

Neue Erkenntnisse bei der Ausführung von tiefen Baugruben mit lokaler Entspannung des Grundwassers im Frankfurter Ton

L. PITTELOUD

Krebs und Kiefer, Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Darmstadt

Y. EL-MOSSALLAMY, J. LEINENBACH

ARCADIS Consult GmbH, Darmstadt

ZUSAMMENFASSUNG

Für die bis zu 18 m tiefe Baugrube des Hochhauses Gallileo wurde eine innovative technische Lösung angewandt, um die Einwirkung auf die Verbauwand zu reduzieren. Durch eine lokale Reduktion des Wasserdrucks auf die Verbauwand mittels Entspannungsplanzen in Verbindung mit längengestaffelten Verbaupfählen wurde es möglich, ein wirtschaftliches, rückverankertes Verbaukonzept ohne innere Aussteifung bzw. Deckelbauweise zu entwerfen. Im vorliegenden Beitrag wird über die Planung dieser Baugrube und die gewählten Berechnungsannahmen berichtet. Im Zuge der Ausführung wurden als Teil des Beweissicherungsprogramms sowie zur Verifizierung der Berechnungsannahmen umfangreiche Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Porenwasserdruck-, Inklinometer- und Ankerkraftmessungen werden präsentiert und den prognostizierten Werten gegenübergestellt.

1 EINLEITUNG

Aus umweltrechtlichen Gründen ist es seit Anfang der 90er Jahre in Frankfurt am Main üblich, Baugrubenumschließungen im Grundwasser wasserdicht auszuführen. Die Vorteile einer wasserdichten Ausbildung der Baugrubenumschließung liegen bekanntermaßen u. a. in der Minimierung des Eingriffs in den Grundwasserhaushalt und in der Reduktion der Verformungen der Nachbarschaft infolge Grundwasserabsenkung.

Für die Planer einer Baugrube im Grundwasser bedeutet der Verzicht auf eine außenliegende Grundwasserabsenkung eine wesentlich höhere Belastung auf die Verbauwand durch den Wasserdruck. Mit zunehmender Baugrubentiefe nehmen die Einwirkungen auf einen wasserundurchlässigen Verbau Größenordnungen an, die durch eine konventionelle Rückverankerung und das Erdauflager nur mit hohem technischen und wirtschaftlichen Aufwand in den Baugrund abgetragen werden können. Zusätzlich wird insbesondere im innerstädtischen Bereich der zur Unterbringung der Verbauanker erforderliche Raum durch Nachbarbauwerke stark begrenzt.

Alternativkonzepte zur Rückverankerung, wie z.B. innere Aussteifungen oder die Deckelbauweise, sind i.d.R.

wegen ihrer negativen Auswirkungen auf den Bauablauf nicht erwünscht. Eine der wichtigsten Entwurfskriterien für die Planung der Baugrube des Hochhauses Gallileo war die Hindernisfreiheit in der Baugrube, um eine schnelle und behinderungsfreie Ausführung der Hochbauarbeiten zu gewährleisten.

Gemäß dem Grundwasserstand am Standort des Gallileo betrug der hydrostatische Wasserdruck in Höhe der Baugrubensohle ca. 110 kN/m^2 . Um die rückverankerte Verbaulösung bei gleichzeitig möglichst geringer Beeinflussung des Grundwasserhaushalts realisieren zu können, mussten die hydraulischen Einwirkungen auf den Verbau durch gezielte und lokal begrenzte Entspannungsmaßnahmen deutlich reduziert werden.

Im vorliegenden Beitrag wird über die Planung der mittlerweile ausgeführten Baugrubenumschließung berichtet. Weiterhin werden die wesentlichen Ergebnisse der baubegleitenden Messungen (Wasserdrücke, Verbauverformungen, Ankerkräfte) erläutert und den im Zuge der Planung erstellten Prognosen gegenübergestellt.

