardisierte) Angabemöglichkeiten wie bspw. die Betonfestigkeitsklasse eines Betonbauteils im *property „StrengthClass"*. Damit ist *IFC* teilweise auch eine Datenbank. Und da die Speicherung von Informationen in einer Datenbank nach bestimmten Schemata erfolgen muss, ist *IFC* zudem ein Datenmodell.

Wird also *IFC* für die Datenübergabe in einem BIM-Projekt genutzt, müssen die zu übergebenden Informationen auch in dieses Datenmodell passen oder ggf. passend gemacht werden. Dies stellt bei üblicherweise komplexen geotechnischen Informationen eine große Herausforderung dar.

Nach der Entwicklung von *IFC4* für die Beschreibung von Gebäudemodellen wird derzeit mit *IFC5* eine um den Infrastrukturbau erweiterte Version entwickelt. Die Standardisierung von Informationen im *IFC* erfolgt auf internationaler und nationaler Ebene. National weist *buildingSMART Deutschland* dafür etwa 20 Fach- und Projektgruppen für alle Bereiche des Bauwesens auf.

Eine weitere Aktivität von *buildingSMART* ist die Schaffung von internationalen Standards (ISO).

Zwecks der zentralen Sammlung und Verwaltung von vordefinierten (standardisierten) Informationen wurde von *BIM Deutschland das BIM-Portal* initiiert, welches ab Sommer 2022 öffentlich nutzbar sein soll. Darin können zugelassene Nutzer neue Informationen als zukünftige Standards vorschlagen, die dann von weiteren Rollen wie Genehmiger und Prüfer ggf. dauerhaft in die Datenbank überführt werden. Unklar ist derzeit noch, wer die vorgeschlagenen Standards prüft. Dafür wird neben einem fundierten Wissen in der jeweiligen Ingenieurwissenschaft auch mindestens ein Grundwissen in Datenbanktechnik erforderlich sein (Abschnitt 5).

Neben den genannten Akteuren gibt es im BIM-Kontext in Deutschland eine schier unübersichtliche Anzahl von weiteren Verbänden, Fachgruppen und Arbeitskreisen. Eine Zusammenstellung von Aktivi-

täten mit dem Fokus auf die Geotechnik enthält Bauer (2022a).

Mit dem Ziel der Erarbeitung von Empfehlungen für den Umgang mit BIM in der Geotechnik wurde im Jahr 2018 der Arbeitskreis 2.14 *Digitalisierung in der Geotechnik der DGGT* gegründet.

3 Der AK 2.14 der DGGT

Im Dezember 2017 wurde vom Arbeitskreis *BIM im Spezialtiefbau der Bundesfachabteilung Spezialtiefbau im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.* in einem Technischen Positionspapier (Bundesfachabteilung Spezialtiefbau, 2017) die Erarbeitung eines digitalen Modells des Baugrundes als Grundlage für die Planung und die Ausführung von Spezialtiefbaumaßnahmen gefordert. Bereits einige Monate später traten initiiert von der Deutschen Bahn im Februar 2018 erstmals 11 Teilnehmer von Infrastrukturträgern des Bundes, Ingenieurbüros, Softwareentwicklern und Unternehmen des Baugewerbes in Berlin zusammen, u.a. um von dem jeweiligen Arbeitsstand zu BIM in der Geotechnik zu berichten und offene Fragestellungen zu formulieren. Dabei zeigte sich, dass zu BIM in der Geotechnik kaum allgemeingültige Definitionen existieren und die Vorstellungen über die erforderlichen Inhalte eines solchen digitalen Modells des Baugrundes weit auseinanderliegen. Zudem waren die Ideen zur Herangehensweise und Umsetzung von BIM bei den Geotechnikern und Softwareentwicklern grundverschieden.

In der dritten Sitzung im September 2018 in Berlin wurde beschlossen, den Arbeitskreis als *AK 2.14* unter dem Dach der *Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)* in der *Fachsektion Erd- und Grundbau* anzusiedeln. Damit einhergehend wurde der anfängliche Arbeitskreistitel *BIM in der Geotechnik*, mit der Zielsetzung auch Themen wie die digitale Baustelle zu behandeln, in *Digitalisierung in der Geotechnik* geändert. Weiterhin wurde in dieser dritten Sitzung die Ausrichtung eines Kolloquiums vereinbart, in dem erste Ergebnisse des Arbeitskreises und die Zielsetzungen präsentiert werden sollten. Mit dem Titel *Digitalisierung in der Geotechnik – Von der Entwicklung zur Anwendung eines Baugrundmodells* konnte am 23.01.2020 in Hannover dieses Kolloquium mit etwa 160 Teilnehmern und der organisatorischen Unterstützung der *Bundesanstalt für Wasserbau* (*BAW*) ausgerichtet werden (*BAW, 2020*). Die große Nachfrage an diesem Kolloquium zeigte deutlich das Bedürfnis und die Notwendigkeit für allgemeingültige Definitionen und Handlungsempfehlungen für die Geotechnik – sowohl für Auftraggeber wie für Auftragnehmer.

Der *AK 2.14* wurde zwischenzeitlich zur Abdeckung eines größeren Themenspektrums durch weitere Teilnehmer verstärkt. Nach anfänglich schwierigen Sitzungen aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Ansichten zu BIM konnte langsam ein gemeinsames Verständnis erreicht werden. Grundlage dafür war insbesondere das Erlernen der jeweiligen Anforderungen von Softwareentwicklern und Ingenieuren. Das gegenseitige Verständnis und die Erarbeitung eines gemeinsamen Vokabulars ist eine zwingend erforderliche Voraussetzung für das nur gemeinsam erreichbare Ziel einer sinnvollen Digitalisierung.

So war es nur konsequent, dass die erste Empfehlung des *AK 2.14* im März 2021 insbesondere Begriffsdefinitionen enthält (Molzahn et al., 2021a). Demnach wird das digitale Modell des Baugrundes forthin als Fachmodell Baugrund bezeichnet, wodurch auch die Wichtigkeit des Baugrundes herausgehoben wird. Weiterhin sind in dieser ersten Empfehlung die Einbettung des Fachmodells Baugrund im Gesamtmodell, die Inhalte des Fachmodells Baugrund sowie eine Möglichkeit der datentechnischen Struktur des Modells definiert. Diese Empfehlung stellt damit die Grundlage aller folgenden Empfehlungen dar. Es war inzwischen die Überzeugung im *AK 2.14* gereift, dass man das Fachmodell Baugrund von seiner datentechnischen Grundlage aus denken muss und erst von dieser aus Empfehlungen zu einer praktischen Umsetzung erarbeiten kann.

Nur kurze Zeit später, im September 2021, erschien die zweite Empfehlung (Molzahn et al., 2021b), in der u.a. die Entwicklungsstufen des Fachmodells Baugrund über den Projektzeitraum und die dafür jeweils erforderlichen Informationen definiert werden. Weiterhin wird dargelegt, inwiefern theoretische Grundlagen von BIM aus dem Infrastrukturbereich auf das Fachmodell Baugrund angewendet werden können und es werden Erfordernisse formuliert, die bei der Zuführung von Informationen in das Fachmodell Baugrund zwingend zu beachten sind.

Die aktuell dritte Empfehlung vom Juni 2022 definiert Anwendungsfälle, die mit dem Fachmodell Baugrund umgesetzt werden können (Molzahn et al., 2022). Anwendungsfälle beschreiben dabei den Zweck der Fachmodelle, bspw. die Planungsvariantenuntersuchung, die Ableitung geologischer Schnitte oder die Mengenermittlung mit dem Fachmodell Baugrund.

Weitere Empfehlungen des Arbeitskreises befinden sich derzeit in Bearbeitung, so u.a. zur Rollenverteilung und den Zuständigkeiten bei der Modellierung und der Nutzung des Fachmodells Baugrund, zum Qualitätsmanagement sowie zum Vergleich von verschiedenen Softwareapplikationen zur Modellierung des Fachmodells. Langfristiges Ziel des Arbeitskreises ist die Erarbeitung der *Auftraggeber-Informationsanforderungen* (AIA) für das Fachmodell Baugrund, was die Zusammenführung aller Empfehlungen darstellen wird. Mit den AIA werden bei BIM-Projekten vom Auftraggeber die für ihn relevanten Ziele und vor allem die Anforderungen zu Workflows beim Datenfluss, bei der Modellierung, Qualitätssicherung und Kollaborationen definiert. Die AIA geben somit die Struktur für die allgemeine spezifische Projektabwicklung mit BIM in Einzelheiten vor und sind Vertragsbestandteil zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer.

Aktuell umfasst der *AK 2.14* der *DGGT 8* Mitglieder und etwa 11 Gäste. Seit November 2020 ist der *AK 2.14* mit einer eigenen Homepage vertreten (https://ak214.arbeitskreisdggt.de/).

Neben seiner Aktivität zur Erarbeitung von Empfehlungen ist der *AK 2.14* auch im regelmäßigen Austausch mit anderen geotechnischen BIM-Arbeitskreisen. Dabei sind insbesondere zu nennen:

- *BIM im Spezialtiefbau der Bundesfachabteilung Spezialtiefbau im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.*
- *BIM im Untertagebau des Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB)*
- *Fachgruppe Verkehrswege, Unterarbeitsgruppe Baugrund/Geologie des buildingSMART e.V. Deutschland*

Alle diese Arbeitskreise haben etwas unterschiedliche Arbeitsinhalte und Zielgruppen und weisen überwiegend schon mehrere Veröffentlichungen auf. Dabei ist allen Beteiligten bewusst, dass bei den inhaltlichen Schnittmengen der Arbeitskreise nur gemeinsame Definitionen und Bearbeitungs-Workflows zielführend sind.

Eine große Herausforderung für alle BIM-Arbeitskreise ist die nahezu unüberschaubare und stetig zunehmende Anzahl an ISO-Standards, Nor-men, Empfehlungen und sonstigen Veröffentlichungen zum Thema. Die darin befindlichen Definitionen und Workflows widersprechen sich dabei häufig. Diese Veröffentlichungen müssen von den Arbeitskreisen gesichtet, eingeordnet und deren Relevanz für die Geotechnik geprüft werden. Zudem ergeben sich aus der täglichen Projektarbeit heraus kontinuierlich Fragestellungen und mögliche Lösungsansätze für die Umsetzung von BIM in der Geotechnik, die von den Arbeitskreisen bewertet werden müssen. Die Arbeitsinhalte der BIM-Arbeitskreise erfordern ein interdisziplinäres Verständnis von Geotechnik und IT bei einem fachlich sehr weitgefassten Input, der zudem derzeit noch häufigen Änderungen unterworfen ist.

4 Übersicht zum Fachmodell Baugrund

Das Fachmodell Baugrund besteht aus der Verknüpfung von geometrischen Informationen (bspw. Baugrundschichten und Homogenbereiche) und beschreibenden Informationen (bspw. Bodenarten

und geotechnische Kenngrößen). Es enthält definitionsgemäß sämtliche Informationen, die den Baugrund beschreiben und basiert auf dem Geotechnischen Bericht.

Das Fachmodell Baugrund gilt immer nur in Verbindung mit dem Geotechnischen Bericht und ergänzt diesen.

In einer Projektumgebung stellt das Fachmodell Baugrund ein Fachmodell unter vielen gewerkspezifischen Fachmodellen dar. Zusammen bilden diese Fachmodelle das gewerkübergreifende Gesamtmodell (Abbildung 1 1), in dem die gegenseitigen Abhängigkeiten der Fachmodelle abgebildet und verwaltet werden.

Mit Fertigstellung des geotechnischen Berichts soll-te sich das – möglicherweise parallel dazu erstellte – Fachmodell Baugrund mindestens aus den fol-genden *Sub-Fachmodellen* zusammensetzen:

- Sub-Fachmodell der Aufschlüsse,
- Sub-Fachmodell der Baugrundschichten,
- Sub-Fachmodell der Homogenbereichsschich-ten (nach VOB, Teil C),
- Sub-Fachmodell der Grundwasserschichten und -körper (sofern Grundwasser relevant).

Jedes dieser Sub-Fachmodelle enthält die Gesamtheit der Informationen, die in dem jeweiligen Aspekt dem Fachmodell zuzuführen sind. Die Speicherung der zugeführten Informationen muss dabei strukturiert erfolgen, damit eine Weiterverarbeitbarkeit der Informationen durch Algorithmen ermöglicht wird und sie nicht nur ausschließlich vom Menschen interpretiert werden können (maschinenlesbare Da-ten). Die programmierte Softwareanwendung muss wissen, an welcher Stelle der Datenbank welche Information zu finden ist. Demnach werden Daten-banken benötigt, die mit ihrem Datenmodell das Schema zur Speicherung der Informationen klar vorgeben. Das Datenmodell muss dabei ermögli-chen, die geotechnischen Informationen mit ihren vielfältigen gegenseitigen Verknüpfungen sinnvoll zu verwalten. Ein Vorschlag, wie ein praktikables Datenmodell in der Geotechnik prinzipiell aufgebaut sein könnte, findet sich in Molzahn et al. (2021a).

Sofern man bei einem zurzeit laufenden und demnächst beginnenden BIM-Projekt auf bereits existierende, softwareunabhängige Datenmodelle zur Speicherung und Übergabe der beschreibenden Informationen zurückgreifen möchte, existiert derzeit ausschließlich *IFC* (siehe Abschnitt 2). Daneben gibt es herstellerabhängige Lösungen, sogenannte native Datenformate.

Wie alle Fachmodelle wird das Fachmodell Baugrund über den gesamten Lebenszyklus des Projekts fortgeschrieben und ist in seiner jeweiligen Entwicklungsstufe abhängig von der zu bearbeitenden Planungsphase bzw. Leistungsphase. Nach der Erstellung des Fachmodells Baugrund mit den Informationen aus dem Geotechnischen Bericht sollten zusätzliche, neu generierte Informationen zum Baugrund (z. B. aus der Bauausführung) im Fachmodell Baugrund integriert werden. Es existieren demnach mehrere Entwicklungsstufen des Modells. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine sinnvolle Nutzung des Fachmodells Baugrund im Planungsprozess nur möglich ist, wenn die Erstellung dieses Grundlagenmodells – und somit eine ausreichende Baugrundaufschlusskampagne – vor Beginn den Planungsarbeiten erfolgte.

In Molzahn et al. (2021b) sind folgende Entwicklungsstufen definiert, für welche üblicherweise die Erstellung eines Fachmodells Baugrund möglich und sinnvoll ist:

- Fachmodell in der Stufe Vorplanung:
  Es enthält nur rudimentäre Informationen zu Baugrundschichten, z. B. für eine Variantenun-tersuchung für Trassierungen oder zur Planung der geotechnischen Aufschlusskampagne.
- Fachmodell in der Stufe Entwurfsplanung und Genehmigungsplanung:
  Diese enthalten alle notwendigen Informationen aus dem Geotechnischen Bericht und ggf. dem Geotechnischen Entwurfsbericht.

- Fachmodell in der Stufe Ausführungsplanung und Werksplanung:
  Diese enthalten Informationen aus der Fortschreibung des Geotechnischen Entwurfsberichts infolge der fortgeschrittenen Planung, z. B. aus zusätzlichen Baugrunduntersuchungen und Probebelastungen. Das finale Ergebnis ist ein Modell, das der Bauausführung übergeben wird.
- Fachmodell in der Stufe Fertigstellung:
  Es enthält ergänzende, bei der Ausführung gewonnene Informationen, z. B. Anpassungen von Schichtverläufen, u. a. infolge eines Informationsgewinns durch Baumaschinen (Herstelldaten), und Informationen aus der Bauüberwachung. Das finale Ergebnis ist das As-Built Modell, das dem Betrieb übergeben wird.
- Fachmodell in der Stufe Betrieb:
  Es enthält Ergänzungen der Baugrundverhältnisse, die zum Zeitpunkt des Modells in der Stufe Fertigstellung nicht bekannt waren, z. B. Änderung der Grundwasserverhältnisse.

Die Reihenfolge der Aufzählung der Entwicklungsstufen stellt einen Regelfall mit einer linearen Entwicklung des Fachmodells Baugrund dar, kann aber je nach Eigenheiten des spezifischen Projekts oder der Vertragsgestaltung zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber von dieser Abfolge abweichen.
Letztlich dienen die Fachmodelle der Durchführung von Anwendungsfällen. Anwendungsfälle beschreiben, zu welchem konkreten Zweck BIM-Modelle im Projekt genutzt werden. Sie nutzen dafür in der Regel das Gesamtmodell oder Ableitungen aus dem Gesamtmodell, z. B. Baugrundschnitte.
Die Durchführung bestimmter Anwendungsfälle setzt einen bestimmten Informationsgehalt und da-mit bestimmte Entwicklungsstufen des Fachmodells Baugrund voraus. Eine Auflistung von Anwendungsfällen mit dem Fachmodell Baugrund findet sich in Tabelle 4-1. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Anwendungsfälle enthält Molzahn et al. (2022).

Von der Zusammenstellung in Tabelle 4 1 abzugrenzen sind Anwendungsfälle, für die das Fachmodell Baugrund nicht die unmittelbare Basis darstellt. Dies ist insbesondere ab der Projektphase der Ausschreibung des Bauprojekts der Fall. So nutzt bspw. der Spezialtiefbau das Fachmodell Baugrund auch für Termin- und Logistikplanungen, zur Baufortschrittskontrolle oder zur Abrechnung, wobei dabei insbesondere die Fachmodelle des Spezialtiefbaus mit den Bauwerken die hauptsächliche Voraussetzung bilden. Ausführungen zu diesen Anwendungsfällen finden sich ebenfalls in Molzahn et al. (2022) und in Bundesfachabteilung Spezialiefbau (2019).

Anwendungsfall	Weitere erforderliche Informationen im Gesamtmodell *
Bestandserfassung	ggf. Bestandsbauwerke, Altlasten etc.
Planungsvariantenuntersuchung	Bestandsbauwerke, Bauwerke oder Trasse etc.
Koordination	Bestandsbauwerke, Bauwerke des Spezialtiefbaus etc.
Fachliche Beurteilung	Bestandsbauwerke, Bauwerke des Spezialtiefbaus etc.
Bemessung und Nachweisführung	Bauwerke oder Trasse, ggf. weitere Gewerke
Grundwasserhaltung	Bauwerke oder Trasse, ggf. weitere Gewerke
Ableitung geologischer Schnitte	Bestandsbauwerke, Bauwerke oder Trasse, ggf. weitere Gewerke
Mengenermittlungen	Bauwerke oder Trasse, ggf. weitere Gewerke
Kostenschätzung und Kostenberechnung	Bauwerke oder Trasse, ggf. weitere Gewerke

* Eine Vernetzung mit dem Fachmodell des Digitalen Geländemodells (DGM) wird grundsätzlich vorausgesetzt

Tabelle 4-1: Anwendungsfälle des Fachmodells Baugrund mit Nutzung weiterer Fachmodelle aus Molzahn et al. (2022)

Eine Zuordnung des Informationsbedarfs, der Entwicklungsstufen und der Anwendungsfälle findet sich in Molzahn et al. (2021b).

Eine genaue Definition, auf welcher Weise mit welchen Inhalten der Fachmodelle und mit welchen Zielen ein BIM-Projekt durchgeführt werden soll, wird vom Auftraggeber in den *Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA)* zusammengestellt (siehe auch Abschnitt 3). Eine Beschreibung, wie der Auftragnehmer die Anforderungen der *AIA* umsetzen möchte, findet im *BIM-Abwicklungsplan (BAP)* statt. Der *BAP* wird während des Projekts, u. a. bspw. bedingt durch zunehmende Erfahrungen und neuen Technologien, sukzessive angepasst und kann ebenfalls Vertragsbestandteil werden.

Da eine genaue Beschreibung der notwendigen Inhalte von *AIA* und *BAP* sehr umfangreich ist und zudem ein weitgehendes Verständnis von theoretischen Grundlagen zu BIM voraussetzt, erfolgen an dieser Stelle keine weiteren Ausführungen. Dazu sei auf die vorhandenen und noch folgenden Empfehlungen des *AK 2.14* verwiesen.

Erste BIM-Projekte mit der Erstellung und Nutzung von dreidimensionalen Baugrundschichtenmodellen wurden bereits ausgeführt (Abbildung 4-1). Dabei wurden den Baugrundschichten oftmals auch ausgewählte beschreibende Informationen aus dem Geotechnischen Bericht wie geotechnische Kennwerte zugeführt. Dies erfolgt derzeit mit den auf dem Markt verbreiteten Softwareapplikationen in der Regel als Freitext, d. h. der Auftraggeber gibt vor oder lässt sich vom Geotechniker vorschlagen, wie die Informationen aus dem Geotechnischen Bericht in der Softwareapplikation benannt und mit welcher Einheit angegeben werden.

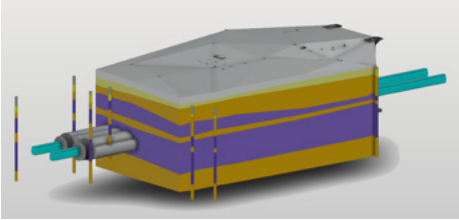

Abbildung 4-1: 3D-Baugrundschichtmodell, erstellt mit der Softwareapplikation Autodesk/Civil 3D aus Wilfing/Hausperger (2022)

Während der Export und Datenaustausch der geometrischen Informationen mit nativen Datenformaten oder *IFC* gut möglich ist, stellt die Datenübergabe der beschreibenden Informationen derzeit oft eine große Schwierigkeit dar. Zwar können die Informationen zumeist problemlos mit einer Softwareapplikation in *IFC* exportiert, jedoch oftmals nicht verlustfrei in eine andere Softwareapplikation importiert werden. Alternativ können die Informationen mit externen, von *IFC* unabhängigen Datenbanken übergeben werden. Solche Datenbanken sind jedoch derzeit noch projektspezifische Einzellösungen für Projektbearbeiter mit hoher Affinität für IT-Lösungen.

5 Notwendigkeit von Standardisierungen in der Geotechnik

Wesentliches Ziel und wesentlicher Nutzen von BIM ist die Vermeidung von Informationsverlusten über den Lebenszyklus eines Bauprojektes und die Möglichkeit, Informationen allen Projektbeteiligten jederzeit zielgerichtet zur Verfügung zu stellen. Damit dies möglich ist, müssen die gespeicherten Informationen maschinenlesbar, d. h. mittels Algorithmen verarbeitbar sein. Dies ist nur möglich, wenn die Informationen strukturiert gespeichert vorliegen (siehe Abschnitt 4). Dazu wiederum müssen für die Informationen passgenaue Datenmodelle entwickelt werden. Dabei ist es nicht zwingend notwendig, für jedes Gewerk im Infrastrukturbau oder für jeden Aspekt der Geotechnik (bspw. für Informationen von Aufschlüssen, Baugrundschichten oder Grundwasser) dasselbe Datenmodell zu verwenden. Vielmehr ist von Wichtigkeit, dass die einzelnen Datenbanken auf dem Paradigma

der objektorientierten Programmierung basieren. Wird bei den Datenbanken zudem eine saubere Schnittstelle vorgesehen, ist die Kommunikation mit anderen Datenbanken, d. h. der Datenaustausch, problemlos umsetzbar. Es ist demnach für BIM nicht zwingend erforderlich, dass die unterschiedlichen Fachdisziplinen dasselbe Datenmodell verwenden. Somit können unterschiedliche Datenbanken auch unterschiedliche Datenmodelle aufweisen, die auf die Komplexität der Informationen des jeweiligen Gewerkes ausgerichtet sind.

Damit die Entwicklung von passgenauen Datenmodellen und Datenbanken für die einzelnen Gewerke, wie z. B. die Geotechnik, möglich ist, muss ein enger Austausch zwischen IT und Ingenieuren stattfinden. Ingenieure besitzen das Wissen, welche Informationen mit welchen gegenseitigen Abhängigkeiten in ihrem Gewerk vorliegen, die IT besitzt das Wissen, wie diese Informationen strukturiert gespeichert und verwaltet werden können. Die Entwicklung von Datenmodellen bzw. Datenbanken ist demnach ein iterativer Prozess. Einige Initiativen zur Entwicklung solcher Datenmodelle sind in Bauer (2022a) zusammengestellt.

Neben der Frage, in welcher Weise die Informationen gespeichert werden sollen, ist die wesentliche Frage für BIM, welche Informationen erforderlich sind. Derzeit werden die beschreibenden Informationen aus dem Geotechnischen Bericht den Baugrundschichtenmodellen zumeist in Form von Freitexten zugeführt. Freitexte sind jedoch nicht maschinenlesbar, sondern – im besten Fall – lediglich vom Menschen interpretierbar.

Soll bspw. eine automatisierte Massenermittlung mit dem Fachmodell Baugrund erfolgen, ist neben dem zu bewegenden Volumen aus dem geometrischen Modell die Dichte des Baugrunds erforderlich. Diese Dichte muss dem Fachmodell Baugrund in Verknüpfung mit der jeweilige Baugrundschicht und den Grundwasserverhältnissen zugeführt werden (bspw. Feuchtdichte ρ = 1,9 g/cm³ und Dichte des wassergesättigten Bodens ρ_r = 2,1 g/cm³). Dazu sind u.a. der Begriff "Feuchtdichte", das Symbol "ρ", die Einheit "g/cm³" sowie der Typ der Angabe, hier ein Einzelwert oder ein Wertepaar (Minimal- und Maximalwert, ggf. noch getrennt für vor und nach dem Lösen), zu standardisieren. Eine Angabe dieser Informationen frei nach der Entscheidung eines einzelnen Projektbearbeiters mit Freitext ist nicht zielführend. So werden unterschiedliche Bearbeiter bspw. unterschiedliche Begriffe ("Feuchtdichte" vs. „Dichte") oder unterschiedliche Einheiten („kg/m³" vs. „g/cm³") wählen oder unterliegen bei der Eingabe u. U. Schreibfehlern. Die automatisierte Massenermittlung ist dann nicht möglich, die Fehlersuche mühsam.

Es müssen also vordefinierte (standardisierte) Informationen erarbeitet werden. Dies sollte projektübergreifend und verkehrsträgerübergreifend erfolgen und abgestimmt sein. So lässt sich der notwendige Aufwand bündeln und die Erarbeitung von Parallellösungen vermeiden. Der Umfang der zu standardisierenden Informationen inkl. ihren gegenseigen Abhängigkeiten und ihren Zuordnungen (Laborwert, Ansprachewert eines Bohrkerns, geotechnische Information einer Baugrundschicht etc.) ist jedoch enorm.

Die Erarbeitung der notwendigen Standardisierungen stellt dabei keinen einmaligen Akt dar. Zwar ist eine initiale Initiative erforderlich, die in einem ersten Schritt einen großen Anteil der Standardisierungen schrittweise vornimmt, doch muss für weiterführende Standardisierungen eine dauerhaft operierende Organisation geschaffen werden. Immer wieder neu erscheinende geotechnische Vorschriften, zunehmende Erfahrungen mit BIM-Projekten und neue technische Entwicklungen erfordern kontinuierliche Fortschreibungen der Standardisierungen.

Abbildung 5-1 gibt einen Überblick, welche Standardisierungen aus deutscher Sicht für das Fachmodell Baugrund mindestens erforderlich sind. Da dabei viele nationale Eigenheiten zu berücksichtigen sind (Homogenbereiche, traditionell gewachsene Verfahren mit eigenen Begriffen etc.) wird man nur eingeschränkt auf international vorhan-

dene Standardisierungen (z. B. *AGS Data Format*) zurückgreifen können.

Ein Vorschlag, wie die standardisierte Beschreibung für Bauleistungen nach VOB/C (Homogenbereiche) im Fachmodell Baugrund erfolgen könnte, findet sich in Bauer (2022b). Darin wurde sowohl ein Datenmodell vorgeschlagen als auch eine vollumfängliche Vordefinierungen der anzugebenden Informationen für Homogenbereiche auf Basis der VOB/C vorgenommen. Eine Standardisierung insbesondere von Daten aus Baugrundaufschlüssen und Laborversuchen ist bei der *Bundesanstalt für Wasserbau* im Rahmen des Projekts *GeoValML* in Arbeit. Die Standardisierung wird dabei streng nach geotechnischen Normen und Vorschriften vorgenommen. Mit *GeoValML* können nahezu beliebige geotechnische Versuchsdaten gespeichert und langfristig verwaltet werden. Zudem wird die Nutzung von *GeoValML* auch durch Dritte über eine Webapplikation möglich sein. Erste Ergebnisse können unter https://baugrunddaten.baw.de eingesehen werden. *GeoValML* wird permanent weiterentwickelt.

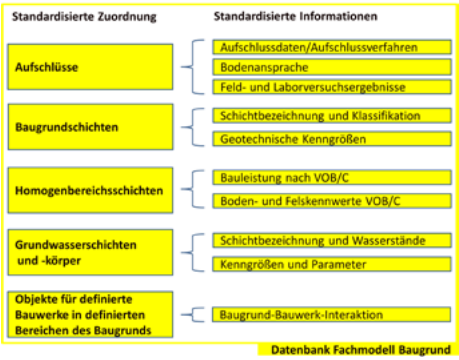

Abbildung 5-1: Erforderliche Standardisierungen für das Fachmodell Baugrund gemäß Molzahn et al. (2021b)

6 Ausblick

Mit der zunehmend breiteren Anwendung von BIM bei Infrastrukturprojekten werden auch verstärkt Anforderungen an die Geotechnik gestellt, sich an den digitalen Workflows zu beteiligen.
Die geometrische Abbildung des Baugrundes mit auf dem Markt vorhandenen Softwareapplikationen ist derzeit bereits gut möglich, wenngleich einige offene Fragen hinsichtlich der Haftungen, Zuständigkeiten und Workflows zwischen Modellersteller und Modellnutzer zu klären sind.

Dagegen bereitet die Datenübergabe (insbesondere von beschreibenden Informationen) vom Fachmodell Baugrund zu anderen Fachmodellen noch einige Schwierigkeiten, die einer technischen Lösung bedürfen.

Die größte Herausforderung für eine konsequente Umsetzung von BIM ist die Notwendigkeit von Datenbanken mit vordefinierten (standardisierten) Informationsablagen. Nur auf dieser Grundlage können die gewerkspezifischen Fachmodelle in einem Gesamtmodell in Interaktion gesetzt und eine automatisierte Weiterverarbeitung und Verwaltung aller Informationen ermöglicht werden. Diese Standardisierungen müssen mit der Entwicklung passender Datenmodelle Hand in Hand gehen und auf fachlich hohem Niveau erfolgen. Nur wenn die Standardisierungen die Inhalte der geltenden Standards, Normen, Richtlinien und Empfehlungen sauber abbilden, werden die Ingenieure in die Lage versetzt, ihre Fachinhalte rechtssicher in die Modelle zu überführen.

Erste Initiativen zur Erstellung solcher Standardisierungen bestehen bereits, eine Zusammenarbeit der einzelnen Bearbeitergruppen findet dabei aber kaum statt. Einen Schub bei der Standardisierung wird sich mit der Freischaltung des *BIM-Portals* von *BIM Deutschland* erhofft. Ob die dafür erforderlichen Strukturen geschaffen werden können, u. a. zur Prüfung der fachlichen Richtigkeit der erstellten Inhalte vor der Freischaltung zur allgemeinen Nutzung und zur Verhinderung von Parallellösungen bei Standardisierungsvorschlägen, bleibt abzuwarten.

