

Geotechnische Prüfung der Baugruben und der Gründungen des neuen Hauptbahnhofes Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Kurt-Michael Borchert

Dr.-Ing. habil. Sascha Henke

Dipl.-Ing. Asja Kühn

Dipl.-Ing. Matthias Römer

Dr.-Ing. Bert Schädlich

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrages wird am Beispiel des Projektes Hauptbahnhof für „Stuttgart 21“ der Umfang einer Geotechnische Prüfung und die Zusammenarbeit mit dem Prüfer für Standsicherheit vorgestellt. Hierbei wird insbesondere ein Fokus auf die Besonderheiten und die speziellen Anforderungen einer geotechnischen Prüfung gegenüber einer klassischen Prüfung der Standsicherheitsnachweise eingegangen. Es wird Umfang und Inhalt von z. B. der Prüfungen der Geotechnischen Berichte (Baugrundgutachten), der Baugrubenkonstruktionen, der Gründungen, der Sicherung von Nachbargebäuden, der Interaktion Bauwerk-Gründung-Baugrund und der Erbebenbelastung betrachtet.

Im Detail werden aus dem Blickwinkel des geotechnischen Prüflingenieurs exemplarisch die FEM-Berechnungen zu den Gründungen, zu Gebrauchstauglichkeitsnachweisen und zu Erdbebenbelastungen behandelt, sowie besondere geotechnische Detailfragestellungen, die sich im Zuge der Prüfung der Baugruben und der Gründungen des neuen Hauptbahnhofes Stuttgart ergeben haben.

1 Sinn und Umfang einer geotechnischen Prüfung

In vielen Bauordnungen gibt es den Prüfsachverständigen für Geotechnik der vom Prüflingenieur für Standsicherheit mit eingeschaltet werden kann bzw. sollte, wenn er der Meinung ist, dass er für die Prüfung geotechnischer Probleme keine ausreichende Sachkenntnis besitzt. Dagegen hat das Eisenbahnbundesamt einen Prüfer für Geotechnik eingeführt und beruft diesen auch. Das Eisenbahnbundesamt hat insbesondere für Strecken und Bauwerke der Eisenbahn erkannt, dass bei derartigen Bauwerken die

geotechnischen Probleme von besonderer Bedeutung sind und von einem Sachverständigen für Geotechnik mit besonderen Kenntnissen geprüft werden müssen.

Nach EC 7 und der DIN 1054 bzw. DIN 4020 (siehe Abbildung 1) ist vom Planverfasser ein Geotechnischer Bericht, der den Geotechnischen Untersuchungsbericht beinhaltet, zu erstellen.

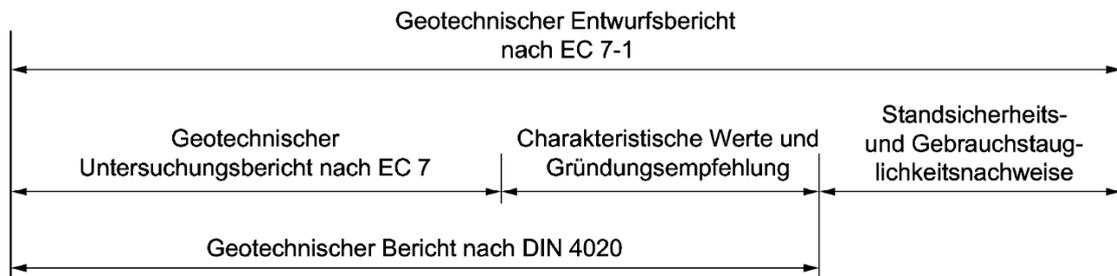


Abbildung 1: Darstellung entnommen aus DIN 4020:2010-12 (A7 – Geotechnischer Bericht)

Grundlage aller geotechnischen Nachweise sind die aus den Baugrunduntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse und der Geotechnische Bericht, der von einem Sachverständigen erstellt werden sollte. Der Geotechnische Bericht ist Grundlage der Standsicherheitsnachweise und Teil der Planung. Somit ist bei Baumaßnahmen der Geotechnischen Kategorie 2 und 3 der Geotechnische Bericht auch inhaltlich zu prüfen. Die Prüfung muss dann bei der gewählten Art, Lage und Tiefe der Baugrundaufschlüsse beginnen und dann auch die gewählten Laborversuche mit der Auswertung und Interpretation beinhalten. Die Prüfung darf sich nicht nur auf die Sinnhaftigkeit der angegebenen Kennwerte beziehen.

Bei dem Projekt des Hauptbahnhofes Stuttgart 21 einschließlich der Nord- und Südbauwerke für die Einfädung in die Tunnel sind nach den derzeitigen Kenntnissen und Planungstiefen folgende geotechnische Aspekte zu beachten und damit auch von einem Prüfenieur für Geotechnik zu prüfen:

- Geotechnische Berichte (Baugrundgutachten)
- Setzungsberechnungen
- Ermittlung von FEM-Kennwerten aus Laborversuchen und Rückrechnungen von Probelastungen
- Pfahlprobelastungen
- Eignungsprüfungen an Verpressankern
- Hebungsinjektionen
- Erddruck und Strömungsdrücke auf Baugrubenwände
- Verformungsberechnungen zu Baugrubensicherungen (Gebrauchstauglichkeitsnachweise für Nachbargebäude)

- Bauwerk-Boden-Interaktionsberechnungen zur Ermittlung von Pfahl- und Plattenbettungen
- Erdbebennachweise für Baugrubensicherungen, Bahnhofsbauwerke sowie für den Nord- und den Südkopf
- Pfahlgründungen und Erdbebennachweise für unterfahrende vorhandene Gebäude

2 Geotechnische Berichte (Baugrundgutachten)

Wie bei jeder Baumaßnahme ist die Untersuchung des Baugrundes und die damit einhergehende Festlegung der Baugrundeigenschaften essentiell für den Erfolg einer Baumaßnahme.