2 BAUGRUND UND GRUNDWASSER

Der Baugrund am Projektstandort besteht aus einer ca. 8 m mächtigen Deckschicht mit oberflächennahen Auffüllungen und darunter liegenden quartären Kiessanden. Unterhalb der Deckschicht folgt die unter dem Begriff Frankfurter Ton zusammengefasste tertiäre Wechsellagerung aus ausgeprägt plastischen Tonen mit eingelagerten, bis zu mehreren Metern mächtigen Kalksteinbänken sowie Hydrobiensanden. Durch die Baugrunderkundung und die Auswertung der Bohrprotokolle der 300 Verbaupfähle und 47 Gründungspfähle ließen sich über das gesamte Bauareal eine obere und eine untere Kalksteinbank feststellen (s. Bild 1).

Unterhalb des zwischen 39 m und 45 m mächtigen Frankfurter Tons folgen die Inflatenschichten, die im wesentlichen aus Kalkstein mit unterschiedlichen Verwitterungsgraden, aber auch aus Kalksanden und Tonen bestehen. Die Kalksteine der Inflatenschichten sind teilweise verkarstet.

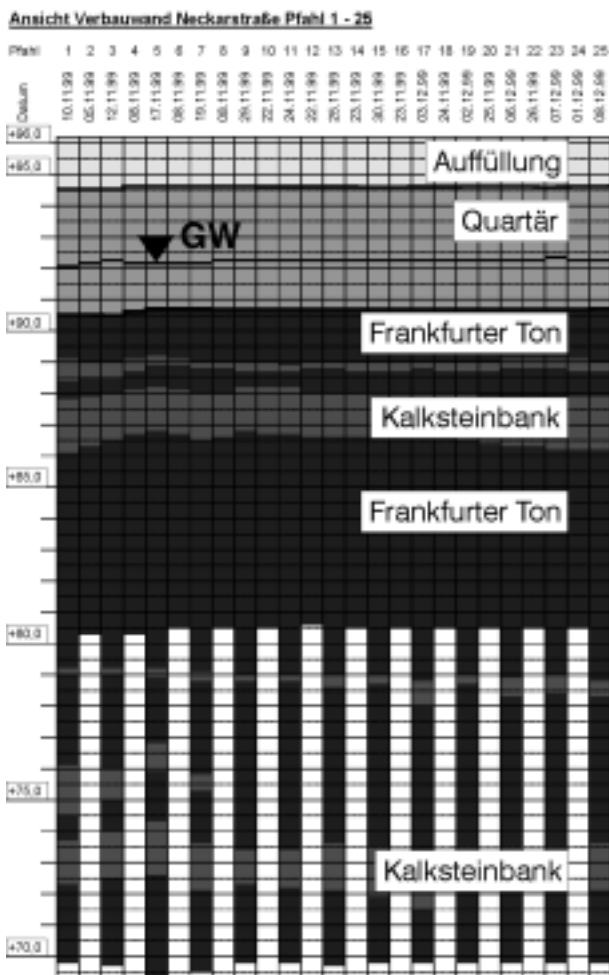


BILD 1 AUSZUG DER BOHRPROTOKOLLE

Das Grundwasser steht im Baufeld in einer Tiefe von ca. 6 m unter GOK an. Für die Baumaßnahme sind zwei relevante Aquifersysteme, die quartären Schichten sowie die tertiären Kalksteinbänke und Hydrobiensandlagen, zu unterscheiden. Sofern keine direkte Beeinflussung der Grundwasserströmung in den Aquiferen z.B. durch

Grundwasserhaltungsmaßnahmen stattfindet, unterscheiden sich die Spiegelhöhe des freien Grundwasserspiegels im Quartär und die Druckhöhen des gespannten Grundwassers in den tertiären Grundwasserleitern nur um wenige Dezimeter. Durch die Wechselfolge von gut durchlässigen und gering durchlässigen Schichten weist das tertiäre Schichtpaket in horizontaler Richtung eine deutlich höhere Durchlässigkeit als in vertikaler Richtung auf.

3 HOCHHAUS GALLILEO

Das Hochhaus Gallileo der Dresdner Bank AG wird derzeit im Bahnhofsviertel der Stadt Frankfurt am Main errichtet.