Für die Geotechnik stellt sich mit der rasanten technischen Entwicklung bei BIM einerseits und den zunehmenden Anforderungen in BIM-Projekten andererseits die Herausforderung, die Überführung der

bisherigen Arbeitsweisen in digitale Arbeitsweisen aktiv anzunehmen und mitzugestalten. Nur so ist eine Einflussnahme auf die technischen Entwicklungen möglich, sodass die geotechnischen Besonderheiten einen sinnvollen Eingang finden können. Die Geotechnik muss ihre Arbeitsinhalte dahingehend analysieren, was sinnvoll in digitale Prozesse überführt werden kann und wie dabei die seit Langem bewährten Zuständigkeiten in einem Bauprojekt beibehalten werden können, ohne dass sich der Sachverständige für Geotechnik in rechtlich schwierige Konstellationen begeben muss. Dies bedeutet, dass die Geotechnik technische Entwicklungen vorausdenken und beeinflussen muss. Dies kann bspw. in Form von Arbeitskreisen, in Fachgruppen und in Verbänden mit Veröffentlichungen und der unermüdlichen Kommunikation von Arbeitsergebnissen erfolgen.

Dieser Beitrag ist daher auch ein Aufruf an in der Geotechnik tätigen Personen, sich an diesen Prozessen zu beteiligen. Nur so kann BIM für die Geotechnik zum Erfolg werden.

Literaturverzeichnis

Bauer, J. (2022a): Digitalisierung in der Geotechnik – Status Quo und aktuelle Entwicklungen. Tagungshandbuch zum 13. Kolloquium Bauen in Fels und Boden, Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 25–39.

Bauer, J. (2022b): Standardisierte Beschreibung der Eigenschaften im Fachmodell Baugrund für Bauleistungen nach VOB/C (Homogenbereiche). BAWBrief. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. https://izw.baw.de/publikationen/briefe/0/BAWBrief_2022_01.pdf (abgerufen am 13.05.2022)

BAW (2020) [Hrsg.]: Digitalisierung in der Geotechnik – Von der Entwicklung zur Anwendung eines Baugrundmodells. https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/106964/Gesamttagungsband_Digitalisierung_in_der_Geotechnik_23012020_.pdf?sequence=1&isAllowed=y (abgerufen am 13.05.2022)

BMVI (2015) [Hrsg.]: Stufenplan Digitales Planen und Bauen. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplandigitalesbauen.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 13.05.2022)

Bundesfachabteilung Spezialtiefbau (2017) [Hrsg.]: BIM im Spezialtiefbau – Technisches Positionspapier.

Bundesfachabteilung Spezialtiefbau (2019) [Hrsg.]: BIM im Spezialtiefbau – Technisches Positionspapier. https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Verband/Bundesfachabteilungen/Spezialtiefbau/BIM_POS-PAPIER_5.6_Cl6OWEH.pdf (abgerufen am 13.05.2022)

Molzahn, M.; Bauer, J.; Henke, S.; Tilger, K. (2021a): Das Fachmodell Baugrund – Empfehlungen des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik". Geotechnik 44 (1), S. 41–51. https://doi.org/10.1002/gete.202000040

Molzahn, M.; Bauer, J.; Henke, S.; Tilger, K. (2021b): Entwicklungsstufen und Attribuierung des Fachmodells Baugrund – Empfehlungen Nr. 2 des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik". Geotechnik 44 (3), S. 209–218. https://doi.org/10.1002/gete.202100024

Molzahn, M.; Bauer, J.; Henke, S.; Tilger, K. (2022): Anwendungsfälle des Fachmodells Baugrund – Empfehlung Nr. 3 des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik". Geotechnik. Zur Veröffentlichung akzeptierter Bericht. https://doi.org/10.1002/gete.202100026

Wilfing, L; Hausperger, T (2022): Digitalisierung in der Geotechnik – Möglichkeiten und Herausforderungen. Tagungshandbuch zum 13. Kolloquium Bauen in Fels und Boden, Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 45–50.

Brenner-Nordzulauf – Digitales Planen eines Großprojektes mit Hilfe von Baugrundmodellen

Helena Loga M.Sc., DB Netz AG, München

Meike Paeslack B.Eng, DB Netz AG, Rosenheim

Im Großprojekt Brenner-Nordzulauf soll eine ca. 100 km lange Neu- und Ausbaustrecke für den Eisenbahnverkehr realisiert werden. Ein großer Teil der Neubautrasse wird auf Dämmen, Einschnitten, Brücken oder in Tunneln verlaufen. Dieses hochkomplexe Projekt wird vollumfänglich modellbasiert geplant. Hierzu zählt auch die Erstellung eines Baugrundmodells und dessen Integration in das Fachmodell der Streckenführung.

1 Einleitung

Zwischen Innsbruck und Franzensfeste entsteht als Teil des Skandinavien-Mittelmeer-Korridors eines der wichtigsten Verkehrsprojekte Europas: Der Brenner-Basistunnel. Mit Inbetriebnahme des Brenner-Basistunnels kann von einem starken Anstieg des Schienengüterverkehrs auf der gesamten Brennerachse ausgegangen werden (siehe Abbildung 1). Daher muss gleichzeitig der Ausbau der Zulaufstrecken auf der Brennerachse zwischen München und Verona erfolgen, damit das Ziel der Verkehrswende im alpenquerenden Schienenverkehr erreicht wird. Demnach gilt es die bestehende Bahnstrecke entsprechend neu- und/oder auszubauen, sodass hier die Verkehre der Zukunft zuverlässig mit den notwendigen Kapazitäten verkehren können.
Am Südzulauf sind auf italienischer Seite Ausbaumaßnahmen von Franzensfeste bis Verona in Planung und Bau. Wobei hier vorrangig die Engstellen, dass heißt der Zulauf zum Brenner-Basistunnel von Franzensfeste bis Waidbruck, die Umfahrungen von Bozen und Trient und die Einfahrt nach Verona, realisiert werden.

Am Nordzulauf ist das Teilstück auf österreichischem Staatsgebiet zwischen Baumkirchen und Radfeld bereits seit 2012 in Betrieb. Der weitere Abschnitt bis nach Schaftenau bereits in der Detailplanung. Hier sollen Mitte der 2020er Jahren die Hauptbaumaßnahmen beginnen. Nach Norden anschließend folgt der grenzüberschreitende Abschnitt. Hier wird der Streckenabschnitt gemeinsam von der DB Netz AG und der ÖBB Infra ausgeplant.

Als Brenner-Nordzulauf auf deutschem Staatsgebiet wird der ca. 90 km lange Abschnitt von München -Trudering über Rosenheim bis nach Schaftenau in Österreich bezeichnet. Das Projekt gliedert sich in eine etwa 20 km lange Ausbau- und eine etwa 70 km lange Neubaustrecke. Auf der Ausbaustrecke soll eine Blockverdichtung realisiert werden. Die Neubaustrecke soll zweigleisig, elektrifiziert als Mischverkehrsstrecke mit einer maximalen Streckengeschwindigkeit von 230 km/h, konzipiert werden. Ziel ist es, auf der gesamten Brennerachse eine sogenannte Flachbahn herzustellen, sodass Züge mit Längen bis zu 740 m die Strecke im alpenquerenden Abschnitt befahren können. Um dies zu erreichen ist die Längsneigungen auf maximal 12,5 ‰ zu begrenzen. Auf allen Abschnitten der Neu- und Ausbau-strecke wird das europäische Zugbeeinflussungssystem (ETCS) berücksichtigt.

Abbildung 1: Brenner-Achse von München nach Verona und der dazugehörige Bearbeitungstand der jeweiligen Abschnitte.

2 Das Projekt zum Brenner-Nordzulauf

Das Projekt befindet sich in der Vorplanung und ist in fünf Planungsabschnitte gegliedert. Nach derzeitigem Stand ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der Neubaustrecke auf Dämmen, Brücken, in Einschnitten oder Tunneln verlaufen wird.

Im Folgenden werden die fünf Planungsabschnitte kurz von Nord nach Süd beschrieben (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Aufteilung der Planungsabschnitte des Projektes Brenner-Nordzulauf und des Folgeabschnittes auf österreichischem Staatsgebiet.

Im Abschnitt von München Trudering nach Grafing wird das 4-gleisige Bestandsnetz mittels Blockverdichtung und Ausrüstung mit ETCS so ertüchtigt, dass der zukünftige Personenfernverkehr und der Güterverkehr abgewickelt werden kann und gleichzeitig der bestehende und sich weiter entwickelnde Personennahverkehr (S-Bahn) nicht beeinträchtigt wird.

Der Bereich von Grafing nach Ostermünchen befindet sich im Trassenauswahlverfahren. Hier soll im Herbst 2022 mit der Vorplanung begonnen werden. Es herrscht eine hügelige Landschaft mit einem in sich gradlinigen Gefälle Richtung Süden vor. Die vorhandene Morphologie des Projektraumes wirkt sich maßgebend auf die planerische Gestaltung der Trasse selbst und dessen Bauwerke aus. Zu erwarten ist hier eine Trasse mit wechselnden Bauwerken (Brücken, Dämme, Einschnitte und ggf. Tunnel).

Die morphologischen Gegebenheiten beeinflussen auch auf dem Abschnitt von Ostermünchen bis Innleiten die Bauwerke. Die ca. 14 km lange Trasse auf freier Strecke ist sowohl auf Dämmen, als auch mit Einschnitten zu beplanen und endet auf einem etwa 1000 m langen Brückenbauwerk zur Querung des Inns.

Im Anschluss an das Brückenbauwerk führt die Trasse direkt in den rund 5,6 km langen Innleitentunnel. Dieser Tunnel verläuft mit einer maximalen Überdeckung von rund 30 m durch Lockergestein. Daran anschließend folgt ein kurzer oberirdischer Streckenabschnitt und schließlich der Sattelbergtunnel mit rund 12,9 km Länge. Der Sattelbergtunnel unterquert den Inn südlich von Nußdorf und taucht bei Kirnstein, ebenfalls nur für einen kurzen oberirdischen Streckenverlauf, auf. Zuletzt folgt ein rund 13,45 km langer grenzüberschreitender Tunnel bis nach Schaftenau (Österreich).

3 Digitales und modellgestütztes Planen im Projekt

Dieses hochkomplexe Projekt wird vollumfänglich digitalisiert und modellbasiert geplant. Das Planen mit Hilfe der digitalen Arbeitsmethodik BIM (Building Information Modeling) soll bereits in frühen Planungsphasen Differenzen und Unstimmigkeiten innerhalb einzelner Gewerke, aber auch zwischen den Fachplanern, aufzeigen. So kann schnellstmöglich eine konfliktfreie Planung erzielt und im Bau ein kollaborativer und kontinuierlicher Baufortschritt erreicht werden. Dieses Vorgehen wird im BIM-Anwendungsfall „Planungskoordination" beschrieben. Dieser definiert sich durch ein regelmäßiges Zusammenführen der gewerkespezifischen Modelle (Fachmodelle) in einem Koordinationsmodell mit anschließender Qualitätsprüfung durch eine visuelle Prüfung und einer automatisierten Kollisionsprüfung. Die Qualitätssicherung beinhaltet unter anderem die Beseitigung von geometrischen und regelbasierten Konflikten.

Ein Werkzeug zur Qualitätssicherung ist eine kontinuierlich stattfindende Virtual Design Review (VDR), eine Besprechung zwischen Auftraggeber und Auf-

tragnehmer, welche anhand des Koordinationsmodells durchgeführt wird. Zur Vorbereitung auf eine VDR führt der sogenannte BIM-Gesamtkoordinator die vorbereiteten Fachmodelle der Fachplaner in ein Koordinationsmodell zusammen und legt Ansichtspunkte (engl. View Points) für das Modell fest. Sollten Fehler, Unstimmigkeiten und/oder Konflikte entdeckt werden, werden Maßnahmen und Aufgaben zur Sicherstellung der Qualität festgelegt und diese letztendlich beseitigt. Die so ermittelten Aufgaben (Issues) und Abstimmungsergebnisse werden vom BIM-Gesamtkoordinator übernommen und die Ergebnisse auf der gemeinsamen Datenaustauschplattform / Common Data Environment (CDE) zur Verfügung gestellt. Die Issues können entweder über die CDE oder über ein Issue Management System (z. B. BIMcollab) verwaltet und nachgehalten werden.

Neben der Planungskoordination unterstützt die BIM Methodik das Erhalten von Informationen im Planungs- und Bauprozess eines Projektes. Der höchste Informationsverlust bei Bauprojekten entsteht bei einem Leistungsphasenwechsel. Im Projekt Brenner-Nordzulauf sollen durch die Unterstützung der modellgestützten Planung alle wichtigen Informationen aller gewerkespezifischen Modelle aus früheren Leistungsphasen wertschöpfend in spätere mitgenommen werden.

Sowohl die Objekt- und Tragwerksplanung als auch alle weiteren Gewerke wurden und werden entsprechend beauftragt. Die geforderten BIM-Anwendungsfälle je Gewerk und getrennt nach Leistungsphase sind im Dokument „AuftraggeberInformationsanforderungen (AIA)“ vertraglich festgelegt. Eine Beschreibung, wie die BIM-Anwendungsfälle im Projekt umgesetzt werden, wird partnerschaftlich zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer im „BIM-Abwicklungsplan (BAP)“ fortgeschrieben.

Neben der digitalen Arbeitsmethodik BIM werden im Projekt, sowohl intern als auch mit den jeweiligen Auftragnehmern agile Arbeitsmethoden genutzt und gelebt. Mit Hilfe der Scrum Methodik und entsprechenden Projektmanagement Werkzeugen, wie z. B. dem Last Planner System, kann gemäß dem Lean Gedanken das Projekt gemeinsam mit den Auftragnehmern entwickelt, fortgeschrieben und schließlich umgesetzt werden.

4 Integration des digitalen Baugrundmodells

Auf Basis der bisherigen Erkundungen wurde bereits ein Baugrundmodell der geplanten Neubaustrecke erstellt. Durch das digitale Planen mit der BIM-Methodik zeigt sich der enorme Einfluss der vorhandenen Geologie und Hydrogeologie auf die planerische Gestaltung der Neubaustrecke in Höhe und Lage. Mit Hilfe der Integration des dreidimensionalen Baugrundmodells in das Fachmodell der Streckenführung können geologische Planungs- und Realisierungsrisiken minimiert werden.

4.1 Vorhandene geologische und hydrogeologische Randbedingungen

Das Umgriffsgebiet des Streckenabschnittes zwischen Grafing und Ostermünchen, ist größtenteils durch würmeiszeitliche (Quartär) Ablagerungen geprägt. Durch die glaziäre Überprägung der Landschaft entstanden recht kleinräumig wechselnd unterschiedliche Ablagerungen in diesem Gebiet.
Den flächenmäßig größten Anteil, und meist leichte Höhenrücken bildend, stellen Moränenablagerungen dar. Diese sind durch ein sehr breit gefächertes Korngrößenspektrum von Schluff bis hin zu Blöcken charakterisiert. Vereinzelt treten diese Moränen auch als Rand- oder Seitenmoräne in Erscheinung. Entlang von Hangkanten treten teilweise sog. Schmelzwasserschotter, welche die Moränenablagerungen häufig unterlagern zu Tage. Dabei handelt es sich um vom Gletscher ausgespülte Kiese und Sande mit wechselnden Feinkorngehalten. Diese Schmelzwasserschotter werden wiederum durch Sedimente der oberen Süßwassermolasse unterlagert welche sich durch eine Wechselfolge aus Tonen, Schluffen und Sanden sowie Kiesen charakterisieren lässt.

In Bereichen von morphologischen Depressionen liegen im Bereich nördlich von und rund um Rosen-

heim häufig Moore und Beckenablagerungen vor. Diese bildeten sich in Wannen über schwach durchlässigen Untergrundschichten und sind durch hohe Organik- bzw. Feinanteile charakterisiert.

Jenseits des Inns herrschen eiszeitliche Schotter und Moränenablagerungen vor. Sie werden stellenweise randlich noch von Ausläufern des Rosenheimer Beckens überlagert, stellenweise auch unterlagert. Im Liegenden der Becken- und eiszeitlichen Sedimente kommen beiderseits des Inns Gesteine der Molasse vor. Weiter in Richtung Süden schließen sich die Einheiten des Helvetkums, der Flyschzone und der alpinen Decken an.

Geologisch umfasst das Gebiet von Ostermünchen bis Kirnstein das Rosenheimer Becken mit dem nördlichen Rand der Kalkalpen. Im nordwestlichen Bereich wird das Becken von Moränenablagerungen eingefasst. Weiter in Richtung Rosenheim folgt die nacheiszeitliche Beckenfüllung, bestehend aus lakustrinen Sedimenten (Seeablagerungen), d.h. feinkörnige, setzungsempfindliche Schichten, die teils Mächtigkeiten von über 100 m aufweisen. In den Seeablagerungen kommen auch Flussablagerungen vor, bzw. diese sind in den eingetieften Flusstälern (Inn und Mangfall, usw.) von Flussablagerungen bedeckt. Auch kommen untergeordnet Moorgebiete auf den wasserstauenden Seeablagerungen vor.

Ab Nussdorf tritt die Trasse wieder in die Lockergesteine des Talbereichs ein. Das Inntal verengt sich wenig später bei Flintsbach. Weiter nach Süden weitet sich der Talbereich jeweils bei der Einmündung der Seitentäler. Der Felsuntergrund weist stellenweise ein unruhiges Relief auf. An zwei Stellen treten Felsrippen bei Flintsbach und Oberaudorf bis an die Oberfläche auf. Die Talfüllung besteht aus Flußablagerungen, feinkörnigen Stillwasserablagerungen und Moränenablagerungen. An einigen Stellen binden seitlich Murschuttfächer in diese Ablagerungen ein. Die randlichen Gebirgsbereiche werden von Karbonatgesteinen und klastischen Gesteinen der nördlichen Kalkalpen aufgebaut. Teilweise sind Gesteine der inneralpinen Molasse, Gosau vorhanden. Aufgrund der Gebirgsbildungsprozesse sind die alpinen Gesteine geklüftet und von Störungen durchzogen und bilden einen Faltenbau. Der Bergwasserspiegel liegt deutlich über Talniveau, insbesondere trifft dies für den Grenzbereich nach Österreich zu. Im Talkessel von Kiefersfelden, kommen unterhalb der Flussablagerungen, Moränenablagerungen über Gesteinen der Gosau vor.

4.2 Stand der Erkundungen

Da die Beschaffenheit des Untergrundes großen Einfluss auf die Lage der Trassenführung und die damit notwendigen Bauwerke und somit auch auf die Kosten eines Projektes hat, ist es umso wichtiger bereits frühzeitige Kenntnisse zu den geologischen, tektonischen und hydrogeologischen Gegebenheiten zu erlangen.

Im Zuge der Grundlagenermittlung (Lph 1) konnten in einer ersten Erkundungskampagne sowohl Kartierungen, Bohrungen inkl. Bohrlochversuche, Laborversuche, als auch Geophysikalische Messungen (Seismik und Geoelektrik) durchgeführt werden. Zusätzlich wurden die Bohrungen im Nachgang als Grundwassermessstellen ausgebaut und ein entsprechendes Monitoring installiert. Insgesamt wurden so über 70 Bohrungen in Tiefen zwischen 30 m bis zu 400 m abgeteuft und über 4000 lfm Bohrkerne gewonnen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse in dieser frühen Projektphase, konnte die Trassenfindung auch unter Berücksichtigung der geotechnischen Randbedingungen erfolgen.

Aktuell läuft eine zweite Erkundungskampagne im Zuge der Vorplanung (Lph 2). Hierzu sind weitere, vor allem hydrogeologische Kartierungen, über 60 Bohrungen inkl. Bohrlochversuche, Laborversuche und auch geophysikalische Untersuchungen geplant. So werden nochmals im Bereich der geplanten Trasse über 5500 lfm Bohrkerne zur Gewinnung von weiteren Erkenntnissen dazu kommen. Eine Besonderheit stellen hier vier Bohrungen, die im Bereich der geplanten Unterquerung des Inns liegen (siehe Abbildung 3). Hier wurden zusätzlich

Tracerfluidversuche durchgeführt, um genauere Parameter für mögliche Vereisungsverfahren zu erlangen, da dieser Bereich mit einer geringen Überdeckung unterfahren werden soll.

Abbildung 3: Pontonbohrung im Inn, November 2021 (Foto: Carsten Bannwart)

4.3 Erstellung des Baugrundmodells

Im Zuge des Trassenauswahlverfahrens (Lph 1) für die Bereiche der Neubauabschnitte wurden geologische, dreidimensionale Modelle erstellt (siehe Abbildungen 4 und 5).

Für den Abschnitt von Ostermünchen – Schaftenau wurde mit Hilfe der Modellierungssoftware Seequent Leapfrog Works (Version 4) ein geologisches 3D-Baugrundmodell, inklusive Aufschlüsse, entlang aller Trassenvarianten (5 Varianten), über deren gesamte Länge erstellt. Dabei wurde eine Korridorbreite von einem Kilometer (500 m links und rechts der Trassenvariante) verwendet. Auch das hydrogeologische Einzugsgebiet des Hechtsees (Österreich) bis auf Tunnelniveau fand im Modell Berücksichtigung und dient als Grundlage für hydrogeologische Strömungsmodellierungen. Aufgrund der fehlenden geotechnischen Kennwerte im Modell handelt es sich zunächst um ein Schichtenmodell, in dem die Lage der verschiedenen geologischen Einheiten dargestellt werden können. Die geotechnischen Kennwerte werden im Zuge der Erstellung eines geotechnischen 3D-Baugrundmodells integriert.

In das geologische 3D-Baugrundmodell wurde die geologische Karte der Lockergesteins- und Festgesteinseinheiten, der tektonischen Störungen sowie Orientierungsmessungen der Festgesteinsschichtung berücksichtigt. Zudem wurden verfügbare Bestandsbohrungen im Nahbereich der Korridorstreifen eingearbeitet. Außerdem wurden alle durchgeführten Erkundungsbohrungen der ersten Erkundungskampagne, sowie die erstellten geophysikalischen Profile (Seismik und Geoelektik) als Grundlagedaten eingepflegt. Die zum Zeitpunkt der Erstellung des geologischen 3D-Baugrundmodells bereits konstruierten geologischen 2D-Profilschnitte wurden ebenfalls als Grundlage eingepflegt und folglich durch manuelles Setzen von Punkten entlang der Schnitte als Schichtgrenzen berücksichtigt.

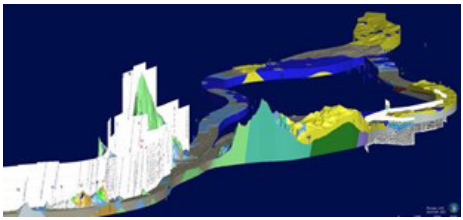

Abbildung 4: 3D-Baugrundmodell Ostermünchen – Schaftenau

Die genannten Grundlagendaten wurden wie folgt in das geologische 3D-Baugrundmodell eingepflegt:

<u>Bohrungen:</u>
Tabellarische Auflistung der interpretierten lithologischen Einheiten (von/bis Teufe), sowie die Letztmessung des Wasserstandes (sofern verfügbar).
<u>Geologische Locker- und Festgesteinskarte:</u>
Georeferenzierte Rasterdarstellung, welche auf die Oberfläche des 3D Geländemodells projiziert wurde.
<u>Geologische und bodengeophysikalische Profilschnitte:</u>
Georeferenzierte Rasterdarstellung entlang der Profilspuren. Eingespielt wurden die erstellten geologischen Längs- und Querprofile. Da die Profilspuren in vielen Fällen gekrümmt sind, die Rasterdarstellungen jedoch nur als ebene Fläche importiert werden können, wurden gekrümmte Profile in Form von mehreren gestückelten Teilabschnitten importiert.

Bodengeophysikalische Flächenaufnahmen:
Auf österreichischem Staatsgebiet wurden die geologischen Schichtgrenzen mittels geophysikalischer Messungen ermittelt und anschließend entsprechend flächenmäßig interpretiert. Diese wurden in Form von x,y,z-Punktdaten im ASCII Format importiert.

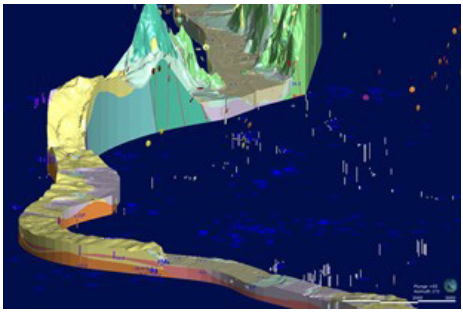

Abbildung 5: 3D-Baugrundmodell inkl. Aufschlüsse Ostermünchen - Schaftenau

Sämtliche im 3D-Baugrundmodell eingepflegte Daten sind im Datenstrukturbaum wie folgt strukturiert:

Drillhole Data:
Collar (Koordinaten und Endteufen der Bohrungen), Bohrungen_geologische_Schichten (Schichtenverzeichnis sämtlicher Bohrungen), Bohrungen_Wasserstände (Wasserspiegelmessungen in Bohrungen)
Structural Modelling:
Aufschlusspunkte (Festgesteinsaufschlüsse mit Orientierungsmessung der Schichtung)
Meshes:
Topographische Karte auf Geländeoberfläche gelegt, geologische Karte
Geological Models:
Geologisches Modell (Output Volumen (modellierte Homogenbereiche/geologische Einheiten))
Saved Scenes and Movies:
Geologisches Modell Brenner-Nordzulauf (Vorlage zur Visualisierung der relevanten Daten und Datei, welche für Leapfrog Viewer exportiert wurde)
Cross Sections and Contours:
Geoelektrik (georeferenzierte, geoelektrische Profile im Rasterformat), Geoseismik (georeferenzierte, geoseismische Profile im Rasterformat), Grundlagenprofile (georeferenzierte Grundlagenprofile im Rasterformat), Profile entlang aller Trassenvarianten, welche aus dem 3D Modell berechnet wurden).

Im geologischen 3D-Baugrundmodell für den Bereich Ostermünchen – Schaftenau wurden im ersten Schritt sämtliche Locker- und Festgesteinseinheiten als eigenständige Homogenbereiche definiert und daraus Volumenkörper modelliert (siehe Abbildungen 6 und 7).

Die Differenzierung der Festgesteine erfolgte auf österreichischer Seite nach lithologischen Einheiten, auf deutscher Seite für die Kalkalpen nach den Deckensystemen (Allgäu-Decke, Lechtal-Decke, Jura-Mulde) bzw. ansonsten auch nach den lithologischen Einheiten (Flysch, Helvetikum, Molasse). Hintergrund dafür ist, dass die Modellierung auf österreichischer Seite im Bereich des Hechtsees möglicherweise als Grundlage für hydrogeologische Modellierungen dienen soll, was einen hohen Detaillierungsgrad erfordert. Eine nachträgliche Differenzierung der Deckensysteme auf deutscher Seite wäre in späteren Phasen technisch umsetzbar.

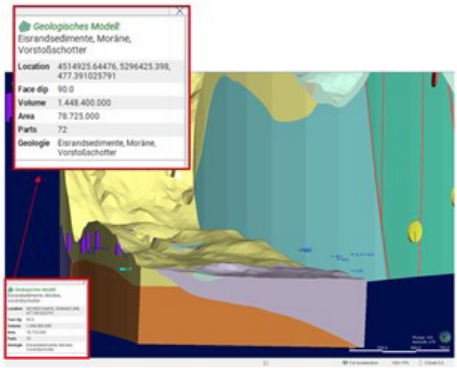

Abbildung 6: Attribute der Schichten im Baugrundmodell

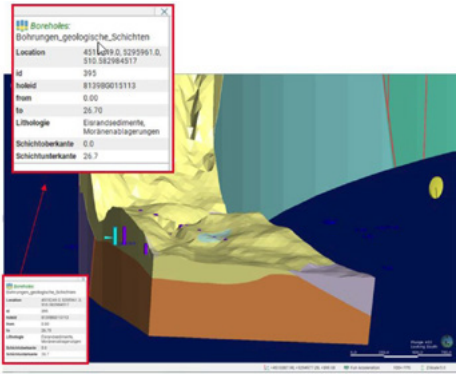

Abbildung 7: Attribute der Bohrungen im Baugrundmodell

Derzeit können die Mächtigkeiten von Störungszonen nicht im Detail untersucht werden. Daher sind diese im aktuellen geologischen 3D Modell mit einer Mächtigkeit von 10 m für sämtliche vermuteten bzw. kartierten Störungen angenommen und hinterlegt worden. Dies überschätzt in vielen Fällen wohl die tatsächliche Mächtigkeit bzw. beinhaltet in diesen Fällen nicht nur den Faltenkern, sondern auch den umgebenden stärker zerlegten Bereich. Grund für die Zuweisung einer Mächtigkeit der Störungen, anstelle einer einfachen Darstellung der Störung als Fläche war, dass hiermit auch die scheinbar zunehmende Mächtigkeit besser berücksichtigt werden kann, wenn eine Trassenvariante eine Störung schleifend schneidetDer Grundwasserspiegel wird im aktuellen 3D-Modell nur in Form von Bohrlochwasserspiegelmessungen berücksichtig. Ein durchgehender Grundwasserpiegel kann in späteren Phasen bzw. in einem hydrogelogischen Baugrundmodell z. B. in Form einer Fläche durch Interpolation aus diesen Daten ermittelt werden.

Die Modellierung erfolgte basierend auf den bestehenden Erkundungsdaten und folgt im Wesentlichen den bestehenden Annahmen gemäß der Profilschnitte und Karten. Modelliert wurden die Schichtgrenzen zwischen den genannten Homogenbereichen. Basierend darauf werden Volumenkörper für die einzelnen Homogenbereich generiert. Vektordaten und Schichtgrenzen aus Bohrungen können direkt für die Ermittlung der Schichtgrenzen berücksichtigt werden. Rasterdaten können nur durch händisches Setzen von Punkten oder Linien entlang der erwarteten Schichtgrenzen berücksichtigt werden.

Die Modellierung in nicht erkundeten Bereichen erfolgt durch Interpolation bzw. geologischer Fachbeurteilungen. Die automatisch durch die Software durchgeführte Interpolation wurde visuell anhand von zahlreichen (temporären) Quer- und Längsprofilen validiert bzw. ggfs. manuell nachbearbeitet. Waren die Schichtgrenzen entlang der Profile nicht plausibel, wurde entlang des temporären Profils die Schichtgrenze angepasst. Fokus hierbei lag auf den Nahbereich der Trassenvarianten, die Qualitätskontrolle wurde jedoch für das komplette Modell durchgeführt. Diese Nachbearbeitung erfolgt durch das Expertenwissen des Geologen bezüglich plausibler Geometrien der geologischen Homogenbereiche.

Das geologische 3D Modell inklusive sämtlicher eingearbeiteter Grundlagendaten wird als Leapfrog Works Datei (*.aproj inklusive interner Dateien), sowie die relevanten Daten im Leapfrog Viewer Format (*.lfview) übergeben. Somit wird eine Aktualisierbarkeit des geologischen Modells in späteren Projektphasen mittels Leapfrog Works gewährleistet.

Die modellierten Homogenbereiche werden zudem im IFC Dateiformat übergeben. Die Homogenbereiche besitzen, abgesehen von der Bezeichnung der geologischen Einheit, noch keine geologisch-geotechnischen Attributierungen im geologischen 3D-Baugrunddmodell.

Die Bohrungen werden im IFC Dateiformat, sowie tabellarisch übergeben. Georeferenzierte Rasterdaten (Karte, Profilschnitte) werden als georeferenzierte TIF-Dateien übergeben.