Bei einer komplexen Baumaßnahme, wie sie im Fall des Bahnhofs Stuttgart 21 offensichtlich vorliegt, sind besonders hohe Anforderungen an die Baugrunduntersuchungen evident. Gemäß DIN 4020:2010-12 sind diese in schriftlicher Form auszuarbeiten und es müssen gemäß EC 7 direkte Aufschlüsse gemacht werden. Aus diesen sind dann die erforderlichen Baugrundkennwerte labortechnisch und/oder mit Hilfe von Korrelationen abzuleiten.

2.1 Untersuchungen

Es wurden im Rahmen der Baugrunduntersuchungen im Projekt Stuttgart 21 zahlreiche Aufschlussbohrungen und Drucksondierungen abgeteuft, um den Baugrund zu erkunden. Hierbei konnte zum einen erkannt werden, dass teilweise stark heterogene Baugrundverhältnisse vorliegen, sodass bereits auf kurzen Distanzen größere Abweichungen in den Eigenschaften von dem vorwiegend anstehenden Gipskeuper erkennbar wurden. Weiterhin wurden umfangreiche bodenmechanische Laborversuche zur Ermittlung der maßgebenden bodenmechanischen Kennwerte durchgeführt.

Neben diesen gängigen geotechnischen Aufschlussuntersuchungen wurden jedoch auch weniger gängige Verfahren der Baugrunduntersuchung angewendet, die besondere geotechnische Fachkenntnisse erfordern. So wurden beispielsweise Pressiometerversuche durchgeführt, um die in-situ vorhandenen Baugrundsteifigkeiten abzuleiten. Außerdem wurde mit ergänzenden geophysikalischen Messungen der Durchmesser von vor Ort vorkommenden Dolinen ermittelt. Aufgrund der hohen Komplexität dieser Baugrunduntersuchungsverfahren ist diesbezüglich auch eine hohe geotechnische Fachkompetenz des Prüfsachverständigen erforderlich.

Im Verlauf des Projektes Stuttgart 21 sind aufgrund des Planungsfortschrittes zudem immer wieder neue bzw. ergänzende Baugrunduntersuchungen und –bewertungen erforderlich, die kontinuierlich vom geotechnischen Prüfer überprüft werden müssen. Zudem ist durch den geotechnischen Prüfer eine stetige Bewertung des globalen Einflusses von Anpassungen bezüglich des Baugrundverhaltens auf die Planung der Bauwerke für den Bahnhof erforderlich, sodass hier eine enge Zusammenarbeit mit dem

Prüfer der Standsicherheitsnachweise erfolgen muss. Somit zeigt sich hier deutlich die Notwendigkeit eines geotechnischen Fachprüfers für die fachliche Prüfung der Geotechnischen Berichte, die die grundlegende Planungsgrundlage für alle Baumaßnahmen darstellen. Da eine ständige Fortschreibung und Anpassung der geotechnischen Berichte mit zunehmenden Planungsfortschritt erfolgt, ist hier eine kontinuierliche Prüfarbeit zu leisten und ebenfalls kontinuierlich der globale Zusammenhang der Kennwerte zu den hierauf basierenden Nachweisen durch die Prüfsachverständigen im Blick zu behalten.

2.2 Bodenmechanische Kennwerte

Die bodenmechanischen Kennwerte sind die Grundlage aller statischen Berechnungen und beeinflussen somit die Nachweise signifikant. Die Herleitung der charakteristischen Kennwerte erfolgt anhand von Feld- und Laboruntersuchungen, unter Verwendung von Korrelation und oftmals auch aufgrund von Erfahrungen des Baugrundsachverständigen. Insbesondere wenn örtlich, wie bei der Baumaßnahme Stuttgart 21 dann auch noch lokal variierende Baugrundverhältnisse vorkommen (stark variierende Verwitterungsgrade des Gipskeupers, Möglichkeit des Vorliegens von Dolinen) ist die Ermittlung von standortspezifisch „korrekten“ bodenmechanischen Kennwerten keine einfache Aufgabe.

Bei der Baumaßnahme „Stuttgart 21“ wurden entsprechend umfangreiche und teilweise besondere Untersuchungsverfahren verwendet. So seien hier nochmals die Pressiometerversuche und geophysikalische Untersuchungen hervorgehoben. Nach der Prüfung durch den geotechnischen Prüfer können die bodenmechanischen Kennwerte Eingang in die statischen Berechnungen finden.

2.3 Parameter für FEM-Berechnungen

Im Rahmen der Planung des Bahnhofs Stuttgart 21 sind auch zahlreiche numerische Berechnungen erforderlich, die für Fragestellungen der Gebrauchstauglichkeit von Nachbarbauwerken, für Setzungsprognosen des neu zu errichtenden filigranen Bahnhofsgebäudes oder aber zur Ableitung von Bettungskennwerten und Federsteifigkeiten herangezogen werden. Es ist dabei die Boden-Bauwerks-Interaktion möglichst realistisch abzubilden. Hierbei sind höchste Anforderungen an die Genauigkeit und Qualität der durchgeführten Prognosen gestellt. Dies bedingt auch die Wahl eines hochwertigen Stoffmodells, um das Baugrundverhalten realistisch abzubilden.