BILD 2 PROJEKTSTANDORT

Das 136 m hohe, auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) gegründete Bauwerk wird nach Fertigstellung Arbeitsplätze für 1600 Mitarbeiter anbieten. In den Untergeschossen soll das „English Theater“ untergebracht werden.

Das 3300 m² große Baugelände grenzt an seiner Westseite direkt an eine denkmalgeschützte und setzungsempfindliche Bausubstanz.

Die Vorarbeiten für die Baugrube fingen im September 1999 an. Ende 1999 wurde mit dem Aushub begonnen. Die Bodenplatte wurde im Dezember 2000 fertiggestellt. Die Rohbauarbeiten werden voraussichtlich im März 2002 abgeschlossen sein.

4 BAUGRUBENKONZEPT

4.1 VERBAU

Zur Herstellung der 3 Untergeschosse und der bis zu 3,5 m dicken Bodenplatte des Hochhauses Gallileo war eine Baugrubentiefe von 17,1 bis zu 18,1 m erforderlich. Um den Einfluss auf die teilweise verformungsempfindlichen Nachbarbauwerke zu reduzieren, musste eine verformungsarme Verbaukonstruktion gewählt werden. An der Baugrubenseite zur direkten Nachbarbebauung besteht die zusätzliche Anforderung, dass die Verbaukonstruktion einen Teil der Gründungslasten des Neubaus übernehmen soll, um den exzentrischen Bauwerkslasten entgegenzuwirken. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde eine überschnittene Bohrpfahlwand mit einem Pfahldurchmesser $d = 0,9$ m und Achsabständen von 0,75 m gewählt. Für die Bemessung der Bohrpfahlwand wurde entsprechend der erforderlichen Verformungsbegrenzung ein erhöhter aktiver Erddruckansatz (25 % bzw. 50 % Erdruchdruckanteil für die Straßenseiten bzw. für die Seite zur Nachbarbebauung) vorausgesetzt.

Im Hinblick auf die erforderliche Reduzierung des Wasserdrucks bei gleichzeitiger Schonung des oberflächennahen Grundwasserhaushalts wurde eine in der Tiefenausdehnung begrenzte Grundwasserentspannung angestrebt. Die Voraussetzungen hierfür waren durch die anisotropen Durchlässigkeitsverhältnisse der tertiären Schichtenfolge grundsätzlich gegeben. Die zu diesem Zweck entwickelte technische Lösung bestand aus folgenden Maßnahmen (s. Bild 3):

Längenstaffelung der Verbaupfähle

Durch Begrenzung der Einbindetiefe der unbewehrten Pfähle auf 1 m unter Baugrubensohle wurde eine Entspannung der darunterliegenden Bodenschichten durch die innerhalb der Baugrube angeordnete Wasserhaltung ermöglicht.

Entspannungsanlagen

Zur weiteren Reduzierung des erdseitigen Wasserdrucks wurden in einem Horizontalabstand von 3 m Schrägbohrungen (ca. 45° zur Horizontalen) durch den Verbau und die dahinter anstehenden Tertiärschichten ausgeführt. Diese Bohrungen, die im Mittel eine Länge von ca. 9 m erreichten, wurden mit Filterkies und Filterrohr zu sogenannten Entspannungsanlagen ausgebaut.

Die Ansatzhöhe der Entspannungsanlagen ergab sich aus der Zielsetzung, dass zu der stark wasserführenden oberen Kalksteinbank ein Mindestabstand von 1 m einzuhalten ist. Gründe hierfür waren die generell angestrebte Minimierung der anfallenden Wassermenge sowie eine nicht auszuschließende hydraulische Verbindung der oberen Kalksteinbank mit dem teilweise nur eng darüberliegenden quartären Grundwasserleiter. Zusätzlich war es aufgrund der engen Ankerdichte zweckmäßig, die Entspannungsanlagen unterhalb der

Entspannungsanlagen unterhalb der untersten Ankerlage anzuordnen.