Für den Abschnitt Grafing – Ostermünchen wurde ebenfalls mit Hilfe der Modellierungssoftware Seequent Leapfrog Works (Version 4) ein geologisches 3D-Baugrundmodell (inklusive Bestandsaufschlüsse) erstellt.

In diesem Bereich liegen keine zusätzlichen Erkenntnisse aus der ersten Erkundungskampagne vor, sodass hier für die Erstellung des Modells nur Bestandsdaten (Bestandsaufschlüsse) herangezogenen wurden. Diese Bestandsdaten wurden im Vorfeld detailliert hinsichtlich Verwendbarkeit ge-prüft und für das Modell aufgearbeitet. Hierzu gehören Schichtdaten von fast 60 Bohrungen und knapp 30 Erdwärmesondierungen. Soweit vorhanden, wurde die angegebene Stratigraphie der Bestandsaufschlüsse übernommen. Wo keine oder nur sehr allgemeine stratigraphische Angaben vorlagen erfolgte eine Interpretation auf Grundlage der Schichtenverzeichnisse und den bekannten regionalen Verhältnissen, sowie aus den im Rahmen des Projektes Brenner-Nordzulauf angefertigten Manuskriptkarten. Die bereits konstruierten 2D-Profilschnitte wurden ebenfalls als Grundlage eingepflegt.
Die Grundlagen in diesem Planungsabschnitt wurden wie folgt in das geologische 3D-Modell eingepflegt:

Bestandsaufschlüsse:
Tabellarische Auflistung der interpretierten Schichten mit Tiefenangaben und tabellarische Auflistung der Bohrwasserstände, soweit vorhanden. Zusätzliche Informationen (wie z. B. Korngrößen) sind in der Version des Modells zum Trassenauswahlverfahren nicht enthalten.
Geologische Karte:
Georeferenzierte Rasterdarstellung, welche auf die Oberfläche des 3D Geländemodells projiziert wurden.
Geologische Profilschnitte:
Georeferenzierte Rasterdarstellung entlang der Profilspuren. Eingespielt wurden die geologischen Querprofile, die im Zuge der Projektbearbeitung erstellt wurden.
Der Datenstrukturbaum und die Modellierungsvorgaben orientieren sich an den Vorgaben des zuerst erstellten 3D-Baugrundmodells für den Bereich Ostermünchen – Schaftenau.

Im Baugrundmodell können nicht alle geologischen Schichten einzeln dargestellt werden. Grund dafür ist, dass zum Beispiel die Schichten des Geschiebemergels, der Schottermoräne und des Schmelzwasserschotters ineinander verzahnt sind und in Wechsellage auftreten. Eine Unterscheidung der Schichten in den Altaufschlüssen, in denen keine oder nur sehr allgemeine Stratigraphie vorliegt, ist nicht immer möglich. Daher wurden diese Schichten als „Moräne" zusammengefasst.
Bei der Modellierung wurde Wert auf eine hohe Genauigkeit der einzelnen Schichtverläufe gelegt. Entsprechend des aktuellen Kenntnisstandes schwankt die Genauigkeit des Modells hinsichtlich der Schichtverläufe zum Teil im Meterbereich. Dies wirkt sich besonders auf kleinräumige Schichten wie z. B. geringmächtige Auffüllungen, polygenetische Talfüllungen, sowie den Schichten Anmoor bis Torf aus. Diese Ungenauigkeiten sollen im Zuge weiterer Erkundungskampagnen weiter minimiert werden. Es folgt somit eine fortlaufende Überarbeitung des 3D-Baugrundmodells mit fortschreitendem Kenntnisgewinn.

4.4 Integration in das Koordinationsmodell

Damit das geologische 3D-Baugrundmodell in das Koordinationsmodell integriert werden kann, wird es in einem offenen Datenaustauschformat (IFC) an den BIM-Gesamtkoordinator, übergeben und durch ihn den Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt. So kann das Baugrundmodell mit anderen Fachmodellen zusammengefügt werden. Beispielsweise den Fachmodellen zum Bestand, Konstruktiver Ingenieurbau, (bahn-)technische Ausrüstung oder Verkehrsanlagen und allen weiteren Fachmodellen aller Gewerke. Ebenso können mit Hilfe des Modells schnell und unkompliziert Schnitte generiert werden und diese als Grundlage für die Planung von z. B. Gründungen für die verschiedensten Bauwerke bereits in frühen Phasen herangezogen werden. Ohne die modellgestützte Planung müssen notwendige Schnitte jeweils neu interpoliert werden und stehen somit nicht direkt zur Verfügung. Die Schnitte können nun in der Planung genutzt werden, um mögliche örtliche Lagen von Bauwerken bzw. der

Trassenlage vorweg unter geologischen und hydrogeologischen Aspekten zu betrachten. Erst im Anschluss, nachdem hier eine optimale Lage gefunden ist, kann dann das Bauwerk an sich detailliert beplant werden. So können geotechnische Risiken zur Realisierung des Projektes direkt um ein Vielfaches minimiert werden (siehe Abbildung 8).

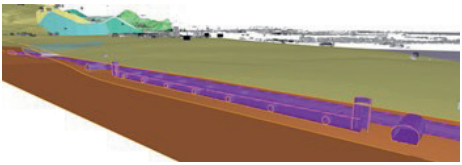

Abbildung 8: Schematische Skizze eines unterirdischen Bauwerks mit Vertikalschacht zur Oberfläche (Schichtdicke Moräne ca. 30 m), angezeigt in Desite md Pro.

Ebenfalls können Erdmassen aus dem Koordinationsmodell entnommen und die Art des Aushubs, anhand der Attribute im Modell, ermittelt werden. Dies stellt die Grundlage für die Erstellung eines planungsraum- bzw. später baulosübergreifendes Logistik- und Entsorgungskonzept dar.

Wie bereits erwähnt können aus dem derzeitigen geologischen Baugrundmodell nur Schnitte erstellt und für die Planung und Dokumentation verwendet werden. Die Abbildung 9 zeigt einen exemplarischen Längsschnitt, generiert aus dem 3D-Baugrundmodell.

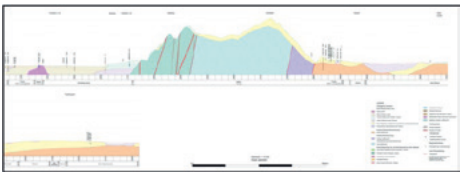

Abbildung 9: Längsschnitt generiert aus dem 3D-Baugrundmodell

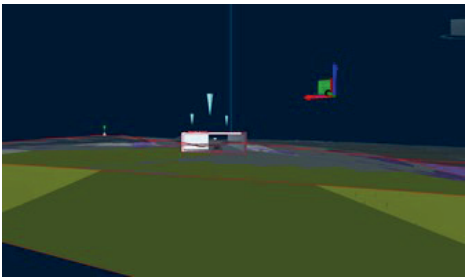

Abbildung 10: Querschnitt des Koordinationsmodells im Bereich Ostermünchen, angezeigt mit Navisworks Manage.

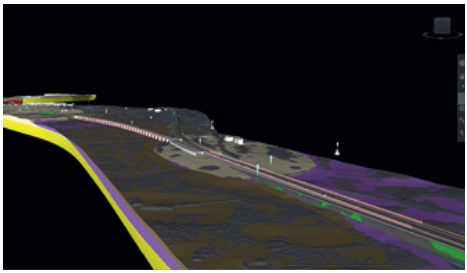

Abbildung 11: Draufsicht auf das Koordinationsmodell im Bereich Ostermünchen, angezeigt mit Navisworks Manage.

Mit der im Projekt genutzten Koordinationssoftware ist es derzeit nicht möglich, sich die Schichten bei den Schnitten ausgefüllt anzeigen zu lassen. Abgebildet werden hierbei nur die Schichtgrenzen. Dies kann man in den Abbildungen 10 und 11 gut erkennen. Für die Zusammenstellung der Fachmodelle wurde Navisworks Manage verwendet.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Ein vorteilhafter Nutzen eines 3D-Baugrundmodels bereits in einer frühen Planungsphase kann bestätigt werden. Die Findung einer Trassenlage innerhalb des Trassenauswahlverfahren konnte somit bereits an geologische, tektonische und hydrogeologische Randbedingungen optimiert angepasst und Risiken aus geologscher Sicht minimiert werden, da sehr risikoreiche bzw. nicht gebrauchstaugliche Trassen ausgeschlossen werden konnten. Hierzu konnten schnell und einfach die jeweiligen theoretischen Lagen der Trassen in Schnitten dargestellt werden und so eine generelle geotechnische Machbarkeit vorausgesetzt oder eben ausgeschlossen werden.
Im weiteren Projektverlauf ist angedacht, das bestehende geologische 3D-Baugrundmodell entsprechend der Erkenntnisse aus der zweiten Erkundungskampagne zu ergänzen und zu detaillieren. Und auch in späteren Projektphasen gewonnene Kenntnisse werden fortlaufend integriert und das Modell so immer weiter detailliert. Zudem sollen zusätzliche Informationen, die aus den Bohrungen stammen (z. B. Zerlegungsgrad, Verwitterungsgrad, Korngrößen und weitere Kennwerte) zukünftig in das Modell aufgenommen werden. Damit kann aus einem „einfachen" 3D-Baugrundmodell ein

komplexes geotechnisches 3D-Modell erstellt werden. Berichte und die zugehörigen Dokumente zu Laborversuchen sollen mit dem Modell oder bestenfalls mit den Aufschlüssen im Modell verknüpft werden. Dies findet auf der CDE statt.

Die im Projekt für die Erkundungsbohrungen erstellten Bohrprofile (*.pdf) können in Leapfrog aktuell nicht eingebunden werden. Einbinden von pdf Dateien in eine IFC Datei ist auch in anderen Softwareprodukten nicht möglich.

Anzudenken wäre in späteren Projektphasen eine Verknüpfung zu Berichten oder Bohrprofilen, welche z. B. auf einem Sharepoint abgelegt sind, als Attribut zu hinterlegen. Diese pdf Dateien könnten per Hyperlink aus Leapfrog geöffnet werden. Hierzu müsste sich eine langfristige Ablagestruktur über-legt werden, damit die Hyperlinks dauerhaft beste-hen bleiben und die Bohrprofile als eigenständige pdf Dateien abgelegt sind. Vergleichbare Funktio-nen bieten auch verschiedene IFC Bearbeitungs-Software-Produkte, wie z. B. SimpleBIM. Auch muss angemerkt werden, dass der erstellte Hyperlink un-ter Umständen in der gemeinsamen Datenumge-bung (CDE), in welche die IFC Datei eingespielt werden kann, nicht mehr als Hyperlink erkannt wird und man das Attributfeld mit dem Dateipfad in ei-nen Browser/Explorer kopieren müsste.

Außerdem können prinzipiell, bei entsprechender Aufbereitung der Daten/Exportparameter, sämtliche Informationen aus Bohrprofilen, welche in GeODin erstellt wurden, tabellarisch exportiert werden und somit in das Leapfrog Modell eingespielt werden.

Um der Komplexität von geologischen Modellen Rechnung zu tragen, wird das Baugrundmodell zukünftig in drei verschiedene Modelle aufgeteilt. Es wird ein 3D-Gesamtmodell je Planungsabschnitt, ein geotechnisches 3D Baugrundmodell, welches die Homogenbereiche gemäß bautechnischer Eigenschaften und bauwerksbezogene Ausschnitte inklusive deren hinterlegten geotechnischen Eigenschaften in Form von Attributen darstellen kann und ein hydrogeologisches 3D-Baugrundmodell, als Grundlage zur numerischen Grundwassermodellierung erstellt.

Literaturverzeichnis

DB Netz AG, ÖBB Infra, Website des Projektes zum Brenner-Nordzulauf, https://www.brennernordzulauf.eu/home.html, aufgerufen im April 2022.

IPBN c/o ILF Consulting Engineers Austria GmbH (2021). Brenner-Nordzulauf, Schlussbericht Geologie – Hydrogeologie – Geotechnik Allgemein

IPBN c/o ILF Consulting Engineers Austria GmbH (2021). Brenner-Nordzulauf, Gemeinsamer und Erweiterter Planungsraum. Bericht – geologisches 3D Modell – Inhalt, Datenstruktur & Beschreibung

Baugrund Dresden Ingenieurgesellschaft mbH (2021). Erläuterungen 3D Baugrundmodell. Planungsraum Grafing-Bahnhof – Großkarolinenfeld Lph 0/1

Erfahrungen beim Einsatz des digitalen Zwillings während der Bauausführung von geotextilummantelten Sandsäulen am Autobahnprojekt A26 Los 3.2 Hamburg

Dipl.- Ing. (FH) Daniel F. Scheer DEGES GmbH, Hamburg

Dipl.- Ing Marcus Daubner BAUER Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen

In diesem Beitrag wird im ersten Block auf die gestellte Bauaufgabe des Autobahnprojektes A26 Los 3.2 eingegangen. Hier werden vor allem die Anforderungen zur Untergrundverbesserung vorgestellt und die Herausforderungen und Maßnahmen, die im Zuge der Abwicklung des Bausolls aufgetreten sind, erläutert. Im zweiten Block wird die durchgängige Nutzung vernetzter Daten aus der Bauplanung und dem laufenden Bauprozess mit Hilfe eines digitalen Zwillings vorgestellt. Zunächst wird auf die automatisierte Interpretation von Maschinendaten und die digitale Erfassung der Bauprozessdaten eingegangen. Anschließend wird die Visualisierung der Qualitätsdaten und die Übergabe der Plan und Asbuilt Daten an GIS und BIM Systeme für den Kunden thematisiert.

1 Einleitung

Die A26 hat im norddeutschen Raum eine sehr lange Planungshistorie. Die Planung im Hamburger Stadtgebiet reicht zurück bis in die 1980er Jahr. Die Herausforderungen an die Trassenfindung waren vielfältig. Der sehr anspruchsvolle Baugrund war eine dieser Herausforderungen. Mittlerweile befindet sich der Teil der A26, der aus Niedersachsen kommend an die A7 anschließen soll, im Bau. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Baugrundes wurden u.a. geotextilummantelte Sandsäulen im Anschluss an die bestehende A7 hergestellt. Dabei wurde bei der Bauausführung von BAUER Spezialtiefbau GmbH der Ansatz einer möglichst umfassenden, digitalen Aufnahme und der konsequenten Nutzung der Plan- und Produktionsdaten verfolgt. Die Erfahrungen beim Einsatz dieses Datenmanagement Tools und der Nutzen für die Bauabwicklung werden im Folgenden beschrieben.

2 Beschreibung der Gesamtmaßnahme A26 zwischen A7 und der AS Neu-Wulmstorf

Die DEGES GmbH plant und baut im Auftrag ihrer Gesellschafter Autobahnen und Bundesstraßen. 2014 wurde die DEGES mit der Planung und dem Bau der A26 beauftragt. Ein bis dahin über 30 Jahre andauernder Planungsprozess wurde mit dem Planfeststellungsbeschluss im Dezember 2018 beendet. Mit dem Bau wurde umgehend begonnen. Die Verkehrsfreigabe ist nach einer Bauzeit von ca. 6 Jahren geplant.

Wesentliche Eckpunkte der Maßnahme sind: Neubau von 8,7 km Autobahn (RQ 31) – Verbreiterung der A 7 auf 3,7 km (Kronenbreite 44,80 m) – Neubau von 17 Brückenbauwerken – Neubau eines 197 m langen Tunnels unter der Hafenbahn – Neubau von 11 km Lärmschutzwänden – Baukosten ca. 690 Mio. €.

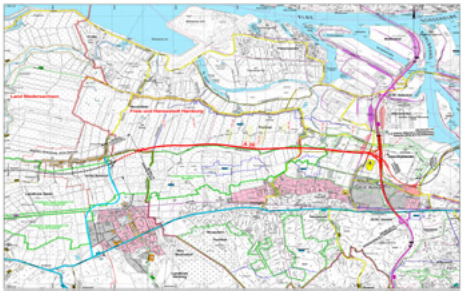

Abbildung 1: Übersichtskarte Gesamtmaßnahme

Der Hamburger Bauabschnitt der A 26 verläuft auf gesamter Länge durch das Marschgebiet im Urstromtal der Elbe. Der Marschboden besteht aus

organischen Weichschichten, aus Klei und Torf in unterschiedlicher Mächtigkeit zwischen ca. 4 m und ca. 10 m.

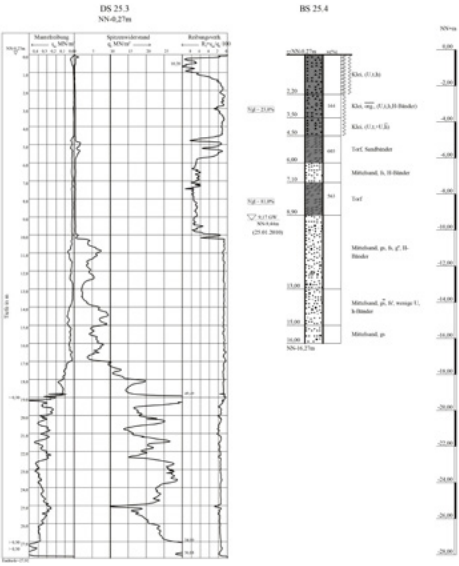

Abbildung 2: Beispiel eines Aufschlussprofils im Streckenverlauf bei km 2+621

Zur Verbesserung des Untergrundes kommen in diesem Projekt außerhalb der Ingenieurbauwerke das Überschüttverfahren mit Vertikaldräns (ca. 3.000.000 m) und das Verfahren mit aufgeständertem Gründungspolster mithilfe geotextilummantelter Sandsäulen (ca. 80.000 Stück) zur Ausführung. Das Überschüttverfahren kommt in den Bereichen zum Einsatz, in denen der Überschüttkörper eine Höhe von 3,0 Metern nicht übersteigt. In allen anderen Bereichen und im Zulauf der Ingenieurbauwerke kommen geotextilummantelte Sandsäulen zum Einsatz. Ziel dieses Vorgehens ist es, in einer möglichst kurzen Bauzeit die Primärsetzungen zu erzeugen und somit zeitnah mit dem Streckenbau der Autobahn beginnen zu können.

3 Bauabschnitt der Untergrundverbesserung im Anschlussdreieck an die A7

Die hier beschriebene Gesamtmaßnahme besteht sowohl aus dem Neubau der A26 als auch aus der Anbindung der neuen Autobahn an die bestehende A7. Weiterhin wird in diesem Zusammenhang die A7 im Anschlussbereich auf einer Länge von 3,7 km verbreitert. Das Baulos für die Untergrundverbesserung des neu zu errichtenden Anschlusses an die A7 ist eines von ca. 30 zu beauftragenden Losen der Gesamtmaßnahme. Dieses Baulos wurde an die ARGE **BAUER** Spezialtiefbau GmbH /Eggers Umwelttechnik GmbH vergeben. Das Bausoll umfasst sowohl die Untergrundverbesserung von Flächen im Überschüttverfahren mit Vertikaldrains als auch Flächen, die als aufgeständertes Gründungspolster mithilfe geotextilummantelter Sandsäulen zu verbessern sind.

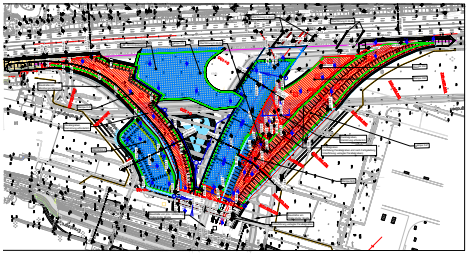

Abbildung 3: Lageplan der Untergrundverbesserungen im Anschlussbereich der A7

Dieser Beitrag beschreibt den aktuellen Stand der Maßnahme, die Anforderungen an die Maßnahmen zur Untergrundverbesserung und zeigt auf, welche Herausforderungen im Zuge der Abwicklung des Bausolls aufgetreten sind und wie diesen begegnet wurde.

Abbildung 4: Blick auf das Baufeld in Richtung Nordosten

Insbesondere in den Schnittstellen zwischen direkt angrenzenden Bauwerken aber beispielsweise

auch im Zuge der Bauablaufplanung mussten im Rahmen der Bauabwicklung kreative Lösungen erarbeitet werden. Hierbei stellt beim Bau der geotextilummantelten Sandsäulen die Arbeitsvorbereitung und die Ausführungsplanung eine besondere Herausforderung dar. Schließlich hat sich der Einsatz dieses Bauverfahrens bewährt und kann gerade im norddeutschen Raum seine Vorteile ausspielen. Eine besondere Rolle haben hierbei der Einsatz im Wasserschutzgebiet, die Materialverfügbarkeit und die Setzungsdauer gespielt.

Abbildung 5: Herstellung der Sandsäulen

Abbildung 6: Herstellung der Sandsäulen

4 Digitaler Zwilling in der Bauausführung

Die BAUER Spezialtiefbau GmbH wurde bei dem Autobahnprojekt mit der Ausführung der Bodenverbesserungsmaßnahme mit geotextilen Sandsäulen beauftragt. Gerade die hohe Anzahl von ca. 14.000 Spezialtiefbauelementen, barg großes Potential für die Digitalisierung der während der Bauausführung erforderlichen Dokumentations- und Prüfprozesse.

Im gängigen Bauprozess des Spezialtiefbaus werden die anfallenden Informationen meist händisch in Papierprotokolle eingetragen oder mit Hilfe von Maschinendaten ein Papierprotokoll erzeugt. Es liegt deshalb nahe, diesen Prozess durchgängig zu digitalisieren und nicht Dokumente, sondern Daten automatisiert in einem digitalen Zwilling zu hinterlegen.

So wurde während der Ausführung der Ansatz einer systematischen digitalen Erfassung aller relevanten Daten aus Planung, Herstellung und Qualitätskontrolle, sowie deren integrale Vernetzung verfolgt. Vor allem die weitergehende Nutzung der Plandaten im Herstellprozess, die automatisierte Auswertung der Produktionsdaten im täglichen Bauprozess und das Ableiten von Maßnahmen für die Bauproduktion stellten ein zentrales Anliegen dar.

Abbildung 7: Schematische Darstellung des digitalen Zwillings der Bauproduktion

Zum Managen dieser Baustellendaten wurde bei Bauer ein integrales Datenmanagementsystem entwickelt, dessen zentrales Tool die Produktionsdatenmanagementsoftware b-project darstellt. Dieses System ist seit 2018 produktiv im Einsatz [3] und wurde mit erweiterter Funktionalität, nun auch am BV A26 Los 3.2 erfolgreich eingesetzt.

5 Datenmanagement auf der Baustelle

Es wurden alle verfügbaren Daten beginnend bei der Übergabe der für die Herstellung der Sandsäulen relevanten Plandaten, wie z. B. den geometrischen Abmessungen, den Materialeigenschaften, die Lage der geologischen Einbindeschicht als auch der Terminplan bei Projektstart hinterlegt.

Während der Ausführungsphase wurden der digi-

tale Zwilling dann produktionsbegleitend mit den Asbuilt Daten angereichert.
So wurden die als Zeitreihen vorliegenden Maschinenproduktionsdaten automatisiert ausgewertet und die für den Bauprozess wichtigen KPIs wie z. B. Produktionsstart, -ende oder ausgeführte Rütteltiefe im Datenmodell hinterlegt. Diese Asbuilt-Daten durchlaufen vor der weiteren Verwendung eine Qualitätsprüfung, so dass erst nach Freigabe durch die Qualitätssicherung die Daten für die Ausgabe zur Verfügung stehen.

Weitere Informationsquellen wie die Erfassung der Material- und Logistikinformationen wurden mit einer App erfasst. Aber auch Zusatzinformationen, die noch nicht in digitaler Form vorliegen, konnten in der Software manuell ergänzt werden, so dass das Gesamtbild der Bauproduktion abgebildet werden konnte.

Abbildung 8: Schema Verarbeitung von Plan- und Produktionsdaten mit b-project

Durch die Kombination der verschiedenen Quellen ergeben sich diverse Auswertungsmöglichkeiten, die bereits heute eine Vielzahl der gängigen Anwendungsfälle aus dem gesamten Bauprozess abdecken.

6 Automatisierte Dashboards zum Nachhalten von Leistung und Qualität

Eine Möglichkeit der Nutzung der strukturiert abgelegten Daten stellt die Darstellung der Produktionsdaten in automatisierten, online verfügbaren Dashboards dar. So werden Aspekte der Leistungskontrolle, der Qualitätssicherung, des internen Reportings, der Abrechnung oder der Optimierung berücksichtigt und visualisiert.

Diese Auswertungen stehen webbasierte und somit ortsunabhängig zur Verfügung und ermöglichen den zeitnahen Zugang zu aggregierten Leistungs- und Qualitätsdaten auch außerhalb des Baubüros. Da ein Projektleiter für seine tägliche Arbeit andere Informationen benötigt als ein Bauleiter oder Qualitätsingenieur, werden entsprechend dem Rollenprofil unterschiedliche Aspekte der Auswertung berücksichtigt und die Daten dem Anwendungsfall entsprechend aufbereitet. Auf der Autobahnbaustelle kamen 27 verschiedene Dashboards zum Einsatz.

Abbildung 9: Auswahl von verschiedenen automatisierten Dashboards zum Leistungs-, Qualitäts- und Verschwendungstracking

Als Beispiel sei die Auswertung des Produktionsstandes genannt. So werden z. B. die Produktionsparameter der Sandsäulen mit den Solldaten aus der Planung abgeglichen und in einer Kartendarstellung farblich visualisiert.

Die Visualisierung für das Management enthält die Information über die bereits erstellten und die der noch nicht erstellten Säulen. Also den Status der Arbeiten.

Die Auswertung für den Fachbauleiter betrachtet zusätzlich den für seine Arbeit wichtigen Aspekt des Optimierungspotentials. Da diese Auswertungen automatisiert aktualisiert werden, liegen der Bauleitung noch vor Schichtende alle Auswertungen vor.

Dadurch wird der Entscheidungsprozess signifikant verkürzt und Optimierungen in der Bauausführung können kurzfristig vorgenommen werden. Dies hilft

Verschwendung zu reduzieren, nachhaltiger zu Bauen und garantiert durchgängig die geforderte Qualität des erstellten Produktes. Ein Vorteil für Kunde und Bauunternehmer.

7 Erzeugen der papierbasierten Herstelldokumentation

Auch die vertraglich geschuldete, papierbasierte Dokumentation wurde auf der Autobahnbaustelle A26 Los 3.2 aus dem Zwilling abgeleitet. Gefordert waren Herstellprotokolle jeder einzelnen Säule sowie Summentabellen der geleisteten Arbeiten in Excel.

Für die Erstellung der Herstellprotokolle wurde auf die im Sekundentakt hinterlegten Sensordaten der Rüttelgeräte zugegriffen und die Zeitreihen visualisiert.

Zusätzlich konnten auf den Protokollen aber auch Informationen aus dem Bauprozess wie z. B. der Typ des Geotextils oder die verwendete Materialrezeptur ausgegeben werden.

Da diese Informationen im Allgemeinen nicht in der Maschine hinterlegt sind, müssen diese Daten in den gängigen Protokollprogrammen manuell ergänzt oder als Beiblatt abgegeben werden. Durch die zentrale Ablage der Bauprozessdaten im digitalen Zwilling entfällt nunmehr dieser Schritt im Dokumentationsprozess.

Abbildung 10: exemplarisch tabellarischer Bericht der erstellten Säulen und Herstellprotokoll einer Einzelsäule

8 3D Dokumentation oder Asbuilt BIM Modelle abgeleitet aus dem Zwilling

Die erzeugten Daten stehen nicht nur der Bauausführung, sondern auch zur weiteren Nutzung für nachlaufende interne Prozesse oder zur Nutzung der Daten im weiteren Lebenszyklus der Projekte zur Verfügung.

Das Übergeben von Daten in die BIM Modelle der Konstruktionsabteilung oder die Übergabe von Daten in die GIS Plattform zu Dokumentationszwecken, stellen einen Mehrwert nicht nur für den Auftragnehmer, sondern in zunehmendem Maße auch für den Auftraggeber dar.

8.1 BAUER GIS – 3D Dokumentation

Beim Autobahnprojekt A26 werden die Daten über automatisierte Schnittstellen an die BAUER GIS Plattform übergeben und zu Zwecken der Dokumentation des Soll- und des Ist-Zustandes als 3D Modell georeferenziert dargestellt. Die Daten aus den Bohrgeräten erstellen somit automatisch auch die 3D Visualisierungen.

In dieser Plattform können aber auch Informationen zur Materialbeprobung, Fotos, Dokumente, 3D Scans, Kernbohrungen, Bodenschichten, Messdaten der Bauteilüberwachung oder Modelle der Bestandsbebauung integriert werden.

Zukünftig also das digitale Abbild der Baustelle. Bei Bedarf kann diese Dokumentation auch mit dem Kunden geteilt oder nach Abschluss der Arbeiten übergeben werden.

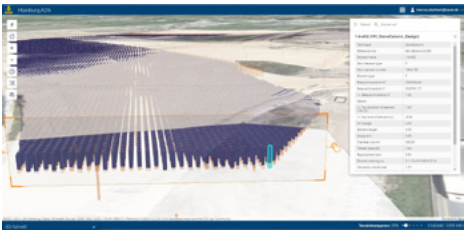

Abbildung 11: BAUER GIS Plattform. Georeferenzierte 3D Dokumentation

8.2 Übergabe des Asbuilt Teilmodells Spezialtiefbau in den BIM Prozess

Eine weitere Nutzung stellt die Rückführung der Asbuilt Daten in das BIM Modell dar.

Diese medienbruchfreie Übergabe birgt die Möglichkeit, Ausführungsdaten aus dem Zwilling zu ziehen und in der hausinternen Baukonstruktion ein Asbuilt Modell inklusive der reellen Ausführungszeiten oder der gemessenen, geometrischen Abweichungen zu erhalten.

Anwendungsfälle wie 4D Asbuilt Simulationen oder Variantenvorschläge sind zwei von unzähligen Anwendungsfällen, die sich daraus ableiten lassen. [1]

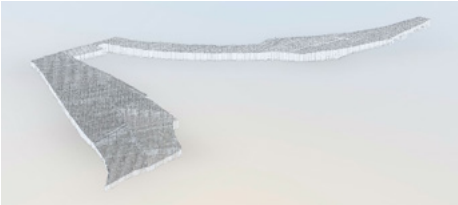

Abbildung 12: Asbuilt 3D Modell der zur Bodenverbesserung ausgeführten ca. 14.000 Geotextilsäulen

Die erstellten Modelle können aber auch auf Seiten des Kunden für dessen interne Prozesse, wertschöpfend als Bestandsdokumentation des Bauwerks eingebracht werden und im Lebenszyklus des Bauwerks weiter Verwendung finden.

Konkret wurden bei diesem Projekt das Teilmodell Asbuilt Spezialtiefbau als IFC Modell mit semantischen Informationen an die DEGES zur weiteren Nutzung übergeben.

9 Zusammenfassung / Ausblick

Die Nutzung des digitalen Zwillings findet in diversen Branchen immer breiteren Einsatz und birgt - wie am Bauvorhaben A26 Los 3.2 gezeigt – auch in der Bauindustrie enormes Potential.

Begrüßenswerter Weise wird der digitale Zwilling für die Infrastrukturprojekte des Bundes als Langfristziel auch im Masterplan BIM Bundesfernstraßen [2] gefordert. Ein konsequentes Langfristziel zur Digitalisierung der Infrastrukturmaßnahmen des Bundes.