Der Boden wurde mit einem Materialmodell inklusive Small Strain Stiffness abgebildet, dass die Anforderungen der EB 103, Absatz 4a erfüllt: Abbildung von Erst-, Ent- und Wiederbelastung. Zusätzlich wird es mittlerweile für angemessen angesehen, den Effekt der Dehnungen bei kleinen Verformungen in FE-Berechnungen zu berücksichtigen, da sich hierdurch Oberflächenkrümmungen an der GOK hinter einer Baugrube tendenziell besser quantifizieren lassen. Letzteres ist für etwas

entferntere Nachbarbebauung und für die Ermittlung von Bettungswerten für die Gründung (siehe Abschnitt 4.1) relevant.

Um diesen hohen Anforderungen an die stoffliche Modellierung des Baugrundverhaltens gerecht zu werden, werden alle numerischen Simulationen mit dem hochwertigen Hardening-Soil Small-Strain Stoffmodell (Benz, 2007) für den Baugrund durchgeführt. Die Ermittlung der Parameter für das Stoffmodell bedarf hierbei besonderer geotechnischer und numerischer Fachkenntnis und erfolgt auf Basis von:

- Vorhandenen Laborversuchen (Triaxial- und Oedometerversuche)
- Ergebnissen der Pressiometerversuche
- Nachrechnungen von Pfahlprobelastungen, siehe Abbildung 2 (Ortbetonrammpfähle und Bohrpfähle)

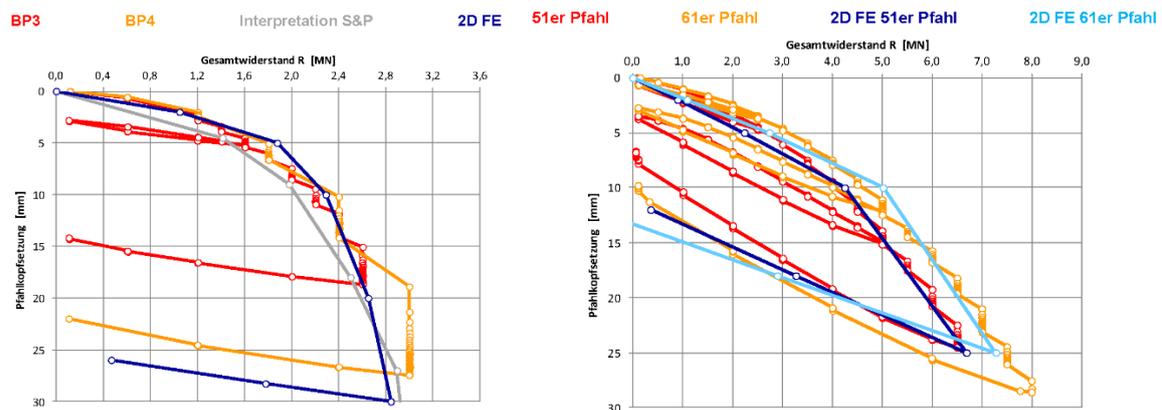


Abbildung 2: Exemplarische Beispiele der Nachrechnung von Pfahlprobelastungen an Bohrpfählen (links) bzw. Ortbetonrammpfählen (rechts) von der Fa. Wechselwirkung

Hierbei ist offensichtlich, dass es besonderer Sorgfalt bedarf, dass aus all den vorliegenden Daten realistische Stoffkennwerte ermittelt werden. Somit ist auch hier der geotechnische Prüfer aus unserer Sicht erforderlich, um mit seiner Fachkenntnis die ermittelten hochwertigen Stoffkennwerte zu überprüfen.

Weiterhin bedarf es auch hier einer kontinuierlichen Anpassung der Kennwerte an aktuelle Erkenntnisse, wobei der geotechnische Prüfer in der Prüfung neben der Prüfung der Kennwerte und Berechnungen auch die Auswirkungen von Änderungen im Kleinen auf das globale Verhalten im Blick behalten muss.

3 Baugruben

3.1 Tragfähigkeitsnachweise

Zur Sicherung der Baugruben sind im Wesentlichen rückverankerte Trägerbohlwände mit Holz- und Spritzbetonausfachung sowie Bohrpfahlwände vorgesehen. Geländesprünge in Längsrichtung der Baugrube (z. B. zur Herstellung von Dükerbauwerken) werden z. T. mit Böschungen gesichert.

Die geotechnische Prüfung deckt vor allem die Schnittstelle zwischen Geotechnischem Bericht und statischer Berechnung der Baugrubenverbauten ab. Weiterhin werden die Richtigkeit der Erddruckansätze sowie die Ansätze zum Nachweis der äußeren Standsicherheit geprüft. In jedem Bemessungsschnitt wird kontrolliert, wie die Ergebnisse der Baugrunduntersuchungen in den Rechenprofilen der statischen Berechnung interpretiert und umgesetzt wurden.

Besonderes Augenmerk wird bei der geotechnischen Prüfung auf die wechselseitige Beeinflussung von Nachbarbebauung und Baugrube gelegt. In die Tragfähigkeitsnachweise der Baugrubenverbauten geht diese in Form des anzusetzenden Erddruckes hinter dem Verbau und des zulässigen passiven Erddruckes vor dem Wandfuß ein.