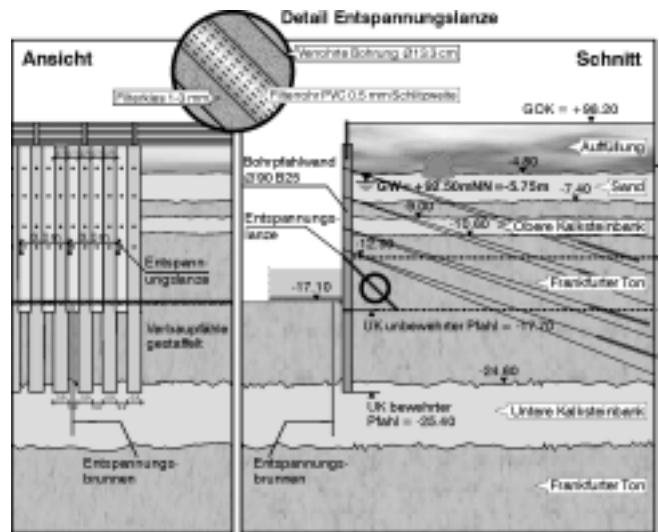


BILD 3 PRINZIPSCHNITT VERBAUKONZEPT

4.2 WASSERHALTUNG

Zur Entleerung des Baugrubentroges sowie zur Gewährleistung der Auftriebsicherheit der Baugrubensohle wurden innerhalb der Baugrube 3 großkalibrige Förderbrunnen und 37 verfilterte Entspannungsbohrungen hergestellt. Die Entspannungsbohrungen und -anlagen wurden bis zur Überbauung der Baugrubensohle über Drainagegräben und Pumpensümpfe entwässert. Im Zuge der Herstellung der Gründungsplatte wurden die Entspannungsbohrungen und -anlagen über das Drainagesystem an die Förderbrunnen angeschlossen, deren Betrieb auch während der Errichtung des Neubaus bis einschl. 5. OG zur Gewährleistung der Auftriebssicherheit erforderlich war.

5 BERECHNUNGEN UND NACHWEISE

5.1 ERD- UND WASSERDRUCKANSATZ

Das Konzept, den Wasserdruck mit Hilfe von Entspannungsanlagen zu reduzieren, wurde mit Hilfe von numerischen Strömungsberechnungen untersucht. Zur Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Maßnahmen zur Wasserdruckreduzierung wurden 3 verschiedene Varianten simuliert. Die im Rahmen dieser Variantenstudien ermittelten Wasserdruckverläufe auf den Verbau sind im Bild 4 dargestellt.

Die unterschiedlichen Verläufe in Bild 4 verdeutlichen, dass bereits durch die Längenstaffelung der Verbaupfähle (Variante V2) gegenüber der durchgehend wasserdichten Verbauwand (Variante V3) eine maßgebliche Verringerung des einwirkenden Wasserdrucks erreicht wird. Eine zusätzliche deutliche Reduzierung ergibt sich bei Berücksichtigung der Wirkung der Entspannungsanlagen (Variante V1).