Prozessoptimierung und damit die Reduzierung von Verschwendung stellen neben dem automatisierten Reporting, dem Dokumentationsprozess und der Weiterverwendung der Daten für nachlaufende Systeme heute schon einen großen Mehrwert durch die Effizienzsteigerung im Bauprozess dar.

Dies sind aber erst die ersten, naheliegenden Anwendungsfälle. Die Abbildung des Bauprozesses in strukturierten Datenbanken bildet die Grundlage, um heute noch futuristisch klingende Anwendungsfälle, darauf aufzusetzen. Bauprozessassistenten, basierend auf Vorschlägen von KI oder selbstlernende Bohrgeräte für einen optimierten Bohrfortschritt sind nur zwei der vielfältigen Anwendungen, die sich daraus ableiten lassen.

Die Baubranche entwickelt sich zum Data Driven Business. Folglich müssen Plan- und Produktionsinformationen auf Seiten der öffentlichen Hand und auf Seiten der Bauindustrie als Teil der Wertschöpfungskette erkannt und als eine weitere Stufe der Professionalisierung sinnvoll eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

[1] HDB (2019). *BIM im Spezialtiefbau*, Berlin

[2] BMVI (2021). *Masterplan BIM Bundesfernstraßen*, Berlin

[3] Daubner, M., Henßler, T. (2020). *Staudamm Roßhaupten – Nutzung des digitalen Zwillings in der Ausführung*, Dresden: 43. Dresdner Wasserbaukolloquium

Fachmodell Baugrund – Möglichkeiten und Herausforderungen am Beispiel der DB NBS Gelnhausen – Fulda

Dr.-Ing. Lisa Wilfing, Thomas Hausperger, Boley Geotechnik GmbH, München

Dr. Joachim Michael, Dipl.-Ing. Simon Hippe, Thomas Schneider, Prof. Quick und Kollegen – Ingenieure und Geologen GmbH, Darmstadt

Das Bauwesen befindet sich in einem bedeutenden digitalen Wandel der Planung, Ausführung und des Betriebs. Building Information Modeling (BIM) erfordert insbesondere im Bereich der Geotechnik vor allem das Verständnis für und den Umgang mit Softwarelösungen und stellt neben den hierfür notwendigen technischen Voraussetzungen auch an die Bearbeitung umfassende Herausforderungen und Kenntnisse. Nicht nur für den Modellierungsprozess, sondern auch für den Austausch digitaler Informationen mit den Projektbeteiligten.

Über die Herausforderungen für die Anwendung der BIM-Methode insbesondere bei der Planung von langen Strecken wird am Beispiel des Großprojektes der Neubaustrecke Gelnhausen - Fulda der DB Netz AG berichtet (Gesamtvolumen ABS/NBS Hanau-Würzburg-Fulda ca. 3 Mrd. Euro). Hierbei werden zwei unterschiedliche Planungsvarianten (ca. 44 km bzw. ca. 48 km) mit einem hohen Tunnelanteil detailliert untersucht. Entlang der Trassenvarianten werden geologische Einheiten durchfahren, welche aufgrund der tektonischen Geschichte zu einer Vielzahl an einzelnen Schollen zerlegt sind. Die geologischen als auch hydrogeologischen Gegebenheiten sind vor allem hinsichtlich der Erstellung des 3D-Baugrundmodells als maßgebender Punkt zu sehen.

Im Zuge der Projektbearbeitung hat sich gezeigt, dass Erfahrungen mit der Erstellung von 3D-Baugrundmodellen in dieser Größenordnung innerhalb der Baubranche bislang nur spärlich vorliegen. Im Rahmen der Veröffentlichung wird daher dargelegt, wie die Modellierung des Projektes mit einer großen Gesamtlänge und sehr komplexen Baugrundverhältnissen erfolgt, welche Herausforderungen und welche Prozesse erforderlich sind, um neben der geometrischen Integration und Darstellung der geotechnisch-tunnelbautechnischen Informationen auch deren Attribuierung und Parametrisierung vorzunehmen. Zudem soll über die Kommunikation im Planungsteam, d.h. den Austausch von Daten, berichtet werden.

1 Einleitung

Der Stufenplan des BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) [1] ist ein Modell, welches den Weg zur Anwendung des digitalen Planens, Bauens und Betreibens transparent beschreibt und die Vorgehensweise bundesweit zum Standard machen soll. Der wesentliche Aspekt des Stufenplans ist die Definition der zu erfüllenden Mindestkriterien zur Umsetzung der BIM-Methode in der Baubranche.
Grundsätzlich liegt der Kern der BIM-Methode in der Erstellung von dreidimensionalen Bauwerksmodellen, welche vordefinierte Bauteile und Strukturelemente beinhalten. Solche vordefinierte Modelle gibt es in der geotechnischen Modellierung nicht. Ein Bauwerksmodell ist grundsätzlich an jedem beliebigen Ort der Erde anwendbar, ein Baugrundmodell ist ortsspezifisch und aufgrund der natürlichen Entstehung nicht allgemein reproduzierbar und geometrisch heterogen beschaffen.

Bislang basieren die Anforderungen des Stufenplans, festgehalten in den AIA (Auftraggeber-Informations-Anforderungen), daher auf den Bereichen Hochbau und Infrastrukturplanung.

Das „Fachmodell Baugrund“ weicht somit von seiner inhaltlichen Struktur deutlich von den anderen Fachmodellen (z. B. Konstruktiver Ingenieurbau, Signaltechnik, Gebäude uvm.) ab (Abb. 2).

Um auch für die Geotechnik eine einheitliche Grundlage zu schaffen, wurde der DGGT Arbeitskreis 2.14 „Digitalisierung in der Geotechnik“ gegründet. Die erste Empfehlung dieses Arbeitskreises besteht aus dem wichtigen Aspekt, zuallererst die grundlegenden Begriffe für die BIM-Methode mit dem Fokus Geotechnik aufzulisten und zu definieren (Abb. 1). Die zweite Empfehlung des Arbeitskreises befasst sich mit der Definition der Entwicklungsstufen und den Anforderungen bei der Attribuierung des Fachmodells Baugrund.

Abb. 1: Begriffe der BIM Methode (Fokus Geotechnik)

Der Beitrag soll einerseits aufzeigen, welche Herausforderungen durch die Einführung des digitalen Bauens und vor allem durch das „Fachmodell Baugrund“ mit der 3D-Baugrundmodellierung durch die Geotechnik-Branche zu bewältigen sind. Andererseits sollen auch die Möglichkeiten der BIM-Methodik anhand des Projektbeispiels der Neubaustrecke Gelnhausen - Fulda erläutert werden.

2 Projektbeschreibung

Die Strecke zwischen Hanau und Fulda ist eine wichtige und stark befahrene Bahnstrecke. Aufgrund der Überlastung der Bahnstrecke, welche derzeit von bis zu 300 Nahverkehrs-, Fernverkehrs- und Güterzügen befahren wird, sollen mit dem Projekt Ausbau- /Neubaustrecke Hanau – Würzburg/Fulda bestehende Engpässe gelöst und die vorhandene Kapazität erhöht werden. Weiterhin soll sich durch die Neubaustrecke die Fahrzeit für den Fernverkehr wesentlich verkürzen.

Die neue Strecke gliedert sich in zwei Abschnitte. Die Ausbaustrecke (ABS) Hanau – Gelnhausen sowie die Neubaustrecke (NBS) Gelnhausen – Fulda, wobei für den ersten Abschnitt ab Hanau die Trassenlage bereits feststeht. Für den Neubauabschnitt Gelnhausen – Fulda befindet sich das Projekt hingegen in der Vorplanungsphase und die Festlegung der Trassenführung steht noch aus.

Aus einer Vielzahl von Varianten wurden zwei potenzielle, zwischen 44 km und 48 km lange Linienverläufe (Variante IV und VII) für den Abschnitt der NBS ausgewählt, an denen, parallel zur laufenden Raumordnung, eine Baugrunderkundung durchgeführt wird. Die Baugrunderkundungskampagne ist mehrstufig aufgebaut. Auf Basis der Erkenntnisse aus Bestandsunterlagen sowie den Erkundungen der Stufe 1 wird abgewogen, welche Variante vertieft untersucht werden soll. Nach dieser Entscheidung erfolgen die optionalen Erkundungskampagnen der Stufen 2 und 3 für die spätere Planfeststellung.

3 Fachmodell Baugrund – State of the Art

Aufgrund des Stufenplans des BMVI ist bei allen neu zu planenden, öffentlichen Projekten seit 2020 die BIM-Methode umzusetzen. Es wird zwischen openBIM (softwareunabhängiges Datenformat, z. B. IFC-Format) und closedBIM (softwaregebundenes Datenformat, wird vom AG in den AIA vorgeschrieben), unterschieden.

Für die Geotechnik bedeutet dies unter anderem die Erstellung des „Fachmodells Baugrund“; ein attribuiertes und parametrisiertes 3D-Baugrundmodell. Um den Stufenplan schnell umsetzen zu können, ist definiert, welche Schritte hierfür nötig sind. Als erstes ist bereits in der Ausschreibung seitens des AG mittels den Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA) darzulegen, welche Daten verlangt werden und in welcher Detailtiefe. Danach

wird der Prozess zur Herstellung der geforderten Daten im BIM-Abwicklungsplan (BAP) festgehalten, welcher der maßgebende Fahrplan eines jeden BIM-Projektes ist. Zudem ist bereits im Vergabeverfahren zu gewährleisten, dass der Auftragnehmer bzw. auch der Auftraggeber über eine ausreichende BIM-Qualifikation verfügt. Gerade dies ist in der aktuellen Anfangsphase von BIM in der Geotechnik – mangels Projektreferenzen – schwierig umzusetzen.

Die Integration des „Fachmodells Baugrund" in das Gesamtmodell ist notwendig, um schon während der Planung die Eigenschaften des Baugrunds in den anderen Gewerken zu berücksichtigen und die Informationen für Abläufe und Kostenprognosen auszuwerten (Abb. 2).

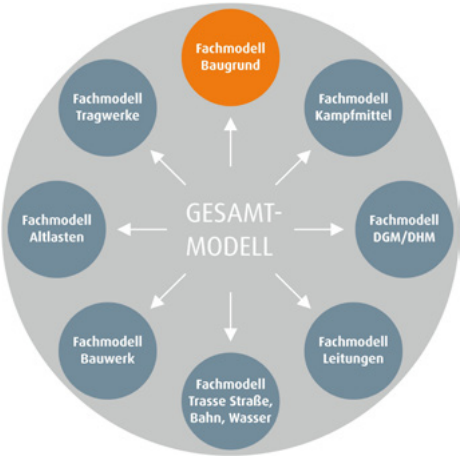

Abb. 2: Aufbau des Gesamtmodells mit den einzelnen Fachmodellen (verändert n. [3]).

Das Fachmodell enthält sämtliche Informationen, die den Baugrund beschreiben (Abb. 3). Hier sind vor allem Geländemodelle, Altlasten- & Kampfmittelverdachtsflächen, geologische und hydrogeologische Grundlagen sowie die Erkenntnisse aus projektspezifischen Baugrunderkundungen zu nennen (z. B. Mächtigkeit und Beschaffenheit der Baugrundschichten, Grundwasserstände, Homogenbereiche, ect.).

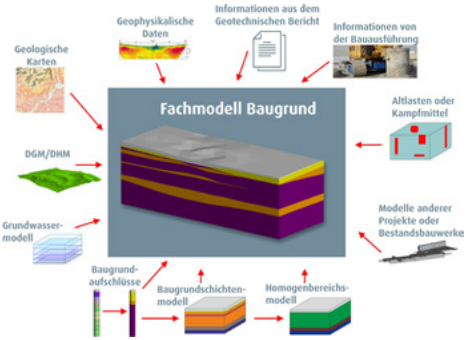

Abb. 3: Benötigte Fachdaten zur Erstellung des „Fachmodells Baugrund" (verändert n. [3]).

Das Fachmodell gilt jedoch nur in Verbindung mit dem Geotechnischen Bericht und ist als Ergänzung von diesem zu sehen.

Mit Fertigstellung des Geotechnischen Berichtes ist das „Fachmodell Baugrund" zu übergeben und sollte aus folgenden 3D-Teil-Fachmodellen bestehen:

- Teil-FM „Aufschluss"
- Teil-FM „Baugrundschichten"
- Teil-FM „Homogenbereiche"
- Teil-FM „Grundwasser".

Die Sub-Fachmodelle sind jeweils miteinander verknüpft und basieren aufeinander. Eine allgemeine „Musterlösung" für die Bearbeitung der Volumenkörper bzw. Attribuierung gibt es bislang noch nicht. Der AK 2.14 der DGGT hat sich dieser Aufgabe angenommen und erarbeitet momentan Empfehlungen für den Aufbau eines BIM-fähigen 3D-Baugrundmodells.

3.1 Empfehlungen des AK 2.14 der DGGT

Bislang existieren, wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, zwei Empfehlungen des Arbeitskreises 2.14 „Digitalisierung in der Geotechnik".

Die erste Empfehlung [3] befasst sich mit den nötigen Grundlagen wie der Definition der Begriffe zur Schaffung einer einheitlichen Sprache, den Bestandteilen des „Fachmodells Baugrund" sowie den datentechnischen Strukturen. Welche Fachdaten im

Modell enthalten sein müssen, ist im Rahmen der AIA festzulegen (Abb. 1).

Die zweite Empfehlung [4] beschreibt die Entwicklungsstufen des Fachmodells analog zu den Leistungsphasen der HOAI mit den dafür jeweils notwendigen Fachinhalten. Zudem werden Mindestanforderungen von Fachinhalten für die einzelnen Entwicklungsstufen definiert. Die Empfehlung liefert auch die Voraussetzung für die Standardisierung von geotechnischen Eigenschaften (Attribuierung) sowie die datentechnischen Anforderungen hierfür.

Noch offene Themen sind die Beschreibung von Anwendungsfällen und die Zuweisung von Zuständigkeiten bei der Erstellung und Verwendung des „Fachmodells Baugrund".

4 Anwendungsbeispiel DB NBS Gelnhausen – Fulda

Die BIM-Methodik im Bereich Geotechnik kam mit der ersten Erkundungsstufe des Großprojekts NBS Gelnhausen - Fulda der Deutschen Bahn zum Einsatz. In dieser Erprobungsphase wurde die Erstellung des geotechnischen Fachmodells mit verschiedenen Softwarelösungen untersucht. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde die Softwareapplikation Leapfrog Works® gewählt, welche die geologische 3D-Modellierung des Projektgebiets durch die Verwendung radialer Basisfunktionen (RBF) ermöglicht. Dabei werden feinlinige Oberflächen zwischen Punkten erzeugt, die die unterschiedlichen lithologischen Schichtgrenzen zwischen Topographie und Geologie darstellen. Dieser Untergrund, geprägt durch die sehr komplexe Bruchschollentektonik der Süddeutschen Großscholle, ist von zahlreichen Störungen und Verwerfungen durchzogen.

Zunächst wurde das Fachmodell Baugrund auf Grundlage von Archivbohrungen, geologischem und tektonischem Kartenmaterial sowie mit der Ausschreibung übergebenen ersten geologische Längsschnitten erstellt. Mit Fortschreiten der Erkundungskampagne konnten die zunächst aus Archivunterlagen entnommenen Informationen präzisiert bzw. fortgeschrieben werden. Mit dieser Entwicklung war nun auch das Fachmodell Baugrund fortzuschreiben. Grundlage dafür waren neben den bis zu 190 m tiefen Aufschlussbohrungen, mehr als 11 km oberflächennahe geophysikalische Erkundungsmaßnahmen (kombinierte Refraktions-/Reflexionsseismik), geophysikalische (akustische/optische) Versuche in Bohrungen, umfangreiche felsmechanische und hydrogeologische Versuche in den Bohrungen sowie die boden- und fels-mechanischen Laboruntersuchungen.

4.1 Grundlagen der Modellierung

Leapfrog Works® ermöglicht die Weiterverarbeitung einer Vielzahl unterschiedlicher Daten(formate) zu unterschiedlichen Zwecken, wodurch die hier beschriebene Vorgehensweise zur Erstellung eines „Fachmodells Baugrund" empirischen Ursprungs ist und demnach weitere, andere Herangehensweisen offen lässt.

Im Falle des Großprojekts NBS Gelnhausen – Fulda wurden als Topographie, der Basis des Modells, digitale Geländemodelle mit einer Gitterweite von 10 m (DGM10), also Rasterinformationsdateien benutzt, welche als Gitternetz verknüpft wurden und so das Projektgebiet großflächig abdecken und darstellen. Darin platziert wurde die Umgrenzung des eigentlichen Trassenbereichs der Variante IV und VII als 2D-CAD-Zeichnung (DWG-Datei), welche einen Bereich von je 200 m links- und rechtsseitig der eigentlichen Trasse markiert. Bei späteren Modellierungen wurde auf eine großflächige Darstellung der Topographie verzichtet und diese auf den besagten Trassenbereich begrenzt erstellt. Die eigentliche Gradiente der Schienenführung mitsamt Kilometrierung wurde als XML-Datei eingepflegt.

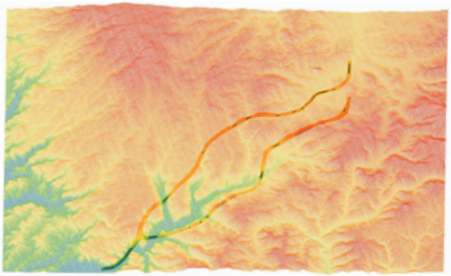

Abb. 4: Topographie des Projektgebiets mit angedeutetem Trassenbereich.

Um die im Projektgebiet vorherrschende Tektonik mitsamt ihrer Störungen im Untergrund zu modellieren, wurden die Gradienten der Bahntrassen und die tektonische Karte als Kartenlayer in das Open-Source-Geographische-Informationssystem (QGIS®) eingepflegt. Die Koordinaten der Schnittstellen zwischen Trassenführung und Störungen als auch deren Position im Raum (Streichen, Fallen) wurden ermittelt und als CSV-Datei in Leapfrog Works® eingelesen. Dabei stellt jeder einzelne Schnittpunkt zwischen Tektonik und Trassengradiente eine eigene „Störungsscheibe" dar, die besagter Lage im Raum folgt. Entlang dieser Störungsscheiben lassen sich Netze aufspannen, welche als Störungsflächen weiter definiert werden können und sich damit im gesamten Projektraum schneiden können.

Die historischen Beziehungen der Störungen wurden ausgewertet um bestimmen zu können, welche Störung älter bzw junger ist. Das Entstehungsalter bestimmt, welche Störung von einer anderen überprägt bzw. begrenzt wird. Um die tektonischen Verhältnisse auf den Trassenbereich zu begrenzen, wurden 2D-Polylinien entlang der Trassengrenzen gezeichnet, welche als „künstliche" Störungsflächen fungieren. Da diese in der Historie als jüngste Störungen definiert wurden, bildeten sie eine natürliche Barriere entlang der Trassen und grenzten die zu betrachtende Tektonik und ihre Störungsflächen auf den Trassenbereich ein.

Aktiviert man nun die Tektonik des Modells, werden Volumina, begrenzt durch die Störungsflächen, erzeugt. Die Trassenführung der NBS Gelnhausen – Fulda kreuzt so beinahe 100 Störungsblöcke, die - einzelne Schollen innerhalb der tektonischen Verhältnisse des Projektgebiets repräsentierend - die umfassende Komplexität des Fachmodells Baugrund in diesem Projekt verdeutlichen (Abb. 5).

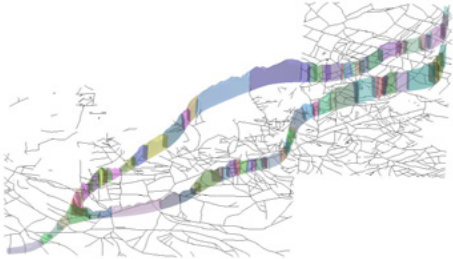

Abb. 5: Störungsblöcke (unterschiedliche Farbgebung) entlang des Trassenverlaufs mit tektonischem Kartenlayer hinterlegt.

Der lithologische Inhalt des Fachmodells Baugrund wurde mittels der Schichtenverzeichnisse aus den Projektbohrungen und Archivbohrungen erstellt. Da jeder Block für sich bereits ein geologisches Modell innerhalb des eigentlichen Fachmodells darstellt und für seine Modellierung auf Daten angewiesen ist, waren zusätzliche Fiktivbohrungen nötig, die Informationen aus den geotechnischen Längsschnitten und dem geologischen Kartenmaterial enthalten. Diese wurden entlang der beiden Trassen innerhalb der Blöcke platziert, für die mit der ersten Erkundungsphase (Abstand der Bohrungen im Mittel 500 m) noch keine direkten Auschlüsse vorlagen. Als Stütze hierbei wurden die geologischen Karten als 2D-Bilder in Leapfrog Works® geladen, georeferenziert und als Kartenlayer unter die Topographie des Projektgebiets gelegt. Ebenso wurden die vorhandenen geologischen Längsschnitte entlang der Gradiente der Trasse positioniert und mithilfe der Koordinaten der Bohrpunkte georeferenziert (Abb. 6). Mit voranschreitender Erkundung wurde das Netz aus verfügbaren Bohrungen engmaschiger und ein großer Teil an fiktiven Aufschlüssen konnte durch Projektbohrungen ersetzt werden.

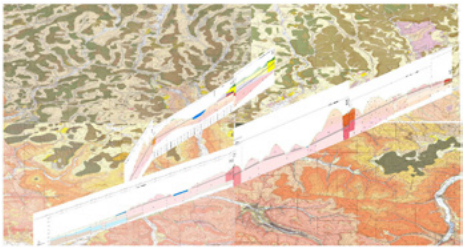

Abb. 6: Geologische Karten und Längsschnitte entlang des Trassenverlaufs als Modellierungsstütze.

Bei dieser simultanen Modellierung des Fachmodells Baugrund und den umfangreichen Erkundungs-maßnahmen kommt es zu einer stetigen Veränderung des Fachmodells. Dies zeigte sich insbesonders bei der Einmessung neuer Bohrungen. Deren Ansatzpunkte lagen stellenweise unter oder über den NHN-Angaben der anfangs eingepflegten Topographie (DGM10). Das Einlesen der Erkenntnisse aus diesen Bohrungen in Leapfrog Works® erforderte zunächst eine manuelle Aktualisierung der Topographie an die Koordinaten der Bohransatzpunkte.

Die Bohrungen wurden mittels zweier CSV-Dateien in Leapfrog Works® eingepflegt. Die erste dieser CSV-Dateien enthielt die Bezeichnungen der Bohrungen, ihre Koordinaten sowie ihre Endteufen. Die zweite CSV-Datei bezieht sich auf die erste und enthielt neben der Bezeichnungen der Bohrungen deren unterschiedlichen lithologischen Einheiten und Tiefenangaben. Diese Angaben sind für die Implementierung von Bohrungen in Leapfrog Works® zwingend notwendig. Mit der stetig größer werdenden Ansammlung an Informationen, beispielsweise aus Laborversuchen, konnten weitere Informationen der CSV-Datei hinzugefügt und eingelesen werden. So wurden die Bohrungen zusätzlich attribuiert.

Der Untergrund des Projektgebiets wird aus 13 unterschiedlichen lithologischen Einheiten aufgebaut. Für die Modellierungwerden, der erwähnten radialen Basisfunktion (RBF) folgend, Punkte zwischen den Bohrtiefen gleicher Lithologien verbunden und unterirdische Oberflächen als feinlinige Netze erzeugt. Der Fehler bzw. die Genauigkeit dieser Basisfunktion kann manuell bearbeitet werden, wodurch die Lage von Grenz- bzw Oberflächen justiert und verfeinert werden kann (krigging). Ähnlich den Störungsflächen werden daraufhin die Grenzflächen aktiviert, wodurch sich die gewünschten Volumina zwischen den Schichtgrenzen aufbauen (Abb. 7).

Abb. 7: Modellieren der Schichtgrenzen (krigging) anhand der Bohrungen innerhalb der Störungsblöcke.

Auf diese Art lassen sich unterschiedliche Grenzen und Volumina modellieren – wie etwa Gesteinsabfolgen oder auch ungerichtete Intrusionen.

Wie den Bohrungen können auch den Volumina Attribute zugeordnet werden. Dies funktioniert jedoch nicht mittels CSV-Dateien. Werte und Eigenschaften zu den Lithologien können bzw. müssen manuell in Leapfrog Works® in eine durch das Hinzufügen von Spalten erweiterbare Tabelle eingetragen werden.

Als Fachmodell mit Schwerpunkt auf dem tunnelbautechnischen Aspekt wurden mittels AutoCAD Civil 3D insgesamt 46 Tunnelabschnitte als 3D-CAD-Zeichnung (DWG-Datei) erstellt (Abb. 8).

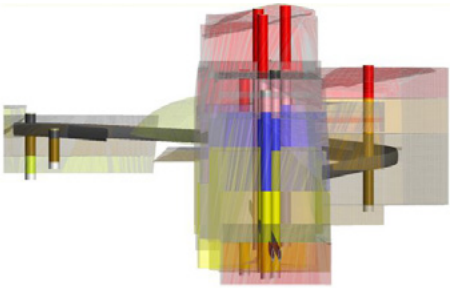

Abb. 8: Tunnelsegmente innerhalb des modellierten Baugrunds.

Ziel der Integration der Tunnel in das Fachmodell Baugrund war die Ermittlung der Lage der Vortriebe mit Zuordnung zur maßgebenden umliegenden Baugrundschichten und mit diesem räumlichen

Modell dann auch die Bewertung möglicher Vortriebsarten und Abschätzung der Erfordernis von zusätzlichen Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen. Später soll dann auch die Ermittlung der Kubaturen von Ausbruchmassen etc. ermöglicht werden.
Gerade an diesen Schnittstellen von Lithologie, Störungen und Tunnelröhren, aber auch an anderer Stelle im Trassenverlauf, ist die Option, manuelle Schnitte in jede beliebige Richtung und mit beliebiger Gradzahl zu setzen, von Vorteil.

Allgemein dargestellt werden kann das Fachmodell als Ganzes – demnach mit allen zuvor beschriebenen 2D- und 3D-Importen - am integrierten Leapfrog Works Viewer® und als reiner 3D-Export für BIM-Viewer und zur weiteren Verarbeitung in CAD-Applikationen. Für diese externe Weiterverwertung können die geometrischen und alphanumerischen Informationen zu den Bohrungen oder zu den Volumina des Untergrunds exportiert werden. Weiterhin kann das gesamte Fachmodell Baugrund – hier mit den integrierten Tunneldaten - exportiert werden. Ebenfalls exportiert werden können zum Beispiel über Leapfrog Works® gezeichnete Polylinien, (Falten)netzgitter etc.

Die für das Fachmodell Baugrund des Projekts DB NBS Gelnhausen – Fulda relevanten Daten wie die Topographie, der Baugrund mit seinem Schollenmosaik, die Bohrungen, die Trassen sowie die Tunnel – wurden mitsamt ihrer geometrischer und alphanumerischer Parameter als Industry Foundation Classes (IFC) exportiert.

4.2 Herausforderungen bei der Modellierung und Ausblick

Bei der Modellierung des Fachmodells Baugrund des Projektes DB NBS Gelnhausen – Fulda mit Leapfrog Works® konnten und können die ersten Schritte im eingangs beschriebenen digitalen Wandel von Planung, Ausführung und Betrieb im Bereich der Geotechnik gemacht werden. Dennoch gibt es offene Fragen und Aufgabenstellungen zur Integration von Leapfrog Works® und allgemein von BIM in das Fachgebiet Geotechnik - insbesondere unter Bezug auf die Integration und den Export von Daten.
Leapfrog Works® stellt große Anforderungen an die verfügbare Hardware, inbesondere wenn es um das Einlesen und Darstellen komplexer Strukturen geht. Genauso herausfordernd stellte sich das Aktivieren der Volumina der Störungsblöcke und das Erstellen der Störungsflächen dar. Nötige Anpassungen der Topogaphie an neu eingemessene Bohransatzpunkte sorgen für eine grundlegende Umstrukturierung der Oberfläche. Während das tektonische Grundmuster des Fachmodells eher konstant bleibt, wurde und wird eine Topographie stetig aktualisiert. All diese Punkte führen zu mehrstündigen Ladezeiten (verwendet wurde eine HP Z4 G4 Tower Workstation mit NVIDIA RTX™ A4000, Intel® Xeon® W-2245 Grafikkarte, 64 GB DDR4-2933 Arbeitsspeicher, SSD-Laufwerk 1 TB).

Eine zweite große Herausforderung, die sich während der Arbeiten mit Leapfrog Works® gezeigt hat, ist der recht große Spielraum der Interpretation bei der Modellierung eines großflächigen und volumenstarken Untergrundes. Die in Abschnitt 4 beschriebene Grundlage der Applikation – die Verwendung radialer Basisfunktionen (RBF) zur Erstellung von Oberflächen und den dazwischenliegenden Volumina – kann den tatsächlichen Untergrund nicht gänzlich realitätsgetreu darstellen. Die RBF erzeugte in unserem Beispiel Oberflächen bzw Volumina und Verknüpfungen zwischen Punkten, die nicht immer nachvollziehbar waren und erst durch manuelles Nachjustieren zu zufriedenstellenden Ergebnissen führten. Eine absolute, realitätsgetreue Darstellung eines geotechnischen Fachmodells Baugrund als Digital Twin ist zum jetzigen Zeitpunkt mit Leapfrog Works® (noch) nicht möglich.

Eng verknüpft mit der Aussage, der Baugrund stellt kein homogenes Modell dar, ist eine weitere Problematik: Die Bezeichnung von Strukturen mittels klar definiertem GUID (Globally Unique Identifier) sowie deren Attribuierung bzw Parametrisierung im Fachmodell Baugrund. Leapfrog Works® ermöglicht die alphanumerische Beschriftung der Lithologien Bohrungen und Volumina.

Nicht möglich ist jedoch die Attribuierung der Bohrungen als Ganzes; so müssen alle Eigenschaften an die erteuften Schichten geknüpft werden – die genauere Beschreibung einer Bohrung, beispielsweise mittels Datum, Angaben zu Bearbeiter:innen oder zum möglichen Ausbau zu einer Grundwassermessstelle ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

Wurden nun die Objekte des Fachmodells Baugrund mitsamt ihrer Attribute als IFC-Modelle aus Leapfrog Works® exportiert und in einem BIM-Viewer oder weiteren CAD-Applikationen geladen, wurden ihre Bezeichnungen wie „Projektbohrung Nummer 10" oder „Störungsblock Nummer 70" sowie ihre Attribute beispielsweise als „Geschoss" oder „Raum" interpretiert – sie werden demnach als Objekte des Hochbaus oder der Architektur gedeutet sowie mit einem unklaren GUID versehen. Dieses Problem dürfte auch bei anderen Softwareherstellern auftreten, da zum aktuellen Zeitpunkt der Bereich Geotechnik bei den IFC-Datenformaten und der Datenstruktur nicht ausreichend integriert wird. Somit ist grundsätzlich die openBIM-Fähigkeit sowie der offene Datenaustausch – als ein Grundgedanke der BIM-Methodik – zwischen unterschiedlichen Soft-ware-Herstellern zu hinterfragen.