Die Tragfähigkeitsnachweise der Baugrubenverbauten werden mit kommerziellen Software-Paketen auf der Basis analytischer Berechnungsverfahren geführt. Ausgenommen davon ist der Nachweis der tiefen Gleitfuge, für den ein spezieller Nachweis unter Berücksichtigung der Strömungskräfte infolge Grundwasserabsenkung entwickelt wurde. Für die Baugrubenverbauten der Bahnhofshalle und der Zufahrtbauwerke Nord- und Südkopf wird im Allgemeinen der Wasserspiegel im Umkreis der Baugruben auf Höhe der Baugrubensohle abgesenkt. Hierdurch entsteht hinter der Wand ein Absenktrichter, siehe Abbildung 3.

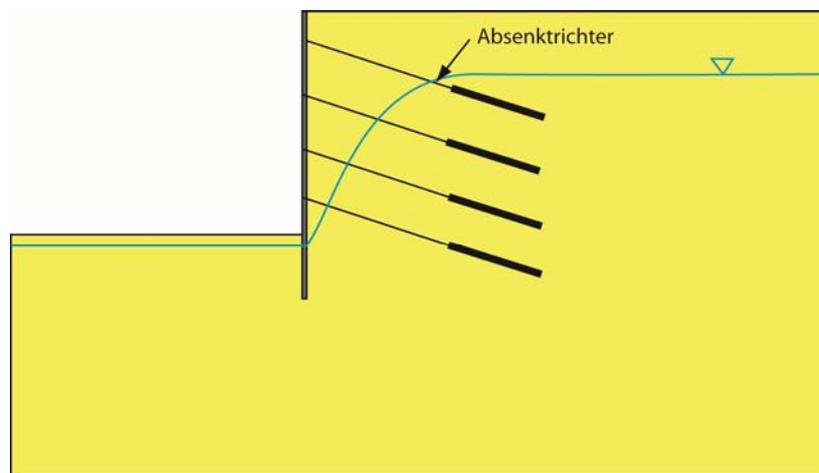


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Baugrube mit in der Baugrube abgesenktem Grundwasserstand und einem Absenktrichter hinter der Baugrube

In kommerziell verfügbaren Berechnungsprogrammen für Baugrubenwände ist jedoch in der Regel nur die Berechnung mit voll abgesenktem Grundwasser oder ohne Berücksichtigung einer Grundwasserabsenkung möglich.

Von dem Aufsteller der Baugrubenstatiken der Fa. Ed. Züblin AG wurde, um eine Berücksichtigung der Absenkkurve hinter der Baugrubenwand in den Nachweisen der tiefen Gleitfuge zu ermöglichen, ein Berechnungskonzept entwickelt, bei dem die Grundwasserabsenkung mit einbezogen wird (siehe Abbildung 4a für eine schematische Darstellung des Gleitkörpers mit Absenkkurve).

Bei Vorliegen von einer oder mehreren Ankerlagern wird die Wirkung der Strömung durch den Gleitkörper beim Nachweis der tiefen Gleitfuge berücksichtigt, siehe Abbildung 4b. Hierbei wird der Gleitkörper in mehrere Teilkörper unterteilt, sodass jeweils die auf die durchströmten Teilkörper wirkenden Strömungskräfte in den Nachweis mit einfließen.

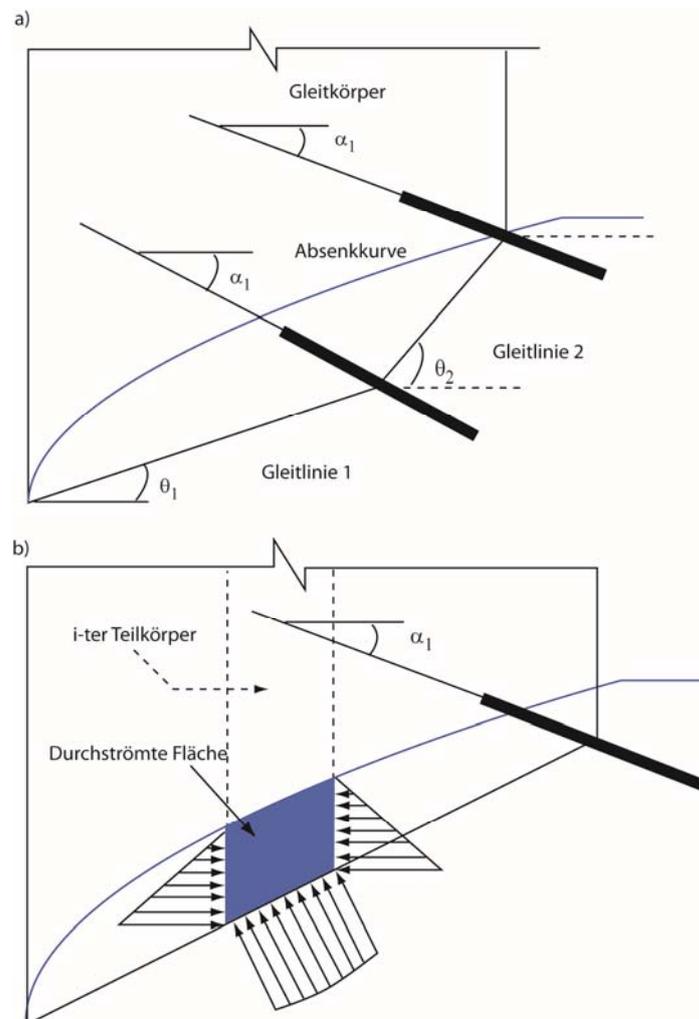


Abbildung 4: a) Prinzipielle Darstellung eines Gleitkörpers mit zwei Ankerlagen und abgesenktem Grundwasserstand, b) Angreifende Kräfte auf einen durchströmten Teilkörper innerhalb des untersuchten Gleitkörpers