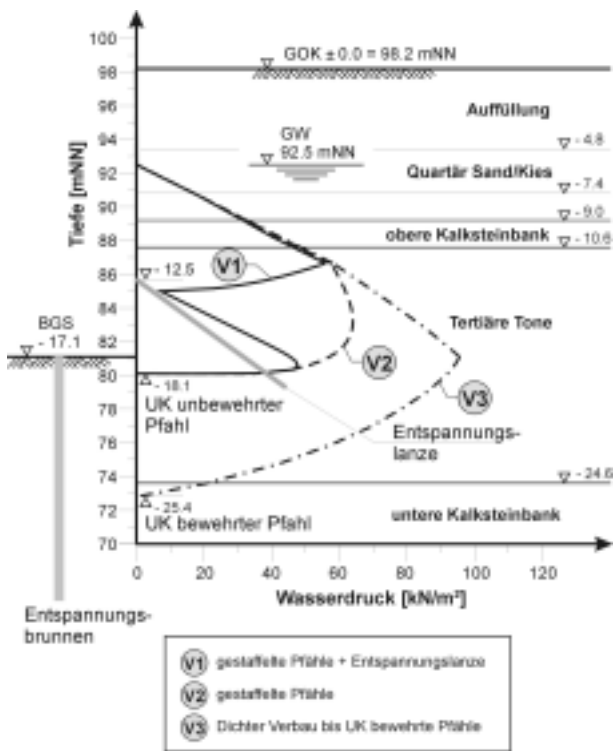


BILD 4 EINFLUSS DER ENTSPANNUNGSMABNAHMEN AUF DEN ERDSEITIGEN WASSERDRUCKVERLAUF

Gemäß den Ergebnissen für die gewählte Variante V1 nimmt der Wasserdruck auf die Verbauwand im Bereich des Quartärs und in der oberen Kalksteinbank hydrostatisch zu. Die Tatsache, dass die hydrostatische Zunahme rechnerisch bis in die obere Kalksteinbank reicht, ist darauf zurückzuführen, dass im Berechnungsmodell, auf der sicheren Seite liegend, eine hydraulische Verbindung zwischen der oberen Kalksteinbank und dem quartären Grundwasserleiter simuliert wurde. Unterhalb der oberen Kalksteinbank ergibt sich in den vertikal gering durchlässigen Tonen ein starker Potentialabbau. Auf Höhe des Lanzenkopfes geht der Wasserdruck wieder in einen annähernd hydrostatischen Verlauf über. Im umströmten Fußbereich der unbewehrten Verbaupfähle tritt erneut ein vergleichsweise starker Potentialabbau auf.

Aus dem Potentialabbau resultieren in den betreffenden Baugrundsichten Strömungskräfte. Durch die ausgeprägt anisotropen Durchlässigkeitsverhältnisse im Frankfurter Ton ($k_v \ll k_H$) sind der Potentialabbau und die gleichgerichteten Strömungskräfte im Bereich des angenommenen aktiven Gleitkeils annähernd vertikal orientiert (vgl. Bild 5). Dies führt zu einer Erhöhung der effektiven Vertikalspannungen im Baugrund und somit zu einem Zusatzerddruck auf den Verbau (s. Bild 5, rechts). Die durch die Wasserdruckentspannung erzeugte horizontale Entlastung des Verbaus wird durch den Zusatzerddruck teilweise wieder kompensiert. Aufgrund der Tatsache, dass der horizontale Zusatzerddruck nur

einen vom Erddruckbeiwert abhängigen Teilwert der vertikalen Strömungsdrücke erreicht, ergibt sich in der Summe nach wie vor eine Verminderung der Einwirkungen auf den Verbau.

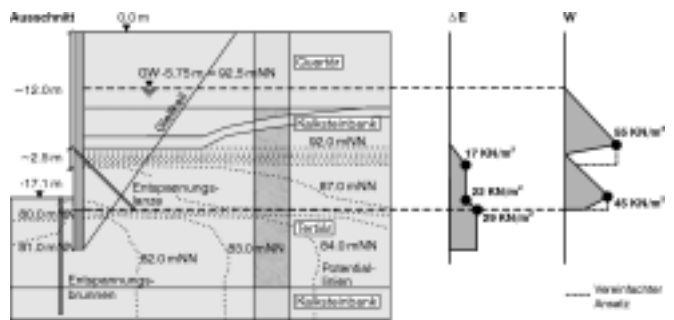


BILD 5 ERMITTELTE POTENTIALLINIEN, RECHNERISCHE ZUSATZERDDRUCK- (ΔE) UND WASSERDRUCKVERLÄUFE (W)

5.2 BESTIMMUNG DER ANKERLÄNGE

Beim Nachweis der tiefen Gleitfuge zur Ermittlung der erforderlichen Ankerlängen wurden die in Bild 6 dargestellten Wasserdruckansätze gewählt.