Die standardisierte Attribuierung von Objekten und die Vergabe von GUIDs ist wie erwähnt Gegenstand großer Diskussionen und stellt einen Kernpunkt bei der erfolgreichen Umsetzung der BIM-Methodik für den Bereich Geotechnik dar. Die Deutsche Bahn hat hierfür erste Versionen von Richtlinien für semantische BIM-Objektmodelle bei ihren Projekten erstellt. Diese gelten als Grundlage für zukünftige AIAs und sollen mit der Unterstützung und konstruktiven Kritik von Fachkräften und BIM-Nutzer:innen fortlaufend weiterentwickelt werden.

Eine Weiterentwicklung von geeigneten Software-Applikationen ist bei mehreren Softwareentwicklern zu erkennen. Im Falle von Leapfrog Works® werden in mehr oder minder regelmäßigen Abständen Updates und neue Versionen entwickelt und veröffentlicht. Dabei wird großes Augenmerk auf flüssigere Arbeitsabläufe und die Verringerung von Datenvolumen gelegt. So konnte die erwähnte Problematik der langen Ladezeiten weiter verbessert werden.

Der Erfolg der Einführung der BIM-Methodik in den Bereich der Geotechnik ist geprägt durch aktuell aufwändige Prozesse und Abstimmungen auch mit Softwareherstellern. Diese sind im Sinne der Aufwandsvergütung zu verringern und so zu regeln, dass eine Honorarermittlung auf Grundlage der AIA im Sinne von Grundleistungen der HOAI möglich ist und auch besondere Leistungen abgrenzen lassen.

Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium fur Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015): Stufenplan Digitales Planen und Bauen.

[2] Bundesministerium fur Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2017): Umsetzung des Stufenplans "Digitales Planen und Bauen"- erster Forschrittsbericht.

[3] Molzahn, M., Bauer, J., Henke, S. & Tilger, K. (2021): Das Fachmodell Baugrund – Empfehlung des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik"; Geotechnik, 44, 1.

[4] Molzahn, M., Bauer, J., Henke, S. & Tilger, K. (2021): Entwicklungstufen und Attribuierung des Fachmodells Baugrund – Empfehlung Nr. 2 des Arbeitskreises 2.14 der DGGT „Digitalisierung in der Geotechnik"; Geotechnik, 44, 3.

[5] Bundesministerium fur Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019): Handreichung und Leitfäden – Teil 1: Grundlagen und BIM-Gesamtprozess

Aktuelle Entwicklungen zur Finalisierung der zweiten Generation des Eurocode 7

Dr.-Ing. Stefan Weihrauch, Grundbauingenieure Steinfeld und Partner, Beratende Ingenieure mbB, Hamburg
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart
Dr.-Ing. Robert.-B. Wudtke, wudtke geotechnik – Ingenieurbüro, Weimar
Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt, TU München, Zentrum Geotechnik, Lübeck

Die derzeit gültige erste Generation des Eurocode 7 wird seit 2011 überarbeitet und weiterentwickelt. Die zweite Generation, die aus drei Teilen bestehen wird, soll 2024 veröffentlich werden. Für den neuen Eurocode 7, der neue Regelungen u. a. zu Baugrundverbesserungen, Vernagelungen und zum Bauen mit Geokunststoffen enthalten wird, liegen inzwischen weitgehend konsolidierte Entwürfe vor, zu denen noch 2022 das sogenannte ´Formal Enquiry´ stattfinden wird. In dem vorliegenden Beitrag wird über jüngste Entwicklungen auf dem Weg zur Finalisierung der zweiten Generation des Eurocode 7 und über Auswirkungen für die nationale Bemessungspraxis berichtet, wobei der Schwerpunkt auf den bemessungsrelevanten Teilen 1: Allgemeine Regeln und 3: Geotechnische Bauten liegt.

1 Einleitung

1.1 Aktuelle Situation

Die zentrale Norm für die geotechnische Bearbeitung von Projekten in Deutschland ist aktuell der Eurocode 7 (EC 7), DIN EN 1997 in der Fassung von September 2009 mit dem Titel: "Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik" und den zwei Teilen:

- Teil 1: Allgemeine Regeln
- Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds.

Zu beiden Teilen bestehen Nationale Anhänge, in denen sogenannte NDPs: National Determined Parameters, festgelegt sind, wobei im EC 7 die Stellen klar geregelt sind, an denen NDPs verwendet werden dürfen. Die europäischen Normen für das Bauwesen dürfen außerdem um nicht konkurrierende und nicht widersprechende nationale Regeln ergänzt werden. Dazu wurden in Deutschland zum Teil 1 die Ergänzungsnorm DIN 1054:2010-12: „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1" und zum Teil 2 die Ergänzungsnorm DIN 4020:2010-12 veröffentlicht.

Die europäische Norm, der zugehörige Nationale Anhang und die Ergänzungsnorm wurden für beide Teile jeweils in einem so genannten Normenhandbuch zusammengeschoben, um das parallele Arbeiten mit mehreren Dokumenten zu vermeiden.

DIN 1054 ist gemeinsam mit DIN EN 1997-1 in allen Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt. Sie verweist zudem auf nachgeordnete Normen: Berechnung von Gründungen, Gründungselemente, Gründungsverfahren und Empfehlungen der DGGT wie EAU, EAB, EAP etc., die damit bauaufsichtliche Verbindlichkeit erhalten. DIN 4020 und DIN EN 1997-2 wurden bauaufsichtlich nicht eingeführt. Die Einführungserlasse für DIN 1054 machen jedoch die Regeln der DIN 4020 durch folgenden Hinweis verbindlich: "*DIN 1054 nimmt wiederholt Bezug auf Ergebnisse von Baugrunduntersuchungen, die den Anforderungen der Norm DIN 4020 genügen. Diese müssen vor der konstruktiven Bearbeitung der baulichen Anlage vorliegen*". Jeder Tragwerksplaner muss danach eine konkrete Baugrunduntersuchung als Basis seiner Arbeit verwenden und kann diese bei seinem Auftraggeber einfordern. Die bautechnische Prüfung von Bauun-

terlagen, die ohne Grundlage einer Baugrunduntersuchung erstellt wurden, muss von vornherein abgelehnt werden.

In EC 7-1 und EC 7-2 sind Anhänge enthalten, für die z.T. national entschieden werden kann, ob sie informativ oder normativ sein sollen. Damit wird es möglich, informative Anhänge durch nationale Regelungstexte zu den in derartigen Anhängen behandelten Themen zu ersetzen.

1.2 Fortschreibung der aktuellen Normung

Für alle Normen wird regelmäßig in mehrjährigen Abständen entschieden, ob sie beibehalten, überarbeitet oder ersetzt werden sollen. Das für die europäischen Entwurfsnormen des Bauwesens zuständige technische Komitee TC 250 hat auch für den EC 7 eine intensive Überarbeitung als Grundlage für eine zweite Generation beschlossen. Seit 2011 wird daher im Sub-Committee SC 7 daran gearbeitet. Zunächst wurden zu 14 Themen so genannte Evolution Groups gebildet, in denen thematisch geordnet neue Eckpunkte festgelegt und Inhalte perspektivisch diskutiert wurden. In diesem Kontext wurde festgestellt, dass im Vergleich zur ersten Generation des EC 7 u.a. die Themen *´Numerical models´, ´Reinforced soil´, ´Seismic design´* und *´Ground Improvement"* zukünftig integriert werden sollten. Mit dem Mandat M/515 der europäischen Kommission wurde 2014 beschlossen, die „Evolution of Next Generation of Eurocodes" zu betreiben und zu finanzieren. Dabei wurden die Harmonisierung der unterschiedlichen nationalen Regelungen mit Verminderung von NDPs und die einfache Handhabung des Regelwerkes neben der Transparenz der Regeln für die Zuverlässigkeit als besondere Anforderungen hervorgehoben. Der EC 7 der zweiten Generation sollte zudem in 3 Teilen neu gegliedert werden:

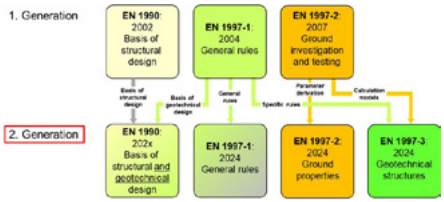

Abbildung 1-1: Neue Gliederung des EC 7

- Teil 1: General Rules / Allgemeine Regeln
- Teil 2: Ground properties / Bodeneigenschaften
- Teil 3: Geotechnical structures / Geotechnische Bauten

Für die konkrete Erarbeitung der neuen Norm wurden dementsprechend drei *Working Groups* gebildet, innerhalb denen in *Task Groups* Diskussionen von Experten strukturiert wurden und in *Project Teams* der Text des Codes erarbeitet wurde. Eine große Zahl der Experten kam dabei aus Deutschland. Bei der Auswahl der Mitarbeiter und Leiter in den *Project Teams* wurde auf eine ausgeglichene Repräsentanz der Nationen und Regionen geachtet. Nachdem eine erste Gesamtfassung der drei Teile des EC 7 im Jahr 2020 als Entwurf vorlag, wurden die *Task Groups* neu strukturiert. Dabei steht im Vordergrund, dass die Anwendbarkeit der neuen Norm gesichert werden kann, im Vergleich zur Vorfassung keine unerwünschten Konsequenzen entstehen und die Norm in allen beteiligten Nationen Akzeptanz finden kann. Alle neuen Task Groups haben die Möglichkeit, sogenannte *Change Requests* (*CRs*) zu formulieren, um den Entwurfsstand vom November 2021 zu optimieren. Die *Change Requests* müssen nachvollziehbar begründet werden, klare neue Formulierungsvorschläge enthalten und in den international besetzten Gruppen fachlichen Konsens finden. Eine Gruppe, in der jede beteiligte Nation einen Vertreter entsendet, entscheidet über die Annahme oder Ablehnung der *CRs*, wobei die Erreichung konsensualer Entscheidungen ohne Veto-Ansagen angestrebt wird. Eine kleine Gruppe kümmert sich um die redaktionelle Umsetzung unter Beachtung der CEN-Regeln für die Erarbeitung von Normen. Zum 01.10.2022 soll ein aktualisierter Entwurf vorliegen, der dann in einer *´Formal Enquiry´* von al-

len beteiligten Nationen letztmalig fachlich bis zum 22.12.2022 kommentiert werden kann. Nach Berücksichtigung dieser Kommentare wird dann ein letzter Entwurf im Sommer 2024 zum *´Formal Vote´* verteilt. Ziel ist es, dass dieser Normenstand dann mit großer Mehrheit von allen Nationen bestätigt und danach europaweit veröffentlicht wird.

2 EN 1997-1:2024 ´General rules´

2.1 Grundsätzliche Festlegungen

EN 1997 (kurz: EC 7) basiert auf EN 1990 (*Basis of structural and geotechnical design*) (Bond et al. 2019a) und steht neben den primär materialbezogenen Eurocodes (EC 2: Beton, EC 3: Stahl, EC 5: Holz, EC 6: Mauerwerk) sowie dem EC 8: Erdbebenwiderstand.

EC 7 setzt Prinzipien und Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Robustheit und Dauerhaftigkeit von geotechnischen Bauten.
Für alle Eurocodes wird vorausgesetzt, dass sie von angemessen qualifiziertem und erfahrenem Personal, definiert in EN 1990, Annex B4 angewendet werden.

2.2 Wichtige Begriffe

- zone of influence: Sie beschreibt die Ausdehnung des Bereiches, der in der Umgebung von geotechnischen Bauten Einfluss auf die Struktur nimmt und von der Struktur beeinflusst wird. Bei der Baugrunduntersuchung muss diese zone of influence erkundet werden.
- geotechnical design model: Geotechnische Überlegungen und Nachweise beruhen auf Modellen. Ein GDM enthält zunächst geometrische Beschreibungen der Ausdehnung und Lage von Bereichen des Baugrunds (Homogenbereiche), verbunden mit der Beschreibung der Eigenschaften und den Parametern von Stoffmodellen und beschreibt auch die Grundwassersituation. Modelle müssen verifiziert und validiert werden, auch dafür werden im EC 7 Anforderungen gestellt.
- Verification Case (VC): Die auf eine Konstruktion einwirkende Last oder Beanspruchung wird je nach betrachteter Bemessungssituation mit unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten verknüpft. Die VCs, früher Design Case (DC) genannt, und die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte sind in EN 1990 definiert:

  Design Case 1 (DC 1/VC 1) is used both for structural and geotechnical design.
  Design Case 2 (DC2/VC2) is used for the combined verification of strength and static equilibrium, when the structure is sensitive to variations in permanent action arising from a single-source. Values of γF are taken from columns (a) or (b), whichever gives the less favourable outcome.
  Design Case 3 (DC3/VC3) is typically used for the design of slopes and embankments, spread foundations, and gravity retaining structures. See EN 1997 for details.
  Design Case 4 (DC4/VC4) is typically used for the design of transversally loaded piles and embedded retaining walls and (in some countries) gravity retaining structures. See EN 1997 for details.

Bei VC 1 wird unterschieden, ob eine Einwirkung günstig oder ungünstig wirkt, was mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten verknüpft ist. Beispielsweise wird bei Anwendung von VC 1 bei einem Grundbruchnachweis eine ständige Vertikallast mit dem Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 multipliziert. Wirkt gleichzeitig eine veränderliche horizontale Einwirkung, die mit 1,5 zu multiplizieren ist, ist die ständige vertikale Einwirkung mit 1,0 als Teilsicherheitsbeiwert zu multiplizieren, was die Lastneigung und die Exzentrizität stark beeinflusst. Bei Anwendung von VC 4 wird dagegen die variable horizontale Einwirkung mit einem 1,1-fach höheren Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt als die günstige ständige vertikale Einwirkung, was gegenüber VC 1 die maßgebende Exzentrizität und Lastneigung der Bemessungs-Beanspruchung in der Fundamentsohle und im Ergebnis die Fundamentabmessung vermindert.

- **values of ground properties:** hier wird zwischen derived values, characteristic valures, representative values, design values und best estimate values unterschieden. Ein **derived value** ist ein Wert, der aus Theorie, Korrelation oder Testergebnissen ermittelt wurde. Ein **nominal value** ist dagegen ein Wert, der mit gesundem Ingenieurverstand auf der sicheren Seite liegend vorsichtig abgeschätzt wird. Bei einem **characteristic value** liegt der Wertermittlung eine statistische Untersuchung zu Grunde und er entspricht in der Regel einem 5 %- oder 95 %-Fraktilwert. Aus einem characteristischen oder nominalen Wert wird ein **repräsentative value** gebildet, wobei eine Multiplikation mit einem Konversionsfaktor vorgenommen wird, mit dem z. B. Alterungseffekte berücksichtigt wewrden können. Dem Design-Ingenieur ist freigestellt, ob er dem repräsentativen Wert einen charakteristischen oder einen nominalen Wert zu Grunde legt. Durch Multiplikation mit einem Teilsicherheitsbeiwert wird aus dem repräsentativen Wert der **design value** gebildet. Mit einem **best estimate value of a ground property:** wird ein Wert bezeichnet, der den tatsächlichen Wert mit höchster Wahrscheinlichkeit trifft (z. B. aus Rückrechnungen und mit dem Ziel, möglichst zutreffende Verformungen zu ermitteln).
- Bei **Grundwasserdruck** ist ebenfalls zwischen repräsentativen Werten und Bemessungswerten zu unterscheiden. Der in Deutschland häufig verwendete „Bemessungswasserspiegel" mit typischen Jährlichkeiten zwischen 50 und 200 Jahren für den Fall, dass ausreichend lange Messreihen herangezogen werden können, oder andernfalls ein mit den Verantwortlichen abgestimmter vorsichtiger Schätzwert bewirkt einen repräsentativen Wasserdruck. Für die Festlegung des Bemessungswerts des Wasserdrucks sind daraus folgend drei Alternativen vorgesehen:
  - direkte Festlegung
  - Festlegung eines Zuschlags zum repräsentativen Wert der piezometrischen Druckhöhe
  - Anwendung eines Teilsicherheitsbeiwertes auf den Druck oder auf die Auswirkungen des Wasserdrucks.

    Einwirkungen aus Wasser werden in Abschnitt 6.1.3.2 von EN 1990 behandelt, und der EC 7-1 Abschnitt 6 nimmt darauf Bezug. Dabei wird eine Unterscheidung in permanente, variable und accidentiale Einwirkungen empfohlen. Es werden für besondere Betrachtungen hinsichtlich von Lastkombinationen und Verformungen auch Angaben für den zeitlich variablen Wasserdruckanteil $Q_{w,k}$, $Q_{w,comb}$ und $Q_{w,freq}$ gemacht. Bei Jährlichkeiten über 1000 und im Falle des Versagens technischer Einrichtungen zur Wasserdruckbegrenzung kann der Fall „accidental" angewandt werden.

2.3 Basis of design (Grundlage von Entwürfen)

2.3.1 Geotechnical reliability (Zuverlässigkeit)

Die Zuverlässigkeit geotechnischer Konstruktionen nach transparenten Kriterien sicherzustellen, ist eine im europäischen Mandat verankerte zentrale Aufgabe des EC 7, der dazu verschiedene Kriterien vorgibt.

- Alle geotechnischen Konstruktionen sollen **Geotechnical Complexity Classes (GCC)** zugeordnet werden, womit die Unsicherheit und Variabilität hinsichtlich der Baugrundverhältnisse und der Sensibilität bezüglich von (Grund-)Wasser, sowie Komplexität der Boden-Bauwerk- Interaktion bewertet werden.
- Außerdem fordert EN 1990 eine Zuordnung zu **Consequence Classes (CC)**, womit die Bedeutung der Konstruktionen im Fall eines Versagens erfasst wird. Die CC wirkt sich mit einem Faktor kf auf die Teilsicherheitswerte für Einwirkungen aus. Die Faktoren kf sind NDP und es ist vorgesehen, sie in Deutschland auf den Wert 1 zu setzen.
- Aus der Kombination von GCC und CC ergibt sich eine Zuordnung zur **Geotechnical Category (GC)**, die aber auch durch unmittelbarere Zuordnung (siehe Tabelle DIN 1054/4020) ermittelt werden kann.Die GC hat Auswirkungen auf die Erkundung und das Qualitätsmanagement von Entwurf und Ausführung

2.3.2 Allgemeine Anforderungen

Ohne besonders große Regelungstiefe werden Anforderungen gestellt an:

- **Robustness:** Forderung nach Duktilität; Vermeidung großer Schäden durch verhältnismäßig kleine und unplanmäßige Zusatzeinwirkungen oder durch Toleranzüberschreitungen
- **Dauerhaftigkeit:** insbesondere infolge Einwirkungen aus der Umgebung und Umwelt
- **Nachhaltigkeit:** Ressourcenschonung, Lebenszyklusbetrachtung, Recycling
- **Qualitätsmanagement:** Regelung hinsichtlich Kontrollen, Prüfungen, z.T. in Abhängigkeit von der Geotechnischen Kategorie durch Festlegung von
  - Design Qualification and Experience Level
  - Design Check Level
  - Inspection Level
  - Validierung des Geotechnischen Design Models sowie aller Informationen aus dem Geotechnical Investigation Report (GIR) und der Nachweis-Modelle

2.3.3 Basic variables; Actions, Influences, Material properties

- **Actions:** Berücksichtigung permanenter und variabler **Einwirkungen**, von cyclic and dynamic actions sowie accidental actions
- **Influences:** Es sind auch Einflüsse zu berücksichtigen, die keine unmittelbaren Einwirkungen darstellen, z. B. aus Klima, Grundwasserschwankungen, Hohlräumen, chemischem Angriff, biologischer Aktivität
- **Material and Product Properties:** Regelungen zu repräsentativen Eigenschaften, charakteristischen Werten (mit Anhang A zu statistischen Grundlagen dazu), nominalen und best-estimate Werten

2.3.4 Mögliche Nachweise der Standsicherheit

Um mit dem geotechnischen Entwurf die Standsicherheit geotechnischer Konstruktionen nachzuweisen, sind mehrere Methoden im EC 7 verankert.
Bei der **Methode der Partialsicherheitsbeiwerte** werden Grenzzustandsnachweise geführt. Sie zeigen, dass Einwirkungen oder Beanspruchungen, welche mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöht werden, kleiner sind als Widerstände, die mit Teilsicherheitsbeiwerten vermindert werden bzw. mit reduzierten Materialkennwerten errechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit ist, die Einhaltung von **prescriptive rules** nachzuweisen, z. B. durch Anwendung von Tabellen, wie sie in Deutschland für zulässige Sohldruckspannungen verwendet werden.

Auch **by testing** kann gezeigt werden, dass ein Bauteil oder ein Bauwerk nicht versagt, wie dies z. B. Pfahlprobebelastungen üblich ist.

Nachweise **by the Observational Method** erfordern eine Bauausführung mit messtechnischer Begleitung, Dabei wird der Bauablauf schrittweise gestaltet und nach jedem Schritt geprüft, ob die Messwerte im vorher errechneten Bereich verbleiben. Sobald festgestellt wird, dass Warnwerte oder Grenzwerte erreicht oder überschritten werden, wird der Bauablauf derart angepasst, dass im weiteren Verlauf die Messwerte im vorher als zulässig nachgewiesenen Bereich verbleiben. Die Anwendung der Beobachtungsmethode setzt ein duktiles Verhalten des Systems voraus, bei dem genügend Puffer für die Anpassung der Bauverfahren bleibt, wenn dies aufgrund bedenklicher Messwerte erforderlich ist, und plötzliches Versagen ohne messbare Vorankündigung ausgeschlossen ist. Mögliche angepasste Bauverfahren und messbare Auswirkungen im Baugrund oder der geotechnischen Konstruktion, z. B. Verformungen, Kräfte oder Spannungen mit zugehörigen Erwartungs- und Grenzwerten müssen vor der Bauausführung mit Anwendung der Beobachtungsmethode detailiert geplant werden.

2.3.5 Limit states

Clause 8 beschäftigt sich mit den **Grenzzuständen des Versagens**, die teilweise hier nur aufgelistet und später in Teil 3 des EC 7 detailliert behandelt

werden. Nachweise gegen den Verlust des vertikalen Gleichgewichts und hydraulische Versagensarten werden jedoch an dieser Stelle des Teils 1 geregelt. Der auch in EN 1990 geforderte Nachweis gegen „failure due to **excessive deformations** of the ground" ist in Deutschland aktuell nicht als solcher in den Regelwerken erfasst. Es geht darum auszuschließen, dass ein Bauwerk dadurch versagt, dass der Baugrund unverträglich große Verformungen erfährt, sei es durch die Belastung des Bauwerks selbst oder durch benachbarte Einwirkungen. Dabei geht es nicht um Baugrundversagen. Mit der Regelung soll sichergestellt werden, dass ein Einsturz unterirdischer Hohlräume, der Kollaps von entsprechend strukturierten Böden wie z. B. Löss, Baugrundverflüssigung, oder Verformungen durch chemische Umwandlungen wie bei Anhydrit nicht zu Bauwerksversagen führen. Zur Diskussion steht aber auch, die Baugrundverformungen infolge von um Teilsicherheitsbeiwerte erhöhte Einwirkungen aus dem Bauwerk selbst als unschädlich nachzuweisen. Gegenüber dem Gebrauchstauglichkeitsnachweis, dassVerformungen des Baugrunds infolge der repräsentativen Bauwerksbelastungen im verträglichen Rahmen bleiben, stellt der Nachweis gegen excessiv deformations ein deutlich vorsichtigeres Vorgehen dar. Statt einen Nachweis zu führen, wird es häufig zielführend sein, durch Baugrundverbesserung oder konstruktive Maßnahmen exzessive Verformungen auszuschließen.

Beim Nachweis gegen „loss of rotational equilibrium" geht es z. B. um das **Kippen** eines Turmfundamentes auf hartem Fels, in dem kein Baugrundversagen gibt, aber eine klare Kippkante angenommen werden kann. In nachgiebigem Boden muss ein Umkippen dadurch verhindert werden, dass kein Grundbruch unter exzentrischer, geneigter Einwirkung auftritt.

Der Nachweis gegen den Verlust des vertikalen Gleichgewichts infolge von **Auftrieb** gilt nicht nur für hohle Baukörper, sondern auch für undurchlässigen Baugrund, unterhalb dessen Wasserdruck führender durchlässiger Baugrund ansteht. Hier ist ein Vergleich destabilisierender Auftriebskräfte mit stabilisierenden Eigengewichts- und Reibungskräften, aber auch mit Bauteilwiderständen z. B. durch Anker zu führen.

Die geforderten und geregelten Nachweise gegen **hydraulisches Versagen** erfassen den hydraulischen Grundbruch sowie internal erosion and piping. Das Nachweisformat beim hydraulischen Grundbruch ist etwas anders, als es bisher gebräuchlich war, die Ergebnisse und Konsequenzen änderen sich aber nicht.

Die Regelungen gegen Versagen infolge **zyklischer Einwirkungen** enthalten nur Hinweise auf zu berücksichtigende Phänomene aber keine zu führenden Nachweise.

Den **numerischen Verfahren**, die inzwischen eine überragende Bedeutung bei Nachweisen in der Geotechnik aufweisen, wird ausführliche Beachtung gegeben. Im Hinblick auf Standsicherheitsnachweise sind hier zwei Nachweisverfahren von Bedeutung, der Material Factor Approach (MFA) und der Effect Factor Approach (EFA). Beim MFA wird gezeigt, dass auch mit um Teilsicherheitsbeiwerte abgeminderten Materialparametern der Festigkeit noch ein Gleichgewicht möglich ist. Beim EFA werden um mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöhte Beanspruchungen mit um mit Teilsicherheitsbeiwerten verminderte Widerstände im Bauteil oder im Baugrund verglichen. Der EC 7 fordert im Regelfall, dass beide Nachweisverfahren angewendet werden und das ungünstigere Ergebnis zu berücksichtigen ist, aktuell wird aber darüber im SC 7 darüber diskutiert, hier nationale Freiräume zu belassen.

In clause 9 werden die **Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit** behandelt. Verformungen des Baugrunds unter Gründungen werden weiterhin ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen oder für Baugrundsteifigkeiten ermittelt. Die Kriterien zur Überprüfung, welche Verformungen verträglich sind, sind neuerdings in EN 1990 geregelt, nicht mehr im EC 7. Auch hydraulische Aspekte der Gebrauchstauglichkeit sollen erfasst werden.

2.3.6 Implementation of design, testing, reporting

Diese Themen sind in EN 1997-1 in den clauses 10 bis 12 geregelt. Es wird die Wichtigkeit unterstrichen, die für den geotechnischen Entwurf wichtigen Aspekte, Voraussetzungen und Erkenntnisse in die Phase der Bauausführung zu übertragen. Supervision (Aufsicht und Kontrolle), Inspection (Überprüfung) und Monitoring (Überwachung) sind die Werkzeuge dafür. Auch die Maintenance (Wartung) während der Nutzungszeit des geotechnischen Bauwerks gehört in diesen Zusammenhang. Es verwundert, dass die genannten Aktivitäten nur im EC 7 behandelt werden, nicht aber in den materialbezogenen europäischen Baunormen.

Testing muss regelkonform geplant und ausgewertet werden. Es kann dazu dienen, Baugrundparameter zu ermitteln, die Ausführbarkeit des Entwurfs, den Widerstand geotechnischer Konstruktionen gegen Einwirkungen und die erreichte Qualität zu überprüfen.

Das **Reporting** dient der Transparenz und Nachprüfbarkeit. Wer schreibt, der bleibt. EC 7 legt wesentliche Punkte fest, die im Ground Investigation Report (GIR), dem Geotechnical Design Report (GDR), dem Geotechnical Construction Report (GCR) und für Tests dokumentiert werden müssen. Hier werden Anforderungen festgelegt, nicht (nur) Empfehlungen gegeben. Ein Dokument, in dem bautechnische Folgerungen und Empfehlungen auf der Grundlage der festgestellten Baugrundverhältnisse festgehalten werden und derdie Basis für den GDR bildet, wird im EC 7 nicht behandelt. Aus Sicht der Autoren gehen die Anforderungen zum Reporting teilweise über das grundsätzlich richtige Ziel, den Entwurf, die Berechnungen und die Bemessung in der Geotechnik mit nachvollziehbar hoher Qualität zu gestalten,und zugunsten von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit geotechnischer Maßnahmen hinaus.

3 EN 1997-2:2024 ´Ground properties´

3.1 Inhalt und Gliederung

Die neue Version der EN 1997-2:2024 trägt den Titel „Ground properties" (Bodeneigenschaften). Die Änderung des Titels, vormals „ground investigation" (Baugrunduntersuchung), ist mit einer Neuordnung der inhaltlichen Struktur des Dokumentes verbunden. Diese ist auf die für den Baugrund wesentlichen Parameter fokussiert.

Im Detail hat die Neufassung der EN 1997-2:2024 die folgende Struktur:

1 Scope
2 Normative references
3 Terms, definitions, and symbols
4 Ground Model
5 Ground investigation
6 Description and classification of the ground
7 State, physical, and chemical properties
8 Strength
9 Stiffness, compressibility and consolidation
10 Cyclic, dynamic, and seismic properties
11 Groundwater and geohydraulic properties
12 Geothermal properties
13 Reporting

Die neue Struktur des Dokumentes kann in die Themenkomplexe **Grundlagen und Erkundung** (Abschnitte 1 bis 5), **Parameterbestimmung** (Abschnitte 6 bis 12) und **Bericht** (Abschnitt 13) verallgemeinert werden.

Die Einbindung und Bedeutung der EN 1997-2:2024 als Grundlagenbeschaffer für die Bemessung geotechnischer Bauwerke, erläutert in den Bemessungsregeln der EN 1997-1:2024 und den geotechnischen Anwendungen in EN 1997-3:2024, bleibt erhalten.

3.2 Neuerungen in EN 1997-2

Die EN 1997-2:2024 stellt als Ziel der Baugrunduntersuchung die Erstellung des Baugrundmodells ins Zentrum. Im gleichnamigen Kapitel 4 sind zudem die wesentlichen Informationen zu den abgeleiteten Werten, als Übergabeinformation für die geotechnische Bemessung, zusammengefasst.

Die Randbedingungen zur Durchführung von Baugrunduntersuchungen sind in Kapitel 5 enthalten. Hierzu zählen alle Informationen zu den verschiedenen Phasen und Arten geotechnischer Untersuchungen sowie die Mindestanforderungen an Baugrunduntersuchungen. Für Bauwerke der Geotechnischen Kategorie 2 (GK2) werden Zahlenwerte zur bauwerkspezifischen Mindestdichte von Erkundungsstellen genannt. Weiterführende Informationen zu mindestens erforderlichen Erkundungstiefen sind ebenfalls bauwerksbezogen in EN 1997-3:2024 enthalten.

In den Kapiteln 6 bis 12 sind für unterschiedliche Arten von geotechnischen Parametern die wesentlichen Informationen zusammengefasst. Grundsätzlich zählen hierzu die Anforderungen an die Probengewinnung, einsetzbare Versuchsmethoden und Informationen zur Auswertung.

Die Abschnitte 6 bis 12 sind gemäß der Häufigkeit der Verwendung der Parameter bei der Erstellung des Baugrundmodells sowie bei der Verwendung im Zuge der geotechnischen Bemessung geordnet. Themen wie Klassifizierung des Baugrundes, Zustandseigenschaften sowie physikalische und chemische Baugrundeigenschaften sind voran gestellt. Es folgen die Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie die Eigenschaften bei dynamischer, zyklischer und seismischer Beanspruchung des Baugrundes. Den Abschluss bilden die hydraulischen und die thermodynamischen Baugrundeigenschaften.

In allen Kapiteln wurden die Informationen zur Untersuchung und Parameterbestimmung an Festgestein gestärkt.