Somit wurde im Rahmen der Planung für die Baugruben zum Bauvorhaben „Stuttgart 21“ ein innovatives Nachweiskonzept für den Nachweis der tiefen Gleitfuge entwickelt und als Planungsgrundlage eingereicht. Da es sich hierbei um geotechnische Nachweise und Berechnungen handelt, die über die „normale“ Nachweisführung bei Baugrubenverbauwänden hinausgehen, war hier eine umfangreiche geotechnische Prüfung erforderlich. Diese Prüfung ergab, dass das entwickelte Verfahren für die vorliegenden Randbedingungen anwendbar ist, sodass dieses seitdem für eine wirtschaftliche Bemessung der Baugrubenverbauten Verwendung findet.

3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Die EAB konkretisiert unter dem Punkt EB 83 den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für Verbaukonstruktionen. Gemäß der Voraussetzung der EAB EB 83, Absatz 1 kann in vielen baupraktisch relevanten Fällen auf eine rechnerische Nachweisführung verzichtet werden. Möglich ist dieses vereinfachte Vorgehen, weil die EAB durch die Lastansätzen auf den Verbau, beispielsweise durch die Berücksichtigung der Nachbarbebauung gemäß EB 20, EB 22 und EB 23 neben der erhöhten Standsicherheit auch die Steifigkeit der Konstruktion implizit erhöht. Die Größe der Verformungen des Baugrubenverbbaus und der Nachbarbebauung wird beim vereinfachten Vorgehen weder ausgewiesen noch nachgewiesen.

Der Absatz 2 der EB 83 nennt beispielhaft Merkmale von Baugrubenkonstruktionen bzw. baulichen Randbedingungen, bei denen ein vereinfachtes Vorgehen nicht zulässig ist und die Verformungen sowohl zu prognostizieren als auch deren Verträglichkeit nachzuweisen ist. Folgende Merkmale bzw. Randbedingungen erforderten einen rechnerischen Nachweis:

- Baugruben neben in schlechten Zustand befindlichen Bauwerken
- Baugruben neben Bauwerken, die einen besonders hohen Anspruch an die Beibehaltung der Ruhelage haben und
- Baugruben neben empfindlichen Anlagen im Sinne von EB 20

Nicht relevant wurden bisher für das Projekt die Maßgaben der EB 101, die den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Baugrubenkonstruktionen in weichen Böden regeln.

Der Aufsteller der Statiken hat sich entschieden, die Prognose der Verformungsanteile, die mit dem Aushub der Baugrube einhergehen, numerisch mittels FE-Methoden an ebenen Modellen zu erstellen. Verformungsanteile die aus dem Herstellungsprozess herrühren, wie beispielsweise Bohrvorgänge bei der Ankereinbringung, werden auf der Grundlage von Erfahrungen abgeschätzt und hinzuaddiert.

Für den geotechnischen Prüfer ergeben sich folgende Aufgaben:

- (1) Es ist eine Bewertung erforderlich, ob bei der jeweiligen Baugrubenkonstruktion die Merkmale und Randbedingungen gegeben sind, die einen Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erforderlich machen. Die Angaben nach EB 83, Absatz 2 geben grobe Anhaltspunkte vor, die jedoch nicht so eindeutig gefasst sind, als dass es nicht einer ingenieurtechnischen Bewertung der Gesamtsituation bedarf.
- (2) Die rechnerischen Prognosen der Verschiebungen sind durch unabhängige Vergleichsberechnungen zu überprüfen. Zu diesem Zweck werden in der Regel FE-Modelle aufgestellt. Die Entscheidung des Aufstellers, das Spannungs-Dehnungsverhalten der Böden mit dem Hardening-Soil-Modell inkl. des Effekts der Steifigkeit bei kleinen Dehnungen (Small Strain Stiffness) zu verwenden, wird als grundsätzlich geeignet bewertet. Um dieses Materialmodell ebenfalls bei den Vergleichsberechnungen nutzen zu können, war es allerdings erforderlich ebenfalls das Programmsystem Plaxis einzusetzen. Diese Entscheidung ist das Ergebnis einer Abwägung, bei der bessere Modellierungsgenauigkeit höher bewertet wurde als die Wahrscheinlichkeit dass das Produkt Plaxis 2D fehlerhaft ist. Zudem wurden aber auch zusätzlich durch Abstraktion auf bodenmechanische Modelle vereinfachte Vergleichsberechnungen zur Prüfung vorgenommen.
- (3) Die Verformungsanteile, die sich aus dem Herstellprozess ergeben, werden auf der Grundlage unserer umfangreichen Erfahrungen bewertet.

Für die Tätigkeiten im Rahmen der Aufgabe (1) bis (3) ist es hilfreich, breite Erfahrungen bei der Einschätzung der Situationen und Routine bei der Nutzung spezialisierte Simulationssoftware zu besitzen.

4 Gründungen

4.1 Gründungskonzepte

Bereits frühzeitig wurden erste Überlegungen zu möglichen Gründungskonzepten für den Bahnhof Stuttgart 21 angestellt. Als mögliche Gründungsvarianten wurden folgende Varianten diskutiert:

- eine Flachgründung,
- eine großflächige Bodenverbesserung unter der Bodenplatte (z. B. vermörtelte Schottersäulen),
- eine Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP),
- eine Pfahlgründung mit Bohrpfählen.

Hierbei wurde unter Beachtung aller planerischen und rechtlichen Aspekte eine Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) mit Pfählen, die nur in den oberen, verwitterten Bereich des Gipskeupers einbinden, als Vorzugsvariante planfestgestellt.

Im Zuge der weiteren Planung des Bahnhofs und der beiden Zufahrbauwerke (DB-Tunnel Nord- und Südkopf) ergaben sich diesbezüglich jedoch in kontinuierlicher Abstimmung neue Erkenntnisse. Es wurde durch komplexe numerische Betrachtungen festgestellt, dass die vorgesehene Gründung keine KPP gemäß KPP-Richtlinie (Hanisch et al. 2001) darstellt. In hochbelasteten Bereichen sind α_{KPP} -Werte $> 0,9$ vorhanden, sodass dort die Grundlagen der KPP-Richtlinie nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund wurde das Gründungskonzept angepasst.

Es liegt für den Hauptbahnhof nunmehr der Fall einer Pfahlgründung mit Mitwirkung der Bettung der Platte vor, während Teile des Nord- und Südkopfs als reine Flachgründung mit lokal angeordneten, setzungsmindernden Pfählen angesehen werden. Auch diese Form der Gründung kann als KPP bezeichnet werden, sie kann jedoch gemäß der KPP-Richtlinie nicht vollständig bemessen werden, d. h. die Pfähle müssen auf die Tragfähigkeit und nicht auf die Gebrauchstauglichkeit bemessen werden. Die Umsetzung dieses Konzeptes muss nun durch den geotechnischen Prüfer überprüft werden.

4.2 Pfahlprobelastungen

Es sind zwei unterschiedliche Pfahltypen vorgesehen, um die Bauwerkslasten in den Baugrund abzuleiten: Ortbetonrammpfähle und Bohrpfähle. Sowohl für die Bohr- als auch für die Ortbetonrammpfähle wurden mehrere Pfahlprobelastungen durchgeführt, anhand derer sowohl die Tragfähigkeit der Pfähle als auch numerische Berechnungskennwerte abgeleitet wurden. Es waren entsprechend numerische Nachrechnungen der Pfahlprobelastungen erforderlich. Hierbei stellen insbesondere Nachrechnungen der Probelastungen für die Ortbetonrammpfähle eine große Herausforderung dar. Dies ist darin begründet, dass es durch die Ausrammung des Pfahlfußes bei diesem Pfahltypen zu einer starken Verdichtung und Verspannung am Pfahlfuß kommt, siehe Abbildung 5.

Die resultierende Steifigkeit am Pfahlfuß und die räumliche Ausdehnung der Verspannungen am Fuß und um den Pfahl sind jedoch derzeit mit klassischen Verfahren der Geotechnik nicht prognostizierbar. Diese Werte sind jedoch im Hinblick darauf, dass in den numerischen Simulationen des Gesamtsystems Bahnhof die Ortbetonrammpfähle möglichst realitätsnah abgebildet werden müssen, um belastbare Verformungsprognosen zu erzielen und Bettungen abzuschätzen, von besonderer Bedeutung.

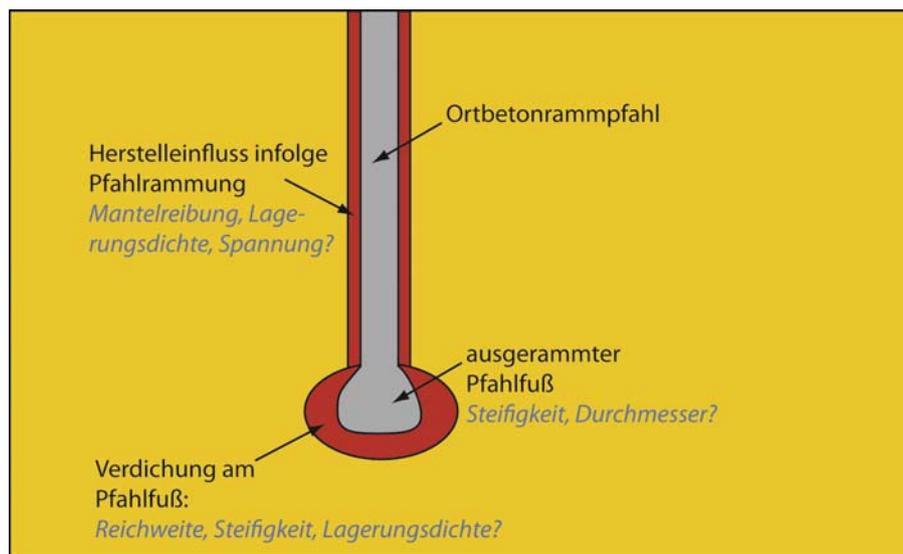


Abbildung 5: Mechanismen einer Pfahlfußausrammung bei Ort betonrammpfählen und Einflussparameter auf die Tragfähigkeit

Somit sind hier spezielle geotechnische Fachkenntnisse (auf dem Niveau des Standes der Forschung) aller Beteiligten erforderlich, da unter stetiger Einbeziehung des geotechnischen Prüfers eine ingenieurpraktische Lösung entwickelt werden muss, mit deren Hilfe auch Ort betonrammpfähle in den numerischen Berechnungen möglichst realitätsnah abgebildet werden können. Dies wird zurzeit erarbeitet.