Im abschließenden Kapitel 13 werden die wesentlichen Bedingungen zur Erstellung des Geotechnischen Berichtes (GIR) formuliert. Diese stehen grundsätzlich im Zusammenhang zum gleichnamigen Kapitel der EN 1997-1:2024.

4 EN 1997-3:2024 ´*Geotechnical structures*´

4.1 Inhalt und Gliederung

Der neue Teil 3 des Eurocode 7 trägt den Titel ´*Geotechnical structures*´ und wurde im Wesentlichen aus den bisherigen Kapiteln 5 bis 12 des bestehenden EN 1997-1 entwickelt, wobei die bisherigen Regelungen grundlegend überarbeitet und ergänzt wurden (Bond et al. 2019b). Zusätzlich wurden vier Kapitel vollständig neu erarbeitet, die erstmals im Regelungsbereich des Eurocode 7 die Bemessungsaufgaben ´*Reinforced fill structures*´, ´*Ground reinforcing structures*´, ´*Ground improvement*´ und ´*Groundwater control*´ umfänglich abdecken.
Die Struktur des EN 1997-3:2024 wird 12 Kapitel (´Clauses´) umfassen, die sich entsprechend Tabelle 4-1 gliedern. Tabelle 4-1 verdeutlicht ferner, wie die Kapitel des aktuellen EN 1997-1, also der bestehenden 1. Generation in den neuen Teil 3 überführt wurden. Aus dem aktuellen EN 1997-2 wurden die Berechnungsverfahren (z. B. für Pfähle auf Basis von CPT-Sondierungen) ebenfalls in den neuen EN 1997-3 integriert.

EN 1997-3:2024		EN 1997-1:2004
1	Scope	–
2	Normative references	–
3	Terms, definitions, and symbols	–
4	Slopes, cuttings, and embankments	11 ´Overall Stability´ und 12 ´Embankments
5	Spread foundations	6 ´Spread Foundations´
6	Piled foundations	7 ´Pile Foundations´
7	Retaining structures	9 ´Retaining Structures´
8	Anchors	8 ´Anchorages´
9	Reinforced fill structures	neu (Abs. 5.5 ´Ground improvement & reinforcement´)
10	Ground reinforcing structures	neu
11	Ground improvement	neu (Abs. 5.5)
12	Groundwater control	neu (Abs. 5.4 ´Dewatering´)
Annexes A-G (zu Clauses 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 11)		

Tabelle 4-1: Struktur des neuen EN 1997-3:2024 im Abgleich mit dem bestehenden EN 1997-1:2004.

Im Sinne der Benutzerfreundlichkeit (´Ease of use´) wurde für die Kapitel 4 bis 11 des neuen EN 1997- 3 eine einheitliche Struktur, d.h. eine einheitliche Gliederung der Abschnitte gewählt, die der Struktur des neuen EN 19971-1 folgt und in Tabelle 4.2 dargestellt ist.

Gliederung der Kapitel 4-11 des EN 1997-3:2024	
x.1	Scope and field of application
x.2	Basis of design
x.3	Materials
x.4	Groundwater
x.5	Geotechnical analysis
x.6	Ultimate limit states
x.7	Serviceability limit states
x.8	Implementation of design
x.9	Testing
x.10	Reporting

Tabelle 4-2: Struktur des neuen EN 1997-3:2024.

In den neuen Abschnitten x.3 *´Materials´* erfolgt primär ein Verweis auf EN 1997-2 *´Ground properties´*, es wird aber auch auf durch andere ECs bisher nicht abgedeckte materialspezifische Regelungen z.B. zu Geokunststoffen, Suspensionen, Mörtel, etc. verwiesen.

In dem ebenfalls neuen Abschnitten x.4 *´Groundwater´* wird primär auf die Regelungen in EN 1997-1, Kapitel 6, verwiesen, die in EN 1997-3 um wenige zusätzliche Regelungen für spezifische Anwendungen bei den einzelnen geotechnischen Konstruktionen ergänzt werden.

In dem Abschnitt x.5 *´Geotechnical analysis´* jedes Kapitels werden die Rechenmodelle und Berechnungsansätze spezifiziert, die den Anspruch haben, im europäischen Maßstab weit verbreitet und allgemein akzeptiert zu sein. Teils stammen diese Berechnungsansätze aus den Anhängen des aktuellen Eurocode 7 Teil 1 und 2, teils sind diese neu. Ein Beispiel ist der für Flachgründungen relevante Abschnitt 5.5, der jetzt u.a. Formeln für die Ermittlung des Grundbruch- und Gleitwiderstandes enthält. Ein zweites Beispiel ist der für Stützbauwerke relevante Abschnitt 7.5, in dem man nun einen Ansatz für die Ermittlung des aktiven Erddrucks findet. Die Eingangsparameter finden sich in beiden Fällen in den jeweils maßgeblichen Anhängen des

EN 1997-3, durch möglichen Ersatz dieser Anhänge können diese national festgelegt werden, so wie dies in Deutschland in diesem Fall mit den Normen DIN 4017 für den Grundbruch und DIN 4085 für den Erddruck der Fall ist und bleiben wird.

In den Abschnitten 6 *´Ultimate Limit States´* aller Kapitel des Teils 3 werden für jede Anwendung die zu betrachtenden Nachweise sowie für jeden Nachweis die maßgebenden Nachweiskombinationen, d.h. der maßgebende *Verification Case* und das zugehörige Nachweisformat (*RFA/MFA*) sowie für den *Resistance Factor Approach* die Teilsicherheitsbeiwerte für die geotechnischen Widerstände spezifiziert. Das Vorgehen für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann damit wie folgt zusammenfasst werden: Im EN 1990 werden sowohl die *Consequence Classes* (mit *Consequence Factors* K_F/K_M) als auch die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F/γ_E auf Einwirkungen und Beanspruchungen für die *Verification Cases* VC1 bis VC4 definiert und zwar auch für die geotechnischen Nachweise. In EN 1997-1 finden sich dann die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M (M1/M2) auf die Materialkennwerte, während im EN 1997-3 die Definition des Nachweisformat für jede Anwendung/Struktur sowie die Teilsicherheitsbeiwerte γ_R für die Widerstände spezifiziert werden (Estaire et al. 2019). Analoges gilt für die Abschnitte x.7 *´Serviceability limit states´*.

Die neuen Abschnitte x.8 *´Implementation of design´* widmen sich der Übertragung der Bemessung in die Ausführung, wobei hier primär auf die Ausführungsnormen des Spezialtiefbaus (TC 288) verwiesen wird und ergänzende Regelungen zu *´Inspection, Monitoring and Maintenance´* aufgenommen wurden.

Die neuen Abschnitte x.9 *´Testing´* sind insbesondere für die Kapitel 6 *´Pile foundations´*, 8 *´Anchors´*, 11 *´Ground Improvement´* relevant und beinhalten u.a. Verweise auf Ausführungsnormen für Anker- und Pfahlprobebelastungen (EN ISO 22477).

In den neuen Abschnitten x.10 *´Reporting´* erfolgt primär ein Verweis auf die Regelungen in EN 1997-1, Kapitel 12, die um wenige zusätzliche Regelungen für spezifische Anwendungen ergänzt werden.

4.2 Neuerungen in EN 1997-3

Nachfolgend sollen einige ausgewählte wesentliche Änderungen und Neuerungen in EN 1997-3 gegenüber der bestehenden EN 1997-1 exemplarisch vorgestellt und erläutert werden.

Clause 4: ´Spread foundations´

Für die Bemessung von Flachgründungen wurden detailliertere Regelungen und Formeln für die Ermittlung des Grundbruchwiderstands und des Gleitwiderstands aufgenommen. Die Nachweisformate für exzentrisch belastete Fundamente wurden modifiziert. Beim Grundbruchnachweis spielt im vorhandenen EC 7 das Nachweisverfahren DA 2* eine besondere Rolle. Damit war es möglich, die Lastneigung und Exzentrizität mit charakteristischen Werten der Einwirkungen zu ermitteln. Eine ähnliche Sonderregel ist im neuen EC 7 nicht vorgesehen, allerdings kommt der Verification Case VC 4 dem Ansatz DA 2* recht nah. Es konnte mit Hilfe von deutschen CR erreicht werden, dass bei geringen Lastneigungen von $H/V < 0{,}2$ beim Grundbruchnachweis VC 4 verwendet werden darf. Näheres zum Thema der Lastneigung beim Grundbruchnachweis in diesem Zusammenhang findet sich bei Schuppener et al (2020).

Clause 6: ´Piled foundations´

Das Kapitel für die Pfahlgründungen wurde umfassend überarbeitet (Moormann 2016a). Ergänzende Regelungen finden sich u.a. bezüglich der Einwirkung auf Pfähle aus Bodenverformungen, wobei die Vorgaben für die Ermittlung der negativen Mantelreibung weitgehend den bestehenden Empfehlungen der ´EA-Pfähle´ entsprechen (Moormann 2016b).

Während sich die aktuelle Fassung des Kapitels 6 im EN 1997-1 ausschließlich mit der Bemessung von Einzelpfählen beschäftigt (Moormann 2018), werden in der Revision konsequent Pfahlgruppen und Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP) gleichberechtigt behandelt, d.h. Anforderungen an die Berechnung spezifiziert und ein Nachweisformat formuliert. Damit werden KPPs zukünftig gleichberechtigt zu Flach- und Pfahlgründungen normativ im EC 7 geregelt.

Harmonisiert werden konnte auch das Nachweisformat für Pfähle. Danach wird jetzt in Europa einheitlich für axial beanspruchte Pfähle der *Resistance Factor Approach* genutzt, so wie dies u.a. in Deutschland schon immer Usus war (Moormann 2016b), während für lateral beanspruchte Pfähle im Regelfall der *Material Factor Approach* anzuwenden ist.

Clause 9: ´Reinforced fill structures´

Das neu erstellte Kapitel 9 regelt erstmalig die Nachweisformate und Berechnungsmodelle für alle Arten von bewehrten Konstruktionen, zu denen in Analogie zur EBGEO bewehrte Stützkonstruktionen, Dämme mit einer Basisbewehrung (z.B. auf wenig tragfähigem Untergrund), die Bewehrung oberflächennaher geschichteter Systeme und bewehrte Erdkörper über punktförmigen Traggliedern oder auch Sicherung vor Erdeinbrüchen zählen. Dabei werden Bewehrungen aus Geokunststoffen und Stahl berücksichtigt.

Clause 10: ´Ground reinforcing structures´

In dem neu entwickelten Kapitel 10 finden sich insbesondere Regelungen für die Bemessung von Bodenvernagelungen, die bisher weder in EC 7 noch auf nationaler Ebene normativ geregelt sind. Während frühere Entwürfe sich nur auf die Elemente solcher Systeme wie Boden- und Felsnägel und das *Facing* wie Spritzbetonschale, Netze o.ä. bezog, wurde das Kapitel zuletzt dahingehend überarbeitet und fortentwickelt, dass auf dieser Basis Bodenvernagelungen als integrale Konstruktionen ganzheitlich bemessen werden können.

Clause 11: ´Ground improvement´

Das Kapitel 11 *´Ground Improvement´* ist ebenfalls vollständig neu. Nach viele Jahre währenden Diskussionen, wie Baugrundverbesserungen im Hinblick auf die Vielzahl von verschiedenen Verfahrenstechniken und Anwendungen überhaupt strukturiert in eine europäische Bemessungsnorm aufgenommen werden können, hat man sich letztlich dafür entschieden, eine Klassifikation nach den Bemessungsansätzen vorzunehmen. Es erfolgt daher eine grundlegende Unterscheidung in *´Diffused Ground Improvement´* (*´Family A´*), bei denen der verbesserte Baugrund mit seinen veränderten Eigenschaften weiterhin als Kontinuum betrachtet werden kann, und *´Discrete Ground Improvement´* (*´Family B´*), bei denen diskret wirkende Elemente im Baugrund berücksichtigt werden, die eine deutlich höhere Steifigkeit bzw. Scherfestigkeit gegenüber dem umgebenden Baugrund besitzen (Tabelle 4-3). Insbesondere die Abgrenzungskriterien und Bemessungsansätze für Baugrundverbesserungen des Typs BII *´Discrete ground improvement with rigid inclusions´* waren dabei Gegenstand intensiver Diskussionen. Letztlich ist es aber gelungen, für alle Klassen von Baugrundverbesserungen Ansätze für die Bemessung wie auch für die Nachweisformate im EN 1997-3 zu etablieren.

Class	Family	
	A – Diffused	B – Discrete
I	AI – Diffused with no unconfined compressive strength *The improved ground has an increased shear strength higher than that of the original ground. The improved ground can be modelled as a ground with improved properties.*	BI – Discrete with non-rigid inclusions *Inclusions, installed in the ground, with higher shear capacity and stiffness compared to the surrounding ground. The unconfined compressive strength of the inclusion is not measurable.*

Class	Family	
	A – Diffused	B – Discrete
II	AII – Ground improvement zone with unconfined compressive strength *The improved ground is modified from its' original natural state, has a measurable unconfined compressive strength and is significantly stiffer than the surrounding ground. Usually, it comprises a composite of a binder and ground.*	BII – Discrete with rigid inclusions *Rigid inclusions, installed in the ground, with unconfined compressive strength significantly stiffer than the surrounding ground. The inclusions can be an engineered material such as timber, concrete/ grout or steel or a composite of a binder and ground.*

Tabelle 4-3: Klassifikation von Baugrundverbesserungen nach EN 1997-3:2024, Clause 11.

Clause 12: ´Groundwater control´

Das neue Kapitel 12 befasst sich mit allen Formen von *´Groundwater control´*, i.e. Grundwasserhaltungsmaßnahmen, künstliche Dichtelemente etc. Die Regelungen haben dabei eher den Charakter allgemeiner Empfehlungen, denn konkreter Bemessungsvorgaben, so dass dieses Kapitel nur bedingt überzeugt.

Literaturverzeichnis

Bond, A.J., Formichi, P., Spehl, P., van Seters, A.J. (2019a). T*omorrow's geotechnical toolbox: EN 1990:202x Basis of structural and geotechnical design*. Proc. 17th ECSMGE, Reykjavik, Iceland

Bond, A.J., Jenner, C., Moormann, Ch. 2019b. *Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-3:202x Ground Structures*. Proc. 17th ECSMGE, Reykjavik 2019, Iceland

Estaire, J., Arroyo, M., Scarpelli, G., Bond, A.J. (2019). *Tomorrow's geotechnical toolbox: Design of geotechnical structures to EN 1997:202x*. Proc. 17th ECSMGE 2019, Reykjavik, Iceland

Franzén, G., Arroyo, M., Lees, A., Kavvadas, M., van Seters, A.J., Walter, H., Bond, A.J. 2019. *Tomorrow's geotechnical toolbox:* EN 1997-1:202x General rules. Proc. 17th ECSMGE 2019, Reykjavik, Iceland

Moormann, Ch. (2016a): *Design of piles according to Eurocode 7 – Expected evolutions*. ISSMGE-ETC3 Int. Symp. on Design of Piles in Europe. Leuven, Belgium, Volume I, 15-28

Moormann, Ch. (2016b): *Design of piles – German practice*. ISSMGE-ETC3 Int. Symp. on Design of Piles in Europe. Leuven, Belgium, Volume I: National Reports, 161-190

Moormann, Ch. (2018): *Pile Design and Execution according to European Codes*. SAICE Geotechnical Devision, Proc. of Workshop ´Design of Piles according to EA-Pfähle (EC 7-1)´. 23-24 October 2018, Johannesburg, South Africa

Norbury, D., Arroyo, M., Foti, S., Garin, H., Reiffsteck, P., Bond, A.J. (2019). *Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-2:202x Ground investigation*. Proc. 17th ECSMGE 2019, Reykjavik, Iceland, ISBN 978-9935-9436-1-3.

Schuppener, B., Vogt, N., Ziegler, M. (2020): Neue Konzepte im Entwurf der EN 1997-1 „Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Proceedings of TAE: 12. Kolloquium für Bauen in Boden und Fels, Esslingen, edited by H. Schad and C. Vogt, 13-19

Hochhaus MYND – Komplexer Spezialtiefbau in einem Bestandsgebäude

Dr.-Ing. Simon Meißner, Maximilian Kies M.Eng., Prof. Quick und Kollegen – Ingenieure und Geologen GmbH

Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter, GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Dipl.-Ing. Bianca Prohl, Signa Real Estate Management Germany GmbH

Am Alexanderplatz in Berlin werden aktuell die Hochhauspläne sukzessive Realität. Hierzu zählt auch das 134 m hohe Hochhaus MYND, welches in den Bestandskellerkasten eines Warenhauses aus den 60er Jahren hineingebaut werden soll. Während des Teilabbruchs und der Herstellung des Neubaus muss der Warenhausbetrieb weiterlaufen. Der Bestandskellerkasten mit 2 Untergeschossen grenzt an die Tunnelbauwerke der U2 und der U8. Infolge der großen Lastbeanspruchung und -exzentrizität erfolgt die Gründung auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung, um die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit des Bestandsgebäudes sowie der benachbarten Tunnelbauwerke zu gewährleisten.

1 Einleitung

Das MYND (Abbildung 1-1) ist Teil der Neugestaltung des Alexanderplatzes und besteht aus einem Hochhausteil mit einer planmäßigen Höhe von 134 m und einem 39 m hohen, angrenzenden Riegelbauwerk auf dem Gelände des Galeria Warenhauses. Beide neuen Gebäudeteile – Hochhaus und Riegel – gründen auf einer Bestandsbodenplatte aus den 60er Jahren und schließen direkt an das Gebäude des Warenhauses an. Dafür wird das bestehende Gebäude im Bereich des Neubaus oberirdisch abgerissen und unterirdisch teilweise rückgebaut. Die Herausforderungen an das Gründungskonzept waren insbesondere die Erhaltung des druckwasserhaltenden Bestandskellerkastens (Abbildung 1-2), die beiden angrenzenden U-Bahn-Tunnel, die außergewöhnlich beengten Platzverhältnisse und der durchgehend zu gewährleistende Warenhausbetrieb.

Abbildung 1-1: Animationsbild MYND, Quelle: Signa

Die wesentlichen Bauwerksdaten des Neubaus sind nachfolgend dargestellt (Tabelle 1-1).

Bauwerksdaten	Hochhaus	Riege
Grundfläche	1250 m²	950 m²
Außenabmessung	28 m x 45 m	19 m x 50 m
Dicke Bodenplatte Bestand	2,20 m bis 3,50 m	2,50 m
Dicke Bodenplatte Neubau	2,85 m	keine
Geschosse	2 x UG 1 x EG 33 x OG	2 x UG 1 x EG 8 x OG

Tabelle 1-1: Bauwerksdaten Bauvorhaben MYND Bauwerksdaten Hochhaus Riegel

Im Bereich des Hochhauses wird zusätzlich zur vorhandenen Bodenplatte eine Bodenplatte mit Grün-

dungspfählen eingezogen. Der Bestandskellerkasten dient aus geotechnischer Sicht für den Bereich Hochhauses in der Bauphase als wasserundurchlässige Baugrubenumschließung. Für den Endzustand müssen für die Anforderungen an eine eigenständige WU-Konstruktion des Hochhauses Schottwände eingezogen und zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt werden.

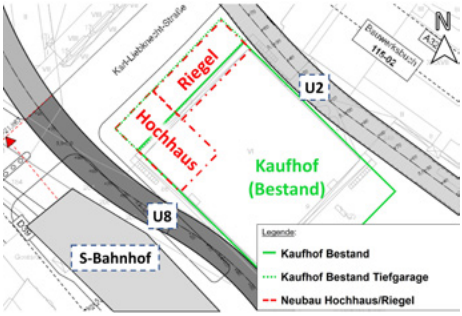

Abbildung 1-2: Neubau Bauvorhaben MYND, Bestandskaufhof und Nachbarbebauung

2 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Der Alexanderplatz liegt in der Berliner Innenstadt, 200 m entfernt vom Berliner Fernsehturm. In ca. 700 m Entfernung verläuft die Spree. Nordwestlich wird der Alexanderplatz von der Karl-Liebknecht-Straße und nordöstlich von der Alexanderstraße begrenzt. Südwestlich verläuft die Dircksen-Straße und südöstlich die Otto-Braun-Straße (Abbildung 2-1).

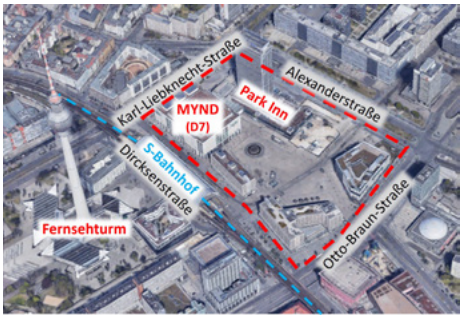

Abbildung 2-1: Lage und Umgebung des Bauvorhabens MYND

Der Baugrundaufbau entspricht weitestgehend den bekannten Verhältnissen im Warschau-Berliner Urstromtal. Die Auffüllungen reichen im Projektgebiet bedingt durch die Baumaßnahmen der 60er Jahre z.T. bis 15 m unterhalb der auf ca. 36,60 mNHN liegenden Geländeoberfläche. Darunter stehen zunächst wechselnd lockere (S1) mitteldichte (S2) und ab ca. 13 mNHN bis –20 mNHN dicht gelagerte Sande (S3) an. Von ca. –20 mNHN bis –32 mNHN folgt eine Schluffschicht mit eingelagerten Braunkohlestücken. Liegend stehen dicht gelagerte Sande (S4) an. Aufgrund von erkundeten Resten eines Geschiebemergelhorizonts wird von einer Schichtgrenze zwischen Talsanden und Schmelzwassersanden ab ca. 9,0 mNHN ausgegangen (Abbildung 2-2).

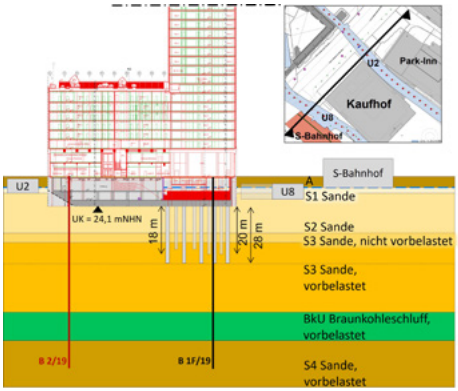

Abbildung 2-2: idealisierter Baugrundschnitt

Im Hinblick auf das mechanische Verhalten dieser anstehenden Bodenformation ist deren Genese von wesentlicher Bedeutung. In der norddeutschen Tiefebene und so auch in Berlin ist die geologische Situation Berlins maßgeblich durch die Vorstöße der Elster-, Saale- und Weichsel-Kaltzeit geprägt. Bei ihrer südlichsten Ausdehnung erreichten die Gletscher der Weichsel-Kaltzeit vor ca. 20.000 Jah-ren eine Linie zwischen den Städten Brandenburg und Baruth/Mark. Für den Berliner Raum können Eisdicken zwischen 100 und 200 m angenommen werden, was einer Auflast von ca. 900 kN/m² bis 1.800 kN/m² entspricht. Für die am Standort erkundeten pleistozänen Bodenformationen und den tiefliegenden Braunkohleschluff kann über die Nachrechnung der Verschiebungsmessungen vorhandener Bauwerke gezeigt werden, dass sowohl der tiefliegende Braunkohleschluff als auch die in

den Elster- und Saale-Kaltzeiten abgelagerten Sande und Geschiebeböden, die durch die nachfolgende Weichsel-Kaltzeit nochmals belastet wurde, die Auswirkung der eiszeitlichen Vorbelastungen berücksichtigt werden können bzw. auch sollten.

Insbesondere in den numerischen Nachbildungen des Verformungsverhaltens ist in diesem Kontext auch der nicht zu vernachlässigende Einfluss der Spannungs- und somit Tiefenabhängigkeit der Bodensteifigkeit der jeweiligen Schichten zu berücksichtigen. In [Mittag 2021] sind hierzu erfahrungsbasierte Ansätze gegeben, die durch entsprechende Laborversuche und auch durch Feldversuche in Form von Pressiometertests untermauert wurden. Im vorliegenden Projekt ergaben die ausgeführten Ödometerversuche eine neuerliche Bestätigung dieser Ansätze.

3 Gründungskonzept Hochhaus MYND

Die Lasten des Hochhauses innerhalb des Bestandskellerkastens werden über eine KombiniertePfahl-Plattengründung (KPP) mit insgesamt 41 mantelverpressten Gründungspfählen mit einem Durchmesser von 1,50 m (Kopfverrohrung) und 1,36 m (suspensionsgestützt) abgetragen. Die Länge der Gründungspfähle beträgt bis zu 28 m und reicht somit in die tragfähigen Bodenschichten der dicht gelagerten Sande. Zudem werden die Pfähle in Ihrer Länge so gestaffelt, dass die auftretenden Verschiebungen sowohl für die Bestandsbodenplatte des Kaufhofs, für die neue Bodenplatte als auch für die benachbarten baulichen Anlagen verträglich sind. Die Lage der Gründungspfähle kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

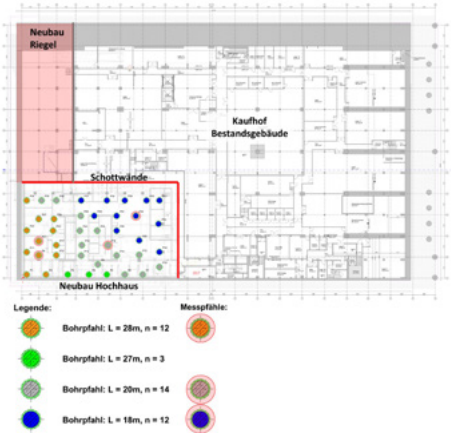

Abbildung 3-1: Lage und Länge der Gründungspfähle für den Hochhausbereich

Eine der Herausforderungen stellt die Herstellung der Großbohrpfähle durch die Bestandsbodenplatte gegen drückendes Grundwasser dar. Diesbezüglich wurden bereits früh in der Planungsphase Möglichkeiten mit allen Projektbeteiligten diskutiert. Zunächst wurde eine abschnittsweise, kraftschlüssige Verfüllung der Untergeschosse angedacht, auch eine Herstellung der Pfähle von einer abgesteiften Kellerdecke aus wurde in Betracht gezogen. Letztendlich werden nun die beiden Bestandskellerwände schräg auf die Bodenplatte abgesteift (Abbildung 3-2) und der Hochhausbereich mittels Schottwänden vom restlichen, im Betrieb befindlichen Warenhauses abgetrennt. Anschließend können alle Bestandsdecken /-wände abgebrochen und der Keller verfüllt und geflutet werden, um die Großbohrpfähle herzustellen. Im Vorfeld wird die Bestandsbodenplatte im Bereich der Großbohrpfähle teilweise aufgebrochen und Bewehrungsscans durchgeführt. Die Position der Pfähle wurde unter Berücksichtigung der Lage von Bestandswänden-/stützen und Versprüngen in der Bestandsbodenplatte für eine sichere Durchörterung der Bestandsbodenplatte in enger Abstimmung mit dem Tragwerksplaner gewählt (Abbildung 3-3). Nach Herstellung der Pfähle erfolgt die Installation eines Teildeckels und der Aushub des verfüllten Kellerkasten sowie die Herstellung der neuen Bodenplatte.

Alle Gründungspfähle werden als Energiepfähle ausgerüstet. Hierzu werden an den Bewehrungskörben PE-Leitungen mäanderförmig angebracht. Die horizontale Leitungsführung erfolgt zwischen der Bestands- und Neubaubodenplatte.

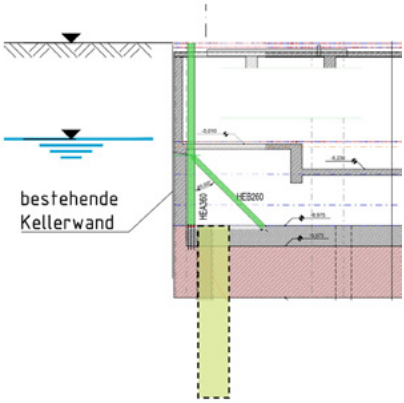

Abbildung 3-2: Vorabmaßnahmen – Sicherung Kelleraußenwände mittels Schrägsteifen

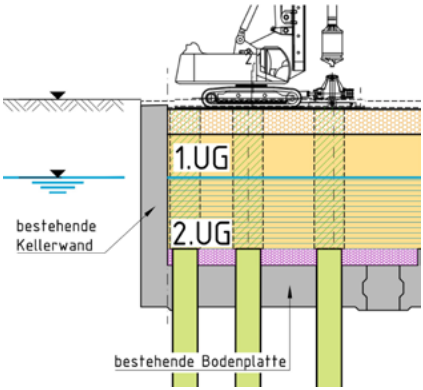

Abbildung 3-3: Herstellung Gründungspfähle auf verfülltem, geflutetem Kellerkasten

4 Rückrechnung Bestandshochhaus

Ergänzend zur detaillierten Auswertung der Erkenntnisse der Baugrunderkundung wurde zur Kalibrierung von numerischen Stoffparametern eine Rückrechnung des Lastsetzungsverhaltens (Böttcher 1970) eines 138 m hohen, flach gegründeten Bestandshochhauses vorgenommen. Das ehemalige Hotel Stadt Berlin, heute Park-Inn Hotel (Abbildung 4-1), liegt am nördlichen Ende des Alexanderplatzes in direkter Nachbarschaft zu Galeria bzw. zum Bauvorhaben MYND.

Abbildung 4-1: Park-Inn Hotel am Alexanderplatz

Abbildung 4-2 zeigt den gemessenen Zeit-Setzungsverlauf der Bodenplatte von 1968 bis 1970 des Park-Inn Hotels sowie die ursprüngliche, prognostizierte Setzungsbandbreite. Die gemessenen Setzungen in 1970 von maximal 5,6 cm (Böttcher, 1970) spiegeln nicht die Endsetzungen wider, da der Setzungsverlauf bzw. die Konsolidierung zum Zeitpunkt der letzten Messung noch nicht vollständig abgeschlossen war. Eine Extrapolation der Endsetzungen mit dem günstigsten Zeit-Setzungsverlauf der Prognose anhand der bis dato gemessenen Messwerte lässt einen Wert von ca. 6,5 cm abschätzen.

Die numerische Rückrechnung des Zeit-Setzungsverlaufs erfolgte u. a. auf Grundlage vorliegender Erkenntnisse zu Stoffparametern (Tabelle 4-1). Mit diesem Parametersatz kann die ursprüngliche Prognosebandbreite bzw. der obere Wert von 11 cm bestätigt werden (Abbildung 4-3).

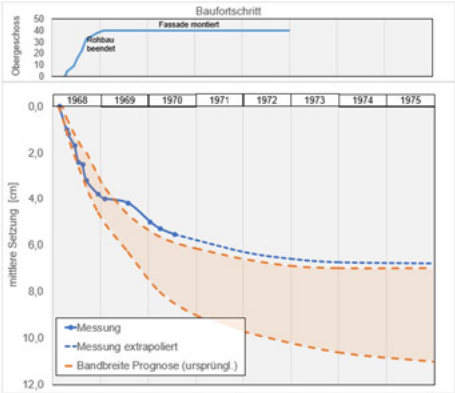

Abbildung 4-2: Zeit-Setzungsverlauf des Park-Inn Hotels (Böttcher 1970, bearbeitet)

Parameter		Sand md/d im Pfahlbereich	Sand md/d Pfahlfuß
Oedometersteifigkeit E_{oed}^{ref}	MPa	120	120
Deviatorische Steifigkeit E_{50}^{ref}	MPa	120	120
Wiederbelastungssteifigkeit E_{ur}^{ref}	MPa	300	300
Referenzspannung p_{ref}	kPa	100	100
Exponent m	–	0,5	0,5
Vorbelastung POP	kPa	0	500
Initialer Seitendruck K_0	–	0,6	0,8

Tabelle 4-1: Parameter HS-Modell für mitteldicht bis dicht gelagerte Sande (Mittag 2020).