Weiterhin ist aus der Darstellung der Gründung für den Hauptbahnhof erkennbar, dass direkt unterhalb der vorgesehenen Kelchstützen aufgrund der konzentrierten Lasteinleitung eine hohe Anzahl an eng nebeneinander stehenden Ort betonrammpfählen vorgesehen ist.

In den Bereichen mit eng angeordneten Pfählen ist nicht von einer Einzeltragwirkung der Pfähle auszugehen. Vielmehr ist dort eine Gruppenwirkung zu erwarten, welche gesondert durch eine Probelastung an einer Pfahlgruppe ermittelt werden muss. Ein derartiger Versuch wurde mittlerweile durchgeführt und wird zurzeit ausgewertet, um die Grundlage der weiteren Planungen zu bilden. Hierbei wurde deutlich, dass die Auswertung des Pfahlgruppenversuches sehr komplex ist und nur unter Zusammenarbeit von Sachverständigen für Geotechnik und Betonbau möglich ist.

Somit kann anhand der hier dargestellten Beispiele die hohe geotechnische Komplexität im Planungsprozess zum Projekt „Stuttgart 21“ erkannt werden, was die Notwendigkeit eines geotechnischen Prüfers neben einem Prüfer für die Standsicherheitsnachweise deutlich macht.

4.3 Erdbebennachweise

Gemäß DIN EN 1998 und der "Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg" liegen die Bauwerke des Tiefbahnhofs Stuttgart 21 in der Erdbebenzone 1, sodass

hierfür ein Nachweis für den Lastfall Erdbeben erforderlich wird. Dies bezieht sich sowohl auf die Bauwerke Nord- und Südkopf, insbesondere aber auch auf das eigentliche Bahnhofsgebäude mit seiner hinsichtlich Verformungen empfindlichen Schalenkonstruktion. Da die Bauwerke Nord- und Südkopf des Bahnhofs keine Tunnelbauwerke im klassischen Sinne sind, ist auch für diese Bauwerke der Nachweis gegenüber Erdbebenbelastung zu führen.

Im Rahmen der Planung des Bahnhofs sind beispielsweise folgende Fragen zu klären:

- Entwicklung eines Nachweiskonzepts für die Bauwerke Nord- und Südkopf,
- Entwicklung eines Nachweiskonzepts für den das Bahnhofsgebäude,
- Herleitung repräsentativer Bemessungserdbeben für den Raum Stuttgart.

Für den Nord- und den Südkopf ist hierbei bisher beispielsweise ein mehrstufiges Nachweiskonzept vorgesehen:

1. Aufprägen der seismischen Freifeldbewegung direkt auf die Bauwerke Nord- und Südkopf in repräsentativen ebenen Schnitten und Ermittlung der resultierenden Schnittgrößen.
2. Wenn der Nachweis für das Bauwerk unter den aus dem unter 1. dargestellten sehr konservativen Ansatz ermittelten Lasten nicht geführt werden kann, wird die die Boden-Bauwerks-Interaktion über das Einführen einer Bettung des Bauwerks berücksichtigt und es werden erneut die Schnittgrößen ermittelt.
3. Wenn der Nachweis auch bei Ansatz einer Bettung im ebenen Schnitt nicht erbracht werden kann, ist eine dreidimensionale Berechnung durchzuführen.

Da keine Normengrundlage für ein derartiges Konzept existiert, kann die Entwicklung eines entsprechenden Erdbebenbemessungskonzeptes nur in Zusammenarbeit mit Experten unterschiedlicher Fachrichtungen (Geotechnik, Erdbebeningenieurwesen, Seismologie, Numerik usw.) erfolgen.

Somit werden aber auch die hohen Anforderungen an den geotechnischen Prüfer deutlich, der die interdisziplinär erarbeiteten Bemessungskonzepte und Berechnungsansätze umfassend prüfen muss, um somit eine höchstmögliche Qualitätssicherung zu erzielen.

4.4 Besondere geotechnische Planungen

Neben dem Gesamtbauwerk Hauptbahnhof mit DB-Tunnel Nord- und Südkopf sind im Zuge der Planung der Baumaßnahme verschiedene weitere Fragestellungen zu betrachten, die vielfach von geotechnischen Randbedingungen dominiert werden. An dieser Stelle wird die Hebungsinjektion an einem Bestandsgebäude beispielhaft erläutert.

In der Umgebung der geplanten Baumaßnahme sind zahlreiche Bestandsgebäude vorhanden, die während der Durchführung der Bauarbeiten möglichst nicht beschädigt werden dürfen. Hierfür sind Kompensationsmaßnahmen erforderlich, wenn die aufgrund der Baumaßnahme prognostizierten Bauwerksverformungen vorgegebene Grenzkriterien überschreiten.

In einem konkreten Fall befinden sich direkt neben der für das Bahnhofsgebäude erforderlichen Baugrube zwei Stützen eines repräsentativen Bauwerkes welche nur geringe Verformungen statisch aufnehmen können. In den Verformungsprognosen für diese Stützen werden jedoch Deformationen prognostiziert, die oberhalb der zulässigen Verformungen liegen, sodass Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Stützensenkungen zu reduzieren. Hierfür wurde ein Konzept mit Hebungsinjektionen mittels Manschettenrohren gemäß DIN EN 12715:2000-10 erarbeitet, siehe Abbildung 6.

Es sind Manschettenrohrinjektionen um die Pfähle unterhalb der zu sichernden Stützen vorgesehen. Diese Injektionen haben zum einen den Effekt einer Verbesserung des Baugrundes um die Pfahlgründung, um somit eine Reduktion der prognostizierten Setzungen zu erzielen. Zudem soll mit Hilfe der Injektionen durch die Manschettenrohre ermöglicht werden, die Stützen bei eintretenden Setzungen gezielt anzuheben. Zur Überwachung der Stützenverformungen ist ein umfangreiches messtechnisches Überwachungsprogramm vorgesehen.

Um die Eignung dieses Konzeptes für eine gezielte Hebung der Stützen nachzuweisen, wurde im Rahmen der Prüfung nur die sogenannte Kontaktinjektion und eine erste zulässige Hebungsinjektion (ca. 2mm) freigegeben. Wenn im Rahmen dieser Probeinjektionen gezeigt wird, dass die Hebung wiederholt erfolgreich durchgeführt werden kann, wird das Verfahren als geeignet eingestuft und die Planung der angrenzenden Baugruben kann freigegeben werden.

Literatur

- T. Benz: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, Dissertation, Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Hrsg. P.A. Vermeer, 2007.
- J. Hanisch, R. Katzenbach, G. König: Kombinierte Pfahl-Plattengründungen, Ernst & Sohn, 2001
- EAB (2006): Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag (Die Nachweise der Baugrubenverbauten erfolgen noch nach DIN 1054:2005)

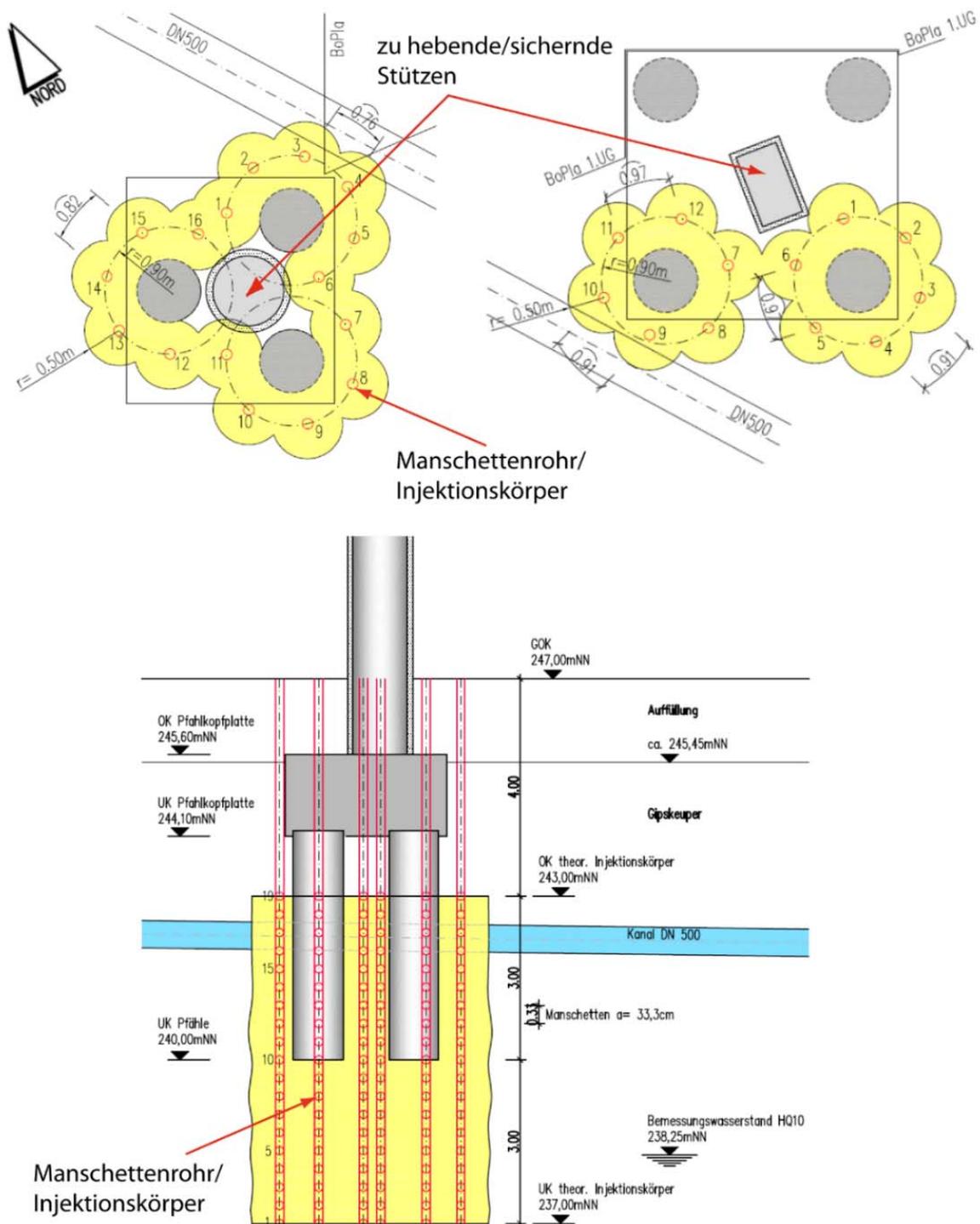


Abbildung 6: Konzept von Manschettenrohrinjektionen zur gezielten Hebung zweier Stützen neben den Baugruben des Bahnhofs Stuttgart 21 aus der Planung der Ed. Züblin AG