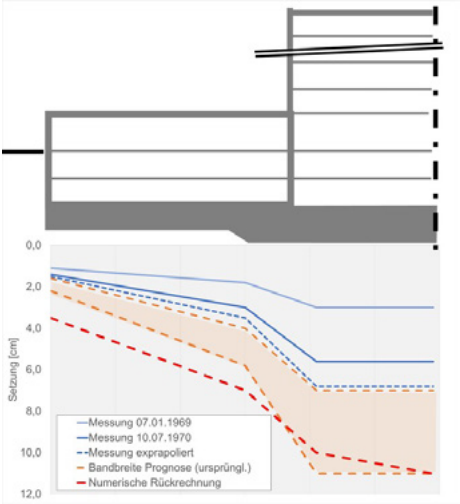

Abbildung 4-3: Setzungen im Querschnitt (Böttcher 1970, bearbeitet)

5 Numerische Berechnungen

5.1 Gründungssystem MYND

Die numerischen Berechnungen zum Gründungsdesign und zu den benachbarten baulichen Anlagen wurden mittels dreidimensionaler Finite-Elemente Berechnungen mit dem Programmsystem Plaxis® 3D durchgeführt. Die Bemessung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung erfolgt nach der einschlägigen KPP-Richtlinie (Hanisch 2001).

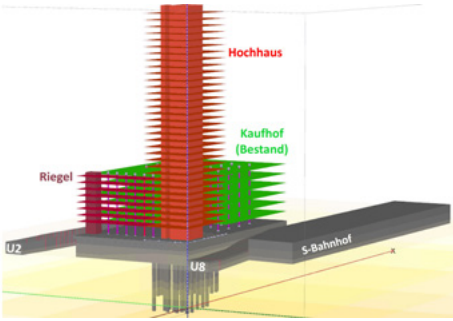

Abbildung 5-1: Numerisches Modell

Folgende Elemente wurden im numerischen Modell abgebildet:

- Außenwände und Schottwände mit Kontinuumselementen
- Bodenplatten und Decke mit Kontinuumselementen
- Gründungspfähle mit Kontinuumselementen
- Kopfbalken mit Kontinuumselementen
- Kernlasten mit Flächenlasten
- Stützenlasten mit Punktlasten

Bei der Abbildung der Gründungspfähle wurden aus Gründen einer rechentechnisch optimierten und weniger fehleranfälligen Netzdiskretisierung anstelle von runden Pfählen quadratische Ersatzpfähle aus Kontinuumselementen verwendet. Im direkten Bereich der Kontaktzone um die Gründungspfähle herum wurde eine feinere Netzdiskretisierung vorgenommen (Meißner 2022).

Die 3D-Berechnung bildet die folgenden Bau-/Berechnungsphasen ab. Die Reihenfolge der Bauphasen entspricht im Wesentlichen dem historischen und geplanten Bauablauf. Zur Bemessung der KPP wurden ausschließlich die Verschiebungen infolge der Neubaulasten unter Berücksichtigung der diesbezüglichen Differenzspannungen herangezogen. Weiterhin musste auch die Bestandsbodenplatte insbesondere im Übergang zum Warenhaus nachgewiesen werden. Hierzu wurde auch der historische Verschiebungsverlauf berücksichtigt.

Nr.	Phase	Beschreibung
0	Initialphase	Ermittlung Initialspannungen
1	Aushub Bestand	Baugrube Bestand
2	Bestand	Aktivierung Tunnel und Bestandsbauwerke
3	Rückbau	Anpassung Lasten im Bestandsbauwerk Kaufhof
4	Verfüllung UG	Aktivierung Verfüllung der Untergeschosse
5	Gründung	Aktivierung Gründungspfähle
6	Aushub Verfüllung	Deaktivierung Verfüllung Untergeschosse
7	Bodenplatte	Herstellung Bodenplatte Neubau
8.1	G+Q/3-A	100% ständige Lasten +33% veränderliche Lasten
8.2	G+Q-A	100% ständige Lasten +100% veränderliche Lasten
8.2A	G+Q	100% ständige Lasten +100% veränderliche Lasten ohne Auftrieb
8.3	2(G+Q)-A	200% ständige Lasten +200% veränderliche Lasten

Tabelle 5-1: Bauphasen Bauvorhaben MYND

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Setzungen für den Nachweis der äußeren Gebrauchstauglichkeit mit der setzungsrelevanten Lastkombination G+Q/3-A (Neubaulasten) dargestellt.

Lastkombination		setzungsrelevante Lastkombination G+Q/3-A	
Gebäudeteil	[-]	Hochhaus	Riegel
maximale Setzung	[cm]	–3,0	–2,5
minimale Setzung	[cm]	–2,0	–0,7
Verkantung	[-]	< 1/4.000	< 1/2.600
Winkelverdrehung	[-]	< 1/2.400	< 1/1.500

Tabelle 5-2: Berechnungsergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Setzungen infolge Neubaulasten im numerischen Modell für das Hochhausprojekt MYND am Alexanderplatz dargestellt.

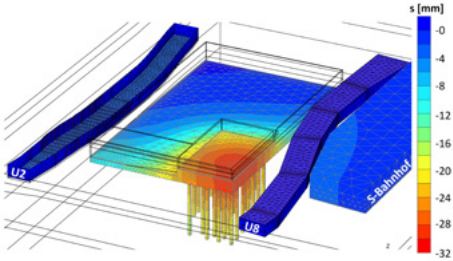

Abbildung 5-2: Setzungen im Gesamtmodell infolge Neubaulasten

Für die Bemessung der neuen Bodenplatte und der Gründungspfähle wurden die Ersatzsteifigkeiten in einem iterativen Prozess mit dem Tragwerksplaner für die relevanten Bauzustände abgestimmt.

Die Gründung wird u. a. mittels Messpfählen überwacht.

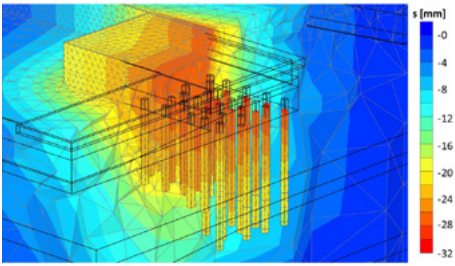

Abbildung 5-3: Setzungen im Bereich der Gründungspfähle infolge Neubaulasten

5.2 Benachbarte bauliche Anlagen

Im Bereich des Bauvorhabens MYND befinden sich die Tunnel der U-Bahnlinien U2 und U8 (Bousset 1935). Das im Jahr 1913 erstmalig und in den Jahren 1972/1973 teilweise neu errichtete Tunnelbauwerk der U-Bahnlinie U2 nähert sich im Nordosten bis auf ca. 2,0 m dem Bestand und dem Neubau. Im Rahmen einer Begehung konnte eine teilweise Fertigteilbauweise des viergleisigen, durch zwei Doppelstützenreihen gestützten Tunnels sowie die Verwendung einer festen Fahrbahn dokumentiert werden (Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5).

Abbildung 5-4: Neubaudecke im Tunnel der U-Bahnlinie U2

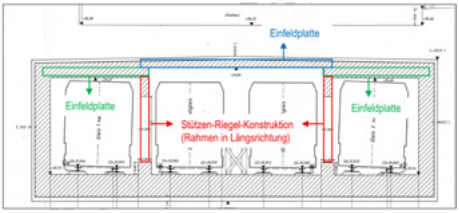

Abbildung 5-5: Tunnelquerschnitt U2 mit skizzierten Tragelementen

Der Tunnel U8 besteht aus mehreren, durch Blockfugen getrennte, monolithische Stahlbeton-Tunnelblöcken.

Aufgrund der unklaren Bauweise und des bautechnischen Zustandes der Tunnel wurde eine Grenzwertbetrachtung unter Variation der Tunnelsteifigkeiten durchgeführt. Eine Betrachtung bildet die Tunnel möglichst in deren Steifigkeit realitätsnah ab. Infolge des fehlenden Verbunds der Deckenfertigteile wurde die Decke des Tunnels U2 numerisch vereinfacht vernachlässigt.

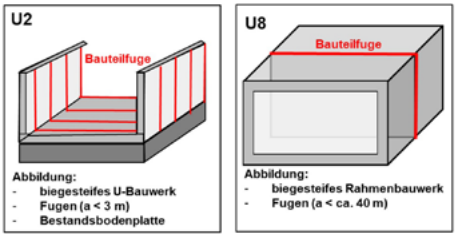

Abbildung 5-6: Steifes System der Tunnelbauwerke

Eine weitere Betrachtung beinhaltet eine weiche Darstellung der Tunnelbauwerke ohne deren Steifigkeit, indem diese ausschließlich durch den anstehenden Boden abgebildet werden (Abbildung 5-7).

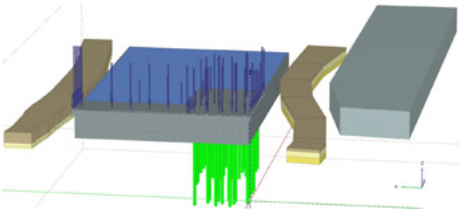

Abbildung 5 7: Numerisches Modell zur Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung – weiche Betrachtung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Phase 8.1: Neubaulasten für die weiche Betrachtung dargestellt (Abbildung 5-8).

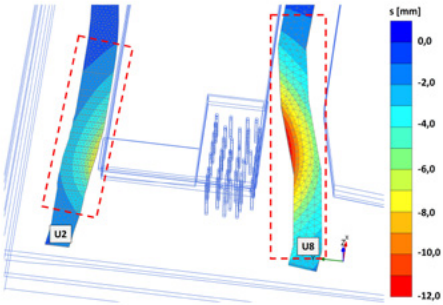

Abbildung 5-8: Verformungen der Tunnelbauwerke, Phase 8.1 infolge Neubaulasten

Zusätzlich zu den rechnerischen Verschiebungen können herstellungsbedingte Verschiebungen durch Bohrpfahlarbeiten (Schädlich 2021) und Bandbreiten infolge von Kennwertstreuungen und Modellunschärfen auftreten. Die herstellungsbedingten Verschiebungen wurden auf der dem Neubau zugewandten Seite des Tunnels der U-Bahnlinie U8 mit ≤ 2,0 mm abgeschätzt. Es ergeben sich die folgenden möglichen vertikalen Setzungen und Verkantungen der Tunnelbauwerke.

	Einheit	U2	U8
maximale Setzung	[mm]	≤ – 10,0	≤ – 16,0
Verkantung	[–]	< l/2.000	< l/1.500
Blockfugendifferenzverschibung	[mm]	–	≤ – 2,0

Tabelle 5-3: Mögliche vertikale Setzungen, Verkantungen

Die vorgenannten Werte sowie das Messkonzept wurden intensiv mit dem U-Bahnbetreiber (BVG) abgestimmt und auf deren Verträglichkeit untersucht. Das Messkonzept besteht aus geodätischen Messungen, Schlauchwaagen- und Erschütterungsmessungen. Aufbauend auf dem Messkonzept wurde gemäß BVG-Merkblatt ein Havariekonzept ausgearbeitet.

6 Abdichtungskonzept

Die alte Flachgründung bzw. der Bestandskellerkasten des Warenhauses besitzt eine mehrlagige, wasserdruckhaltende Schwarzdichtung nach TGL 3651 (TGL = Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen der DDR) unter der Stahlbetonsohle und an den Außenwänden. Der Neubaukeller des Hochhauses selbst wird durch eine Weiße Wanne realisiert. Durch die erforderliche Anordnung der Großbohrpfähle zur Setzungsreduzierung wird die alte Schwarzdichtung in der Durchdringung zerstört und verliert damit lokal ihre Dichtigkeit. Dadurch kann eine Hinterläufigkeit der Schwarzdichtung eintreten und es kann Grundwasser in die Untergeschosse des Kaufhauses gelangen. Da ein großer Teil des alten Untergeschosses für das Warenhaus erhalten bleibt und hochwertig genutzt wird, muss dies verhindert werden.

Es wurde hierzu zwei Alternativen planerisch untersucht. Zum einen sollte die alte Schwarzdichtung aufgenommen und eine neue Abdichtung an diese angeschlossen werden, um somit eine Abdichtung gemäß DIN 18533 normengerecht zu erhalten. Bei dem hohen Wasserdruck unter der bestehenden Sohle ist dabei jedoch das Freilegen der alten Abdichtung mit gewissen Risiken verbunden und auch sehr aufwendig, so dass sich der Bauherr in fachlicher Unterstützung von allen Planern als Alternative eine Abdichtung allein mittels einer Injektion entschieden hat.

Die vorgesehene Injektion soll dabei die Hinterläufigkeit der Schwarzdichtung verhindern und die bestehende Stahlbetonsohle soll im Sinne einer Weißen Wanne bereichsweise abdichten. Eine 100%ige Sicherheit gegen Hinterläufigkeit der Abdichtung und absoluter Undurchlässigkeit der alten Stahlbetonsohle kann damit trotz fachgerechter Planung und Ausführung der Injektion nicht zugesichert werden. Es werden deshalb zwei zusätzliche Sicherungsinjektionen im Bereich des Neubaus eingeplant, um die Gefahr von Undichtigkeiten auf ein Minimum reduzieren. Sollten nach diesen Sicherungsinjektionen immer noch Undichtigkeiten

auftreten, müssen weitere Injektionen im Bereich des Bestandsgebäudes erfolgen.

Für die geplante Abdichtung am Übergang der Weißen Wanne des Neubaus an die alte Schwarze Wanne des Bestandsgebäudes haben insitu Voruntersuchungen stattgefunden und es wurde bereits eine eine Probeinjektion ausgeführt. Hierbei wurde eine Senderbohrung rund um vier Empfängerbohrungen angeordnet. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei Injektion direkt in der Fuge zwischen Abdichtung und Bodenplatte eine Verpressung in einem ein Ausbreitungsradius bis ca. 1,0 m und gesichert mit 0,5 m erreicht werden kann. Im Zuge der Ausführungsplanung sind in weiteren Tests mit Empfängerbohrungen in unterschiedlichen Abständen die minimale und maximale Ausbreitung des Injektionsmaterials über der Schwarzdichtung zu bestimmen.

7 Zusammenfassung

Die geotechnische Planung eines derart komplexen Neubauvorhabens im Bestand bei laufendem Betrieb und sensiblen Nachbarbauwerken zeigt, dass neben den beschriebenen Grundlagen und Randbedingungen der Bemessung und Nachweisführung auch Herausforderungen bezüglich der Mess- und Beweissicherung sowie der Durchörterung der Bestandsbodenplatte sowie der Abdichtung bestehen.

Unter der Verwendung von numerischen Berechnungen konnten die Grundlagen und Prognosen geschaffen werden, die für die Durchführung des Bauvorhabens unerlässlich sind. Die numerischen Berechnungsergebnisse sind Planungs- und Diskussionsgrundlage im Abstimmungsprozess und führen zu konstruktiven Lösungen. Das Bauvorhaben MYND wird mit einem umfangreichen Mess-, Beweissicherungs- einschließlich Havarieprogramm begleitet.

Nur durch einen gemeinsamen Abstimmungsprozess unter der Mitwirkung aller an der Planung, Prüfung und Genehmigung beteiligter Dritter, kann eine größtmögliche Planungssicherheit geschaffen werden. Die Ausführung ist in diesem Kontext durch das zeitnahe Auswerten der geotechnischen Messdaten zu begleiten, die Annahmen der numerischen Berechnungen sind fortzuschreiben und eine umfassende Backanalysis sowohl im Hinblick auf den Nachweis einer ordnungsgemäßen Planung und Ausführung, der Transparenz für die Prüfinstanzen und betroffene Dritte als auch für zukünftige Neubauprojekte mit ähnlichen Randbedingungen durchzuführen.

Literaturverzeichnis

Bousset, J. (1935). *Die Berliner U-Bahn*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

Böttcher, W. (1970). *Baugrunduntersuchungen für das Hotel „Stadt Berlin" und den Fernseh- und UKW-Turm Berlin*. Schriftenreihe der Bauforschung, Reihe Ingenieur- und Tiefbau, Hochbelastete Gründungen

Hanisch, J., Katzenbach, R., König, G. (2001) Kombinierte Pfahl-Plattengründungen, Ernst & Sohn, Berlin

Meißner, S., Michael, J., Kies, M., Cronen, B. (2020). Bauvorhaben FOUR: *Deckelbauweise mit einer Kombinierten Schlitzwand-Pfahl-Plattengründung*. Geotechnik 43, Heft 3, S. 193-200. https://doi.org/10.1002/gete.202000022

Meißner, S., Michael, J., Kies, M. (2022). *Realisierung eines 84 m hohen Hochhauses auf einem S-Bahntunnel in Berlin Bauvorhaben*. Kolloquium Bauen in Boden und Fels Januar 2022, Heft 1, Seiten 369-374

Mittag, J., Richter, Th., Kirsch, F. (2021). *Hochhausgründungen in Berlin – Erfahrungen in eiszeitlich vorbelasteten Böden*. Bautechnik 98 (2021), Heft 9, S. 671–678

Mittag, J., Richter, Th., Schädlich, B., Hao, P. (2020). *Herausforderungen von Hochhausgründungen in Gebieten mit glazial geprägten Böden*. Geotechnik 43 (2020), Heft 4, S.289-297, https://doi.org/10.1002/gete.202000032

Quick, H., Meißner, S., Hippe, S. Fahlbusch, D., Jaeger, A. (2015). *Innerstädtischer Tunnelbau – Herausforderungen des Spezialtiefbaus am Beispiel der S-Bahnlinie S21 in Berlin*. Geotechnik 38, Heft 2. https://doi.org/10.1002/gete.201500004

Schädlich, B., Richter, Th., Borchert, K.-M. (2021). *Herstellbedingte Verformungen bei innerstädtischen Baugruben in Berlin*. 35. Christian Veder Kolloquium, 23. und 24. Juni 2021

Bahnprojekt Stuttgart-Ulm: Abfangung der Bruckwiesenwegbrücke für den Vortrieb der Tunnel nach Obertürkheim

M.Eng. André Reinhardt L.LM, DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH

Dr.-Ing. Martin Wittke, WBI GmbH

Prof. Dr.-Ing. Michael Blaschko, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG

Vier der Gründungspfähle der Bruckwiesenwegbrücke liegen innerhalb der Querschnitte der im Bau befindlichen Tunnel nach Obertürkheim des Projekts Stuttgart 21. Um einen bergmännischen Vortrieb zu ermöglichen, wurde die Brücke hier über Hilfspfähle und neue Kopfbalken abgefangen. Bei der Herstellung der Pfähle waren die begrenzten Platz- und Höhenverhältnisse zu berücksichtigen. Die 24 m tiefen Pfähle wurden bei einer lichten Arbeitshöhe zwischen Bohrebene und Unterkante Brücke von 7 bis 8 m hergestellt.

1 Einleitung

Die Vortriebe für die ca. 50 km Tunnel, die für das Bahnprojekt Stuttgart-Ulm im Stadtgebiet von Stuttgart gebaut werden, sind mittlerweile bis auf ca. 2 x 375 m abgeschlossen. Diese 2 x 375 m liegen im Bereich von Obertürkheim. Mit den Tunneln werden in diesem Abschnitt in einer komplexen Geologie und bei geringen Überdeckungen die DB Strecke Stuttgart – München (Hauptabfuhrstrecke (HAS) Stuttgart – Ulm), die S-Bahn der DB AG, die Bruckwiesenwegbrücke, die Hafenbahn und zahlreiche Versorgungsleitungen unterfahren. Im Beitrag wird Planung und Ausführung bei der Abfangung der Pfahlgründung der Bruckwiesenwegbrücke vorgestellt.

Die Bruckwiesenwegbrücke wird durch die Tunnel nach Obertürkheim unterfahren. Sie besitzen eine Länge von ca. 2 x 6,5 km und zweigen unter dem Kernerviertel vom Fildertunnel ab und verlaufen dann in Richtung Osten bis ins Neckartal (Abbildung 1-1). Unterhalb des westlichen Neckarufers teilen sich die Tunnelröhren in die Röhren nach Untertürkheim und Obertürkheim auf, so dass der Neckar mit insgesamt vier Röhren unterfahren wurde. Die Bruckwiesenwegbrücke wird bei ca. km 6,1 unterfahren (Abbildung 1-2).

Abbildung 1-1: Tunnel nach Obertürkheim und Lage der Bruckwiesenwegbrücke.

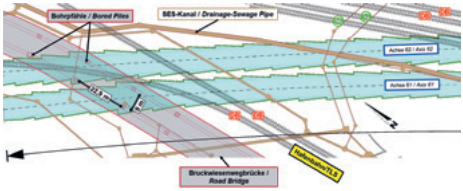

Abbildung 1-2 Unterfahrung Bruckwiesenwegbrücke, mit dem Vortrieb aus Obertürkheim

2 Baugrund und Grundwasserverhältnisse

Die Tunnel liegen in dem hier betrachteten Abschnitt überwiegend in den Schichten des ausgelaugten Gipskeupers (Abbildung 2-1). Im Anschluss an die Baugrube der offenen Bauweise stehen in der oberen Querschnittshälfte Neckarkies und Auffüllungen des Bahndamms bzw. Auelehme an. Der im Neckartal anhydritfreie unausgelaugte Gipskeuper liegt generell unterhalb der Tunnelsohle. Am nördlichen Ende des betrachteten Abschnitts schneidet die Tunnelsohle in den unausgelaugten Gipskeuper ein. Der Grundwasserspiegel liegt

in Höhe des Neckarspiegels im Neckarkies. Die Überdeckung der Tunnelröhre beträgt im Bereich der Bruckwiesenwegbrücke ca. 8 m.

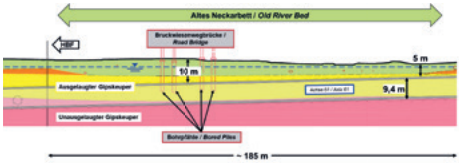

Abbildung 2-1: Geologisch/Geotechnischer Längsschnitt, Achse 61

3 Die Bruckwiesenwegbrücke in der Trasse des Tunnelvortriebs

Die in den 1980er Jahren gebaute Bruckwiesenwegbrücke ist eine Straßenbrücke der Landeshauptstadt Stuttgart. Die einzelnen Brückenpfeiler sind auf Großbohrpfählen gegründet, die ihre Lasten im ausgelaugten Gipskeuper abtragen (Abbildung 3-1 und 3-2). Nach den vorliegenden Bestandsunterlagen bzw. den statischen Berechnungen der Brücke ist die Brücke nur für sehr geringe Setzungen und Längsverschiebungen ausgelegt.

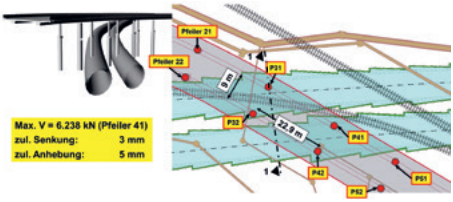

Abbildung 3-1: Bruckwiesenwegbrücke mit Gründungspfählen im Trassenverlauf.

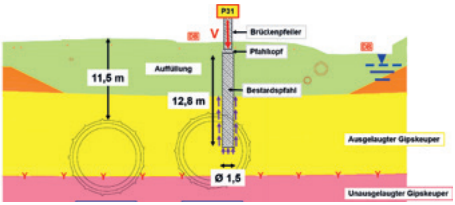

Abbildung 3-2: Pfahlgründung der Bruckwiesenwegbrücke im Schnitt 1-1 mit Lage der Tunnelröhren

Wie in Bild (Abbildung 3-1) zu erkennen, liegen 4 der Gründungspfähle innerhalb der Querschnitte der Tunnel nach Obertürkheim (Pfeiler P31, P32, P41 und P42). Diese Gründungspfähle der Brücke müssen für die Tunnelvortriebe abgefangen werden. An weiteren Pfählen, die sich im Nahbereich der Ausbruchsquerschnitte befinden, muss die Möglichkeit geschaffen werden, vortriebsbegleitende Senkungen am Brückenüberbau auszugleichen.

4 Abfangung der Bruckwiesenwegbrücke – Phase 1 Herstellung Hilfspfähle

Im Zuge der Planung wurden für die Abfangung mehrere Varianten untersucht. U.a. wurde eine Abfangung durch aus dem Tunnel heraus hergestellte DSV-Säulen eingehend betrachtet. Unter Berücksichtigung der Bauzeit, der Baukosten und der Risiken wurde schließlich entschieden, die Brückenpfeiler P31, P32, P41 und P42 jeweils über zwei seitlich angeordnete Hilfspfähle, die im unausgelaugten Gipskeuper unterhalb der Tunnelsohle abgesetzt werden (Pfahltiefen ca. 24 m), abzufangen (Abbildung 4-1 und 4-2).

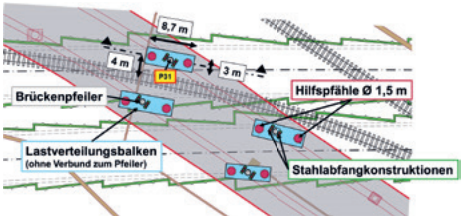

Abbildung 4-1: Anordnung Hilfspfähle und Lastverteilungsbalken, Draufsicht

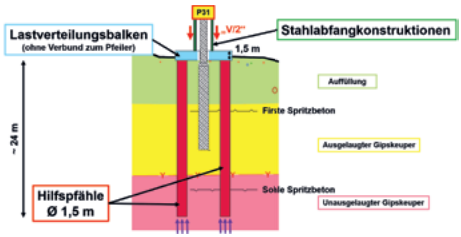

Abbildung 4-2: Abfangung über Hilfspfähle, Prinzip

Die Lage der Hilfspfähle und der zugehörigen Lastverteilungsbalken wurde unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse (TLS-Gleis, Lage im Tunnel und verfügbare Arbeitshöhe) festgelegt (Abbildung 4-1). Um die erforderliche Arbeitshöhe für die Herstellung der Hilfspfähle zu erreichen, wurden beidseits des TLS-Gleises Voraushübe getätigt. Das Gleis wurde dazu durch eine Spundwandkonstruk-

tion abgefangen (Abbildung 4-3, Abbildung 4-4).

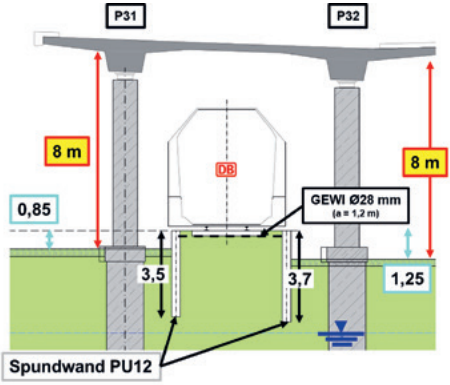

Abbildung 4-3: Verbau am TLS Gleis zur Herstellung der Arbeitsebene

Abbildung 4-4: Baugrube zur Gewährleistung der Arbeitsebene

Im Sinne der Risikovorsorge konnte die Brücke während der Herstellung der Hilfspfähle temporär auf Hilfsstützen gelagert werden, die auf den bestehenden Pfahlkopf abgestützt wurden (Abbildung 4-5). Zwischen den Hilfsstützen und dem Überbau waren Pressen mit einem Hubweg von 200 mm zum Ausgleich von etwaigen Senkungen angebracht.

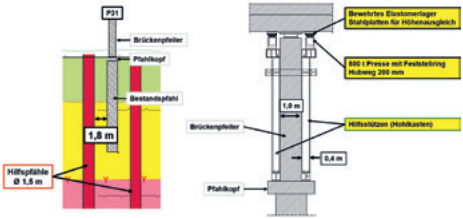

Abbildung 4-5: Hilfsstützen zur Herstellung der Hilfspfähle

Die Hilfspfähle von 1,5 m Durchmesser wurden mittels einer vorauslaufenden Verrohrung mit Rohrschüssen von 1 m und zusätzlicher hydraulischer Auflast abgeteuft. Bei dem verwendeten Seilbagger handelte es sich um eine Spezialanfertigung mit verkürztem Ausleger zur Einhaltung der Arbeitshöhe unter der Brücke. Als Werkzeuge wurden Meißel und Greifer eingesetzt, wobei mit den Meißelarbeiten bereits im ausgelaugten Gipskeuper begonnen werden musste. Der standfeste unausgelaugte Gipskeuper lag zunächst in mürber Form vor und wurde in einer Tiefe von ca. 21 m angetroffen.

Abbildung 4-6: Verrohrungsmaschine und Greifer

Abbildung 4-7: Meißel im Einsatz

Durch die Bohrpfahlherstellung in unmittelbarer Nähe der Bestandspfähle wurden keine Verschiebungen an der Brücke festgestellt. In Abhängigkeit der Tageszeit konnten lediglich temperaturabhängige Schwankungen beobachtet werden (Abbildung 4-8).

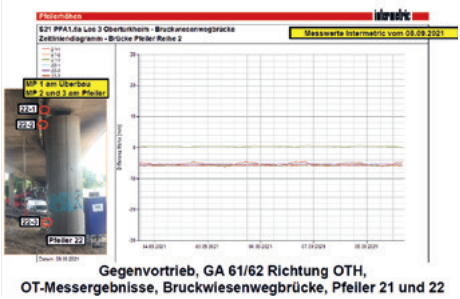

Abbildung 4-8: Verschiebungen an der Brücke während der Bohrpfahlherstellung 42-2, September 2021.

5 Abfangung der Bruckwiesenwegbrücke – Phase 2: Stahlbau und Pressenkonstruktion

Nach Fertigstellung der 1,5 m hohen Lastverteilungsbalken (Abbildung 5-1) wird die Brücke auf Stahlkonstruktionen umgelagert. Die Stahlkonstruktionen stehen auf den Lastverteilungsbalken und sind somit auf den Hilfspfählen aufgelagert. Die ursprünglichen Gründungspfähle sind dann lastfrei und können im Zuge des Vortriebs abgebrochen werden.

Abbildung 5-1: Bewehrung Ortbetonbalken 41

Neben diesen Stahlbau-Pressenkonstruktionen auf den Ortbetonbalken wurden auch die Pfeiler 11, 12, 21, 22, 51, 52, 61 und 62 mit Pressen auf Stahlstützen, die auf den Pfahlkopfbalken gelagert sind, ausgestattet (Abbildung 5-2, Abbildung 5-3). Weiterhin wurden auch am Widerlager Nord Pressen zum Setzungsausgleich installiert. Da für die Brücke kurzzeitig nur Verformungen von maximal 5 mm in Quer- und 8 mm in Längsrichtung erlaubt sind und der Bestandspfeiler 22 in unmittelbarer Nähe des Tunnelquerschnitts steht, kann die Brücke bei auftretenden vortriebsbegleitenden Setzungen mit den zusätzlichen Stützen stets in Soll-Lage gehoben werden.

Die Setzungen der Brücke werden konstant durch vollautomatisierte Tachymetermessungen an Pfeilern und Überbau überwacht. Die Messergebnisse werden in einem Onlineportal dargestellt (Abbildung 5-4). Bei Grenzwertüberschreitung erfolgt eine automatisierte Alarmierung. Nach Alarmprüfung werden Maßnahmen wie Brückenanhebung oder Sperrung der Brücke gemäß einem vordefinierten Melde- und Maßnahmenplan eingeleitet.

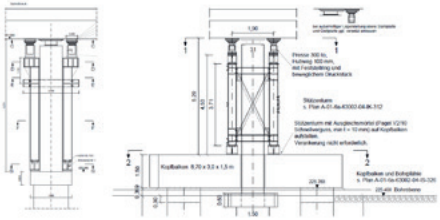

Abbildung 5-2: Beispiel für Hilfsstütze am Pfeiler 22 zum Ausgleich vortriebsbegleitender Senkungen und Stahlkonstruktion am Pfeiler 31, zur Lastumlagerung auf die Hilfspfähle.

Abbildung 5-3: installierte Stahlstützen und Pressen an Pfeilern 21, 22, Stahlkonstruktionen mit Pressen an Pfeilern 31 und 42

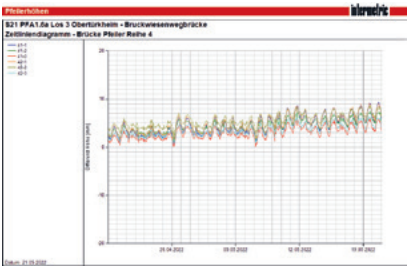

Abbildung 5-4: tageszeitliche Verschiebungen an der Brücke, Darstellung im Onlineportal.

6 Unterfahrung der Bruckwiesenwegbrücke

Beim Vortrieb unterhalb der Brücke werden die Hilfs- und Gründungspfähle im Tunnelquerschnitt freigelegt (Abbildung 6-1 und 6-2), der Bestandspfahl verbleibt dabei vorerst auf einem mit Spritzbeton gesicherten Podest stehen und wird in die Außenschale eingefasst. Nach ausreichender Erhärtung der Spritzbetonaußenschale, kann der Bestandspfahl im Tunnelquerschnitt abgebrochen werden.

Nach Abschluss der Vortriebsarbeiten werden die Bestandspfähle in einen außerhalb der Innenschale liegenden Ortbetontragring eingebunden (Abbildung 6-3), über den die Brückenlasten nach Abbruch der Hilfspfähle abgetragen werden sollen. Im Anschluss

wird die Ortbetoninnenschale in den Tunnelröhren hergestellt. Durch die dargestellte Lösung wird eine direkte Lasteintragung aus der Brücke in die Innenschale des Tunnels vermieden, so dass auch eine rechtliche Abgrenzung der Bauwerke und damit auch zwischen den jeweiligen Vorhabensträgern möglich wird.

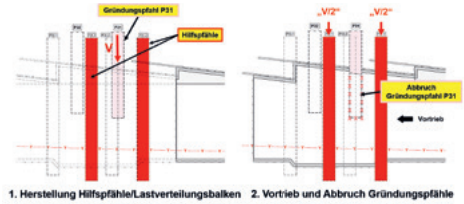

Abbildung 6-1: Bruckwiesenwegbrücke – Vortrieb Untertage

Abbildung 6-2: Unterfahrung Pfeiler 31, Foto

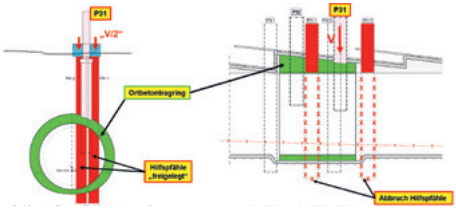

Abbildung 6-3: Bruckwiesenwegbrücke – Vortrieb Untertage, Ortbetontragring

Für die unmittelbar neben den Tunnelröhren liegenden Gründungspfähle P22 und P51 der Brücke sind lediglich Hilfsstützen und Pressen zum Ausgleich etwaiger Senkungen vorgesehen. Zusätzlich werden hier Verstärkungsmaßnahmen, u.a. Begrenzung der Abschlagslänge und der Vortriebsgeschwindigkeit, zur Begrenzung der Senkungen geplant.

Literaturverzeichnis

1- André Reinhardt, Martin Wittke: Bahnprojekt Stuttgart-Ulm, Unterfahrung der Bruckwiesen- wegbrücke und der DB-Strecke nach Ulm mit den Tunneln nach Obertürkheim. Vorträge anlässlich des Felsmechanik- und Tunnelbautages 2021, WBI-Print 23.

Hochhausgründung neben sensitiven Infrastrukturbauwerken

Dipl.-Ing. Matthias Seip, Mohamed Hassan M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Frankfurt am Main
Prof. Dr.-Ing. Steffen Leppla, Frankfurt University of Applied Sciences

Im Osten von Frankfurt am Main ist auf der sogenannten Molenspitze ein neues Hotelhoch-haus geplant, das direkt zwischen dem Main und dem Becken des Osthafens errichtet werden soll. Das Hotelhochhaus soll eine Höhe von 75 m haben und auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) gegründet werden.

Das Hochhaus soll direkt neben sensitiven Infrastrukturbauwerken entstehen. Hierzu gehören das flach gegründete südliche Widerlager der Honsellbrücke, das auf Pfählen gegründete nördliche Widerlager der Osthafenbrücke, ein dazwischen liegendes, auf Pfählen gegründetes Kreiselbauwerk sowie die über 100 Jahre alten Kaimauern. Unter dem Kreiselbauwerk wer-den zwei neue Geschosse entstehen, über die die verkehrliche Erschließung des Hotels stattfinden soll. Für alle bestehenden Bauwerke gilt, dass die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit durch den Neubau nicht beeinträchtigt werden dürfen. Für die Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der stark exzentrisch belasteten KPP des Hotelhochhauses sowie der bestehenden Infrastrukturbauwerke und die resultierende, hochkomplexe Baugrund-Tragwerk-Interaktion wurden umfangreiche, 3-dimensionale, nicht-lineare numerische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ausgeführt. In diesen Berechnungen wurde auch die bauliche Entwicklung des gesamten Projektareals nachvollzogen.

Der Beitrag beschreibt das hochkomplexe Bauprojekt sowie die umfangreichen numerischen Berechnungen und deren Ergebnisse für das Hotelhochhaus und die Auswirkungen auf die bestehenden, sensitiven Infrastrukturbauwerke.

1 Projektübersicht

1.1 Hotelhochhaus

Im Osten von Frankfurt am Main ist ein neues Hotelhochhaus geplant. Das neue, als Hotel geplante Gebäude befindet sich direkt zwischen dem Main und dem Osthafen. Derzeit ist das Projektareal mit einer Aufschüttung bedeckt (Abb. 1). Das 75 m hohe Hotel mit 22 Stockwerken (Abb. 2) soll direkt am Kreiselbauwerk errichtet und an dieses höhengleich angeschlossen werden. Unter dem Kreiselbauwerk werden für die Gästezufahrt und die Ent- und Versorgung des Hotels zwei Ebenen für die Haustechnik, für den Eingang und für Parkplätze errichtet. Die Zufahrt für Fahrzeuge erfolgt über eine Rampe unter der südlichen Brücke entlang des Mains. Das Hochhaus wird auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) gegründet.

Die 2 m dicke Fundamentplatte besitzt eine annähernd dreieckige Form und eine Fläche von 815 m2. Die Last der aufgehenden Bebauung wird über Wände und Stützen sowie über eine große Einzelstütze an der Spitze der dreieckigen Fundamentplatte der KPP (Abb. 3) abgetragen.

Abbildung 1: Projektareal (Google Earth)

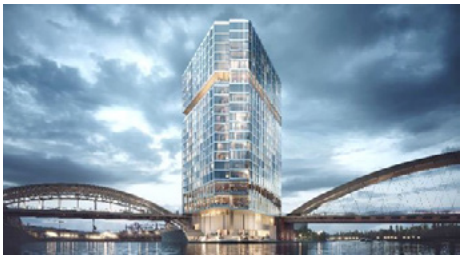

Abbildung 2: Visualisierung des geplanten Hochhauses (B&L Group, Hamburg)

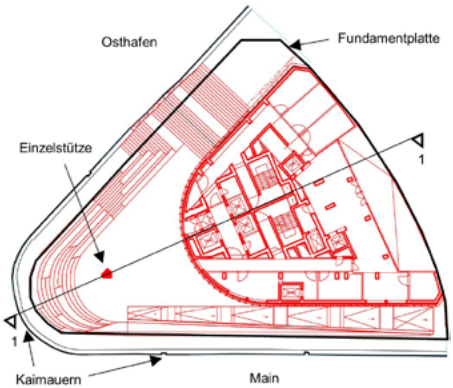

Abbildung 3: Grundriss 2. Untergeschoss mit Schnittführung

Die Fundamentlasten sind in Abbildung 4 angegeben. Die Gesamtlast des Hochhauses einschließlich der Fundamentplatte ($G_{k,Pl}$ = 41 MN) beträgt etwa 507 MN. Die Last ist nicht gleichmäßig über den Grundriss verteilt, woraus sich eine stark exzentrische Belastung für die Gründung ergibt. Die Gründung der beiden Ebenen unter dem Kreiselbauwerk erfolgt auf den bereits existierenden Pfählen und einer Bodenplatte. Zusätzlich werden Mikropfähle unter dem Kreiselbauwerk hergestellt. Die Mikropfähle werden zur Sicherung gegen Auftrieb bei Hochwasserständen des Mains erforderlich. Gemäß der DIN EN 1997-1 ist das Projekt in die geotechnische Kategorie GK 3 einzustufen, die Kategorie für die komplexesten Bauprojekte.

	Eigengewicht G_k	Verkehrslast Q_k
Wände und Säulen	325 MN	61 MN
Hochbelastete Einzelstütze	65 MN	15 MN
Fundamentplatte	41 MN	–
Summe Σ $G_k + Q_k$	507 MN	

Abbildung 4: Fundamentlasten

1.2 Bestehende Strukturen

Auf der Baustelle und in der unmittelbaren Umgebung befinden sich folgende Bauwerke (Abb. 1):

- Kreiselbauwerk
- historische Kaimauern
- südliches Widerlager der nördlichen Brücke
- nördliches Widerlager der südlichen Brücke

Das Kreiselbauwerk ist auf einer klassischen Pfahlgründung errichtet. Der Bereich unter der Verkehrsebene ist teilweise aufgefüllt. Diese Auffüllung muss für den Bau der beiden Ebenen, die für das Hochhaus genutzt werden, entfernt werden. Das Kreiselbauwerk umfasst das südliche Widerlager der nördlich gelegenen Honsellbrücke und das nördliche Widerlager der südlich gelegenen Osthafenbrücke.
Das Projektareal ist von Uferbefestigungen umgeben. Diese bestehen aus Kaimauern, i.e. nicht bewehrten Betonwänden, und aus Spundwänden. Die Betonmauern sind zum Teil mehr als 100 Jahre alt.

Das südliche Widerlager der Honsellbrücke ist ein großer, flach gegründeter Betonblock. Das nördliche Widerlager der Osthafenbrücke leitet die Lasten über eine klassische Pfahlgründung in den Baugrund ein. Beide Widerlager sind in das Kreiselbauwerk integriert.

2 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Basierend auf zwei rd. 90 m tiefen Kernbohrungen kann der Baugrund wie folgt beschrieben werden:

- künstliche Auffüllung (0,7 m bis 16 m dick)
- quartärer Schwemmlehm } 0,6 m bis
- quartäre Sande und Kiese } 3,1 m dick
- tertiärer Mergel (mindestens 80 m dick)

Die Baugrundschichtung sowie die Grundwasserstände bzw. die Mainpegel sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Grundwasserspiegel entspricht dem Wasserstand des Mains. Bei Hochwasserereignissen steht das Baufeld größtenteils unter Wasser.

Zusätzlich zu den Kernbohrungen wurden umfangreiche in-situ-Tests und Laboruntersuchungen durchgeführt, um die bodenmechanischen Parameter zu bestimmen. Im Hinblick auf die künstliche Auffüllung wurden mehrere umwelttechnische Laboruntersuchungen an Bodenproben durchgeführt, um den Aufwand für die Entsorgung des Aushubmaterials zu ermitteln.

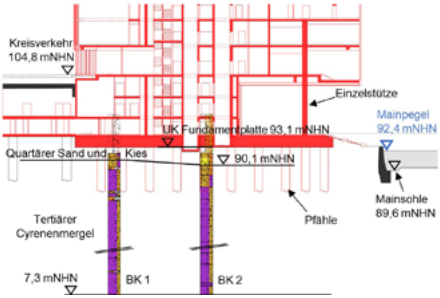

Abbildung 5: Baugrund, Schnitt 1-1

3 Gründung des Hochhauses

Die Gründung des Hochhauses ist als KPP konzipiert. Eine KPP ist ein hybrides, technisch und wirtschaftlich optimiertes Tiefgründungssystem, das die Tragfähigkeit der Fundamentplatte mit der Tragfähigkeit von Pfählen oder Barretten kombiniert. Die KPP kann sowohl für die Gründung von klassischen Hochhäusern als auch für Ingenieurbauwerke wie Brücken und Türme eingesetzt werden. Für die KPP können die gleichen technischen Vorschriften wie für klassische Tiefgründungen angewendet werden.

Zur Vervollständigung des Bemessungs- und Sicherheitskonzepts ist die KPP-Richtlinie entwickelt worden (Hanisch et al. 2002), die inzwischen auch international Anwendung findet (ISSMGE 2013). Aufgrund der Interaktion zwischen den Gründungselementen und dem Baugrund haben KPPs ein sehr komplexes Trag- und Verformungsverhalten. Daher werden KPPs gemäß DIN EN 1997-1 in die geotechnische Kategorie GK3 eingestuft. Die Vorteile einer KPP im Vergleich zu einer konventionellen Plattengründung und zu einer klassischen Pfahlgründung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verringerung von Setzungen und Setzungsdifferenzen
- Erhöhung der Tragfähigkeit von Plattenfundamenten
- Verringerung des Biegemoments der Gründungsplatte
- Reduzierung der Pfahlmassen (30 % bis 50 %)

Weitere Erläuterungen zur KPP und einige Beispiele aus der Ingenieurpraxis finden sich in Katzenbach et al. (2016) und Katzenbach & Leppla (2018).

4 Numerisches Modell

4.1 FE-Modell

Das komplette Modell besteht aus ca. 772.000 tetraedrischen, 10-knotigen Elementen mit insgesamt ca. 1.170.000 Knoten. Der modellierte Baugrund hat eine Grundfläche von 200 m x 200 m und

eine Höhe von 89,6 m. Für die numerische Analyse wurde die FE-Software PLAXIS 3D verwendet (Abb. 6).

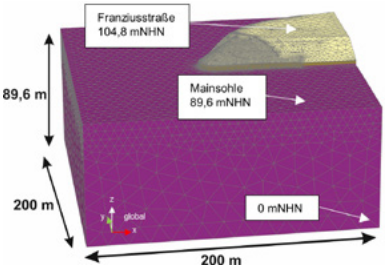

Abbildung 6: FE-Gesamtmodell

Ein Ausschnitt des gesamten 3-dimensionalen FE-Modells ist in Abbildung 7 dargestellt.

Alle wesentlichen Bauphasen, die in der Vergangenheit im Bereich des Projektgeländes stattgefunden haben, werden in der FE-Simulation in jeweils eigenen Berechnungsphasen simuliert. Die einzelnen Phasen ergeben sich wie folgt:

- Ausgangssituation (Initialspannungszustand)
- Errichtung der Kaimauern/Uferbefestigungen
- Errichtung des Widerlagers der nördlichen Brücke
- Herstellung der Pfähle des Kreiselbauwerks
- Errichtung des Überbaus des Kreiselbauwerks
- Errichtung des Widerlagers der südlichen Brücke
- Entfernung der Aufschüttung auf der Hochhausfläche und unter dem Kreiselbauwerk
- Herstellung der Bohrpfähle der KPP und der Mikropfähle unter dem Kreiselbauwerk
- Herstellung der Fundamentplatte der KPP
- Aushärtung der Fundamentplatte
- Aktivierung der Eigen- und Verkehrslasten der aufgehenden Konstruktion

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die einzelnen im FE-Modell berücksichtigten Bauwerke.

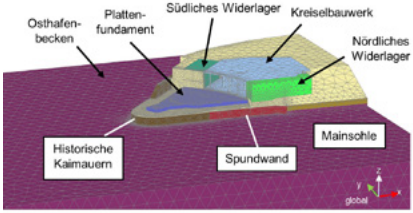

Abbildung 7: Ausschnitt Gesamtmodell mit Bauwerken

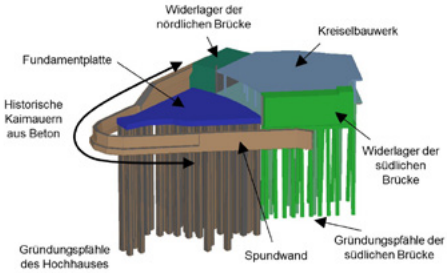

Abbildung 8: Bauwerke im FE-Modell

Die Vorentwurfsberechnung der KPP ergibt eine 2 m dicke Platte mit 34 Pfählen. Die Geometrie der KPP ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Pfähle haben einen Durchmesser von 1,5 m. Die Pfahllängen betragen 40 m bzw. 45 m, je nach Lage und Belastung durch die aufgehende Konstruktion.

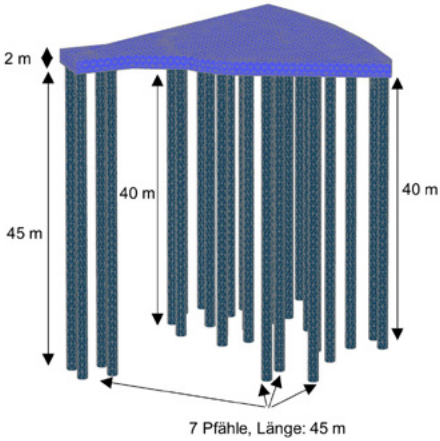

Abbildung 9: FE-Modell der KPP

4.2 Materialeigenschaften

Für das unterschiedliche Materialverhalten des Bodens und der Bauwerke wurden verschiedene Stoffmodelle eingesetzt. Für das Materialverhalten der künstlichen Auffüllungen wurde ein linear elastisch-idealplastisches Stoffmodell mit dem Versagenskriterium von Mohr-Coulomb (MC) verwendet. Der Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul E und der Steifigkeit E_s ist durch die Poissonzahl v definiert. In PLAXIS wird der Steifemodul E_s als E_{oed} bezeichnet, entsprechend den Ödometerversuchen.

Für das Materialverhalten der gewachsenen Bodenschichten wurde das elasto-plastische Stoffmodell "Hardening-Soil" (HS) verwendet. Mit diesem Stoffmodell wird das Verformungsverhalten durch eine nichtlineare, hyperbolische, spannungsabhängige Funktion beschrieben. Für die Steifigkeit können verschiedene Werte angegeben werden. Weiterhin können Verfestigungseffekte nach Scherdehnung definiert werden. Die Materialparameter aller Bodenschichten sind auszugsweise in den Abbildungen 10 und 11 aufgeführt.

Parameter	Symbol	Einheit
Wichte gesättigter Boden	γ_{ges}	kN/m³
Wichte unter Auftrieb	γ'	kN/m³
Reibungswinkel	φ'	°
Kohäsion	c'	kN/m²
Dilatanzwinkel	Ψ	°
Steifeexponent	m	-
Elastizitätsmodul / Sekantensteifigkeit aus Triaxialversuch	E / $E_{50,ref}$	MN/m²
Steifemodul / Tangentensteifigkeit der ersten Belastung aus dem Ödometerversuch	$E_{oed,ref}$	MN/m²
Poissonzahl / Poissonzahl für Entlastung und Belastung	υ / υ_{ur}	-
Ruhedruckbeiwert	K_0	-
Verhältnis der Bruchspannung	R_f	-

Abbildung 10: Bodenmechanische Parameter

Für das Materialverhalten der aus Beton bzw. Stahlbeton bestehenden Bauelemente (Pfähle, Platte, Wände etc.) und der aus Stahl bestehenden Spundwand wurde ein linear elastisches Stoffgesetz verwendet. Hierin wurde für den Beton bzw. Stahlbeton der Elastizitätsmodul E = 30.000 MN/m² und die Poissonzahl ν = 0,2 angesetzt. Für den Stahl beträgt der Elastizitätsmodul E = 210.000 MN/m² und die Poissonzahl wurde mit ν = 0,3 angesetzt.

	MC	HS		
	Auffüllung	Quartärer Auelehm	Quartärer Sand und Kies	Tertiärer Mergel
γ_{ges}	19	19	19,5	19
γ'	9	9	9,5	9
φ'	20	25	35	22,5
c'	5	5	0	20
Ψ	0	0	5,0	0
m	-	0,5	0,5	0,8
E / $E_{50,ref}$	3	4	70	60
$E_{oed,ref}$	4	4	70	60
υ / υ_{ur}	0,3	0,3	0,3	0,25
K_0	0,5	0,5774	0,4264	0,6173
R_f		0,9	0,9	0,9

Abbildung 11: Werte der bodenmechanischen Parameter

5 Untersuchungen zur Baugrund-Tragwerk-Interaktion

5.1 Federsteifigkeiten und Bettungsmoduli der KPP

Für die statische Berechnung des Hochhauses ist die Kenntnis der Federsteifigkeiten der Pfähle und die Verteilung des Bettungsmoduli unter der Fundamentplatte erforderlich. Zur Ermittlung der Federsteifigkeiten und der Bettungsmoduli wurde eine FE-Berechnung mit der Summe der vollen charakteristischen Eigenlast Gk und der vollen charakteristischen Verkehrslast Qk durchgeführt. Die Federsteifigkeit der Pfähle ist durch das Verhältnis der Pfahllast zu den Setzungen des Pfahlkopfes definiert:

$$c_{Pf,i} = \frac{N_{Pf,i}}{s_{Pf,i}} \text{ [MN/m]} \qquad [1]$$

Der Bettungsmodul ks ergibt sich aus dem Verhältnis der Spannungen unter der Fundamentplatte zu den Setzungen der Platte:

$$k_{s,i} = \frac{\sigma_{Pl,i}}{s_{Pl,i}} \text{ [MN/m}^3\text{]} \qquad [2]$$

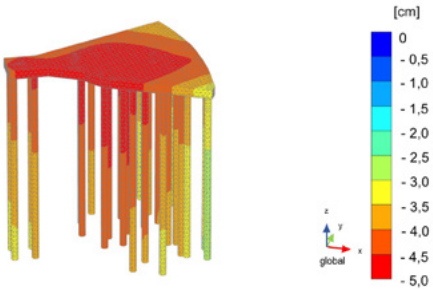

Abbildung 12: Setzungsberechnung der KPP für (G_k + Q_k)

Die für den Lastfall $P_k = G_k + Q_k$ berechneten Setzungen des Fundaments sind in Abbildung 12 dargestellt. Die sich daraus ergebenden Federsteifigkeiten und die Verteilung der Bettungsmoduli sind in Abbildung 13 dargestellt.

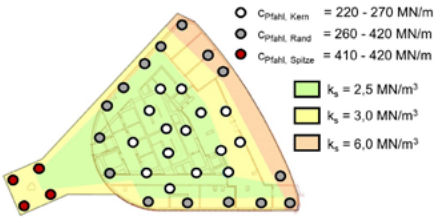

Abbildung 13: Federsteifigkeiten und Verteilung der Bettungsmoduli

5.2 Tragverhalten der KPP

Das Tragverhalten der KPP kann durch den Pfahl-Platten-Koeffizienten α_{KPP} beschrieben werden. Gemäß Gleichung [3] ist dieser Koeffizient das Verhältnis zwischen dem Widerstand der Pfähle (450 MN) und dem Gesamtwiderstand der KPP (507 MN). Ein KPP-Koeffizient von α_{KPP} = 0 bedeutet, dass die gesamte Last F_k von der Fundamentplatte getragen wird. Ein KPP-Koeffizient von α_{KPP} = 1,0 bedeutet, dass die gesamte Last F_k von der Pfahlgründung getragen wird.

$$\alpha_{KPP} = \frac{\sum R_{Pfahl,k,i}(s)}{R_k(s)} = \frac{450\ \text{MN}}{507\ \text{MN}} = 0{,}89 \qquad [3]$$

5.3 Auswirkungen auf die bestehenden Infrastrukturbauwerke

Für die Analyse der Verschiebungen der bestehenden Infrastrukturbauwerke infolge der Errichtung des neuen Hochhauses wurden zusätzliche FE-Simulationen durchgeführt. Zur Abschätzung realistischer Verschiebungen wurden in den Simulationen das volle charakteristische Eigengewicht G_k und 33 % der charakteristischen Verkehrslast Q_k berücksichtigt, die so genannte setzungserzeugende Last $P_{Setz} = G_k + 1/3\ Q_k$. Die berechneten wahrscheinlichen Setzungen für das gesamte Projektgebiet sind in Abbildung 14 dargestellt.

Die prognostizierten Setzungen des Hochhauses liegen zwischen 2,5 cm und 4,5 cm. Die prognostizierten Setzungen der bestehenden Brückenwiderlager und das Kreiselbauwerk liegen zwischen 0 cm und 2,5 cm. Am Übergang (Passage) zwischen dem Hochhaus und den Untergeschossen im Kreiselbauwerk (siehe Abb. 14) ergeben sich rechnerisch Setzungsunterschiede zwischen 0,5 cm und 1,5 cm.

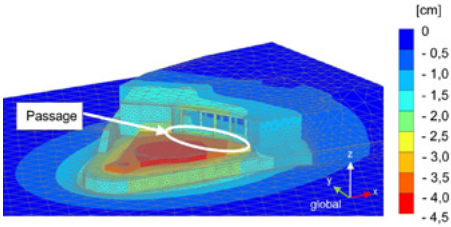

Abbildung 14: Berechnete wahrscheinliche Setzungen für das Hochhaus und die bestehende Bebauung für $P_{Setz} = G_k + (1/3 \cdot Q_k)$

Für diese Setzungsunterschiede muss die Übergangskonstruktion zwischen Hochhaus und Kreiselbauwerk ausgelegt werden. Die bestehenden historischen Kaimauern sind sehr empfindliche Bauwerke. Die Berechnung der gesamten horizontalen Verschiebung an einem Schnittpunkt ergibt sich aus der Kombination der Verschiebungen in x- und y-Richtungen [4].

$$u_i = \sqrt{|u_{x,i}^2| + |u_{y,i}^2|} \qquad [4]$$

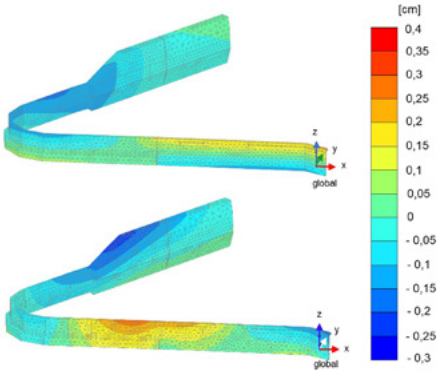

Abbildung 15: Berechnete Horizontalverschiebungen der Kaimauern (oben: x-Richtung; unten: y-Richtung)

Die FE-Simulationen ergeben rechnerische Horizontalverschiebungen in x-Richtung (Abb. 15 oben) und in y-Richtung (Abb. 15 unten) zwischen –0,3 cm und +0,4 cm.

Für die Setzungen der historischen Kaimauern liegt die Prognose zwischen 1 cm und 3 cm, wie in Abbildung 16 zu erkennen ist. Für die Bewertung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit wird das Kriterium der maximalen Verkantung ψ verwendet. Für die Vermeidung von Rissen in einem Bauwerk gilt das Kriterium $\psi \leq 1/500$ (EVB 1993). Die prognostizierte maximale Verkantung der historischen Kaimauern bzw. Uferbefestigungen beträgt $\psi = 1/1.000$.

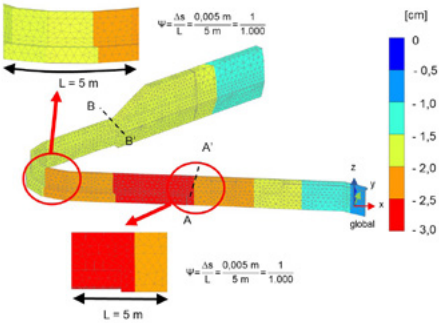

Abbildung 16: Setzungen der Kaimauern

Die Spannungen hinter den Kaianlagen vor (schwarz) und nach (rot) der Aufbringung der Gesamtlast P_k sind in den Abbildungen 17 und 18 dargestellt. Die Spannungszunahme im Schnitt A-A' beträgt 10-20 % und beginnt in einer Tiefe von 3,0 m unter GOF. Im Bereich des nördlicheren Schnitts B-B' beträgt die Spannungszunahme rd. 15 % und beginnt in 3,20 m unter GOF.

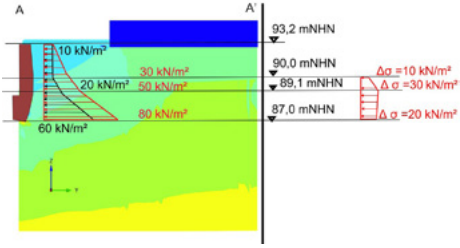

Abbildung 17: Horizontale Spannungen Schnitt A-A'

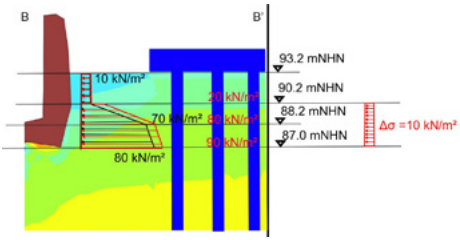

Abbildung 18: Horizontale Spannungen Schnitt B-B'

6 Schlussfolgerung

Für die Untersuchung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit der stark exzentrisch belasteten Gründung des neuen Hochhauses und der bestehenden Bauwerke sowie für die Untersuchung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion sind komplexe dreidimensionale, nichtlineare numerische Simulationen erforderlich. Diese numerischen Simulationen berücksichtigen alle geometrischen und materialspezifischen Randbedingungen, einschließlich der Historie der Bebauung des gesamten Areals.

Durch die numerische Simulation konnte gezeigt werden, dass die Gründung auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung eine standsichere und gebrauchstaugliche Gründung des Hochhauses sowie die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit der direkt angrenzenden Bestandsgebäude sicherstellt. Sämtliche rechnerisch ermittelten Verschiebungen, Verkantungen und Zusatzbeanspruchungen

liegen innerhalb der zulässigen Grenzen bzw. sind als verträglich zu bewerten.

Literaturverzeichnis

DIN Deutsches Institut für Normung (2014). EN 1997-1:2004 – *Handbuch Eurocode 7: Geotechnische Bemessung – Band 1: Allgemeine Regeln.*

DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.) (1993). *Empfehlungen "Verformungen des Baugrunds bei baulichen Anlagen": EVB.* Berlin: Ernst & Sohn.

Hanisch, J., Katzenbach, R., König, G. (2002). *Kombinierte Pfahl-Plattengründungen.* Berlin, Ernst & Sohn.

ISSMGE International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2013). *ISSMGE Combined Pile-Raft Foundation Guideline.*

Katzenbach, R., Leppla, S., Choudhury, D. (2016). *Foundation systems for high-rise structures.* New-York, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.

Katzenbach, R., Leppla, S. (2018). *Kombinierte Pfahl-Plattengründungen und Sondergründungen im Hoch- und Ingenieurbau.* Beton-Kalender 2019, Band 1, 231 293. Berlin: Ernst & Sohn.