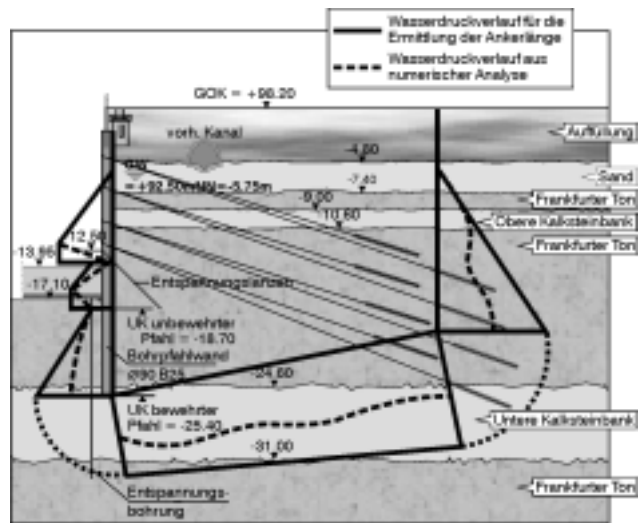


BILD 6 WASSERDRUCKANSÄTZE FÜR DEN NACHWEIS DER TIEFEN GLEITFUGE

Auf der Seite der Verbauwand wurde der aus den Strömungsberechnungen abgeleitete reduzierte Wasserdruck angenommen, während an der Ersatzankerwand von einem hydrostatischen Wasserdruckverlauf ausgegangen wurde. An der Basis der tiefen Gleitfuge wurde der Wasserdruckverlauf zwischen den vorgenannten Ansätzen linear interpoliert. Durch die gewählten Ansätze werden innerhalb des Gleitkörpers rechnerisch Strömungskräfte mit einer deutlichen Horizontalkomponente erzeugt, die sich im Nachweis prinzipiell ungünstig auf die erforderliche Ankerlänge auswirken. Diese Annahmen liegen hinsichtlich der Strömungsverhältnisse auf

der sicheren Seite. Sie wurden von den Planungsbeteiligten dennoch bewusst gewählt, da sich die höheren Ankerlängen im Hinblick auf die Verformungen des Verbaus und der angrenzenden Nachbarbebauung positiv auswirken.

5.3 VERFORMUNGSPROGNOSE VERBAU

Vor dem Hintergrund der verformungsempfindlichen Nachbarbebauung und der damit erforderlichen Verformungsbegrenzung, wurden die üblichen verbaustatischen Nachweise durch numerische Verformungsrechnungen ergänzt. Ziel dieser Berechnungen war zum Einen die rechnerische Überprüfung des geplanten Verbausystems im Hinblick auf die zuzulassenden Verformungen. Zusätzlich wurden die prognostizierten Werte als Bewertungsgrundlage für die bauzeitlich gemessenen Verschiebungen des Verbaus und der Nachbarbebauung benötigt.

Die Verformungsprognosen erfolgten an 2 ausgewählten Verbaubereichen in den Bereichen der 4lagigen (straßenseitiger Verbau) und der 3lagigen Rückverankerung (Grenzseite zur Nachbarbebauung) auf Grundlage einer vertikal-ebenen Finite-Element Modellierung. Das verwendete Programmsystem Plaxis ermöglichte eine getrennte Simulation der Bauzustände (Aushub, Ankerherstellung etc.) unter Berücksichtigung der hydraulischen Wirkung der Grundwasserentspannung. Der Baugrund wurde als geschichtetes, elastoplastisches Medium mit den in Plaxis implementierten Stoffgesetzen „Hardening Soil Model“ bzw. „Mohr-Coulomb Modell“ (s. [3] und [4]) abgebildet. Um die zeitlichen Abhängigkeiten des Verformungs- bzw. Bruchverhaltens des konsolidierungsfähigen Baugrundes zu untersuchen, wurden im Hinblick auf die Scherparameter des Frankfurter Tons zwei Grenzfälle betrachtet:

1. Anfangsscherfestigkeit $c_u = 100 \text{ kN/m}^2$
2. dränierte (End-)Scherfestigkeit $\varphi' = 20^\circ$,
 $c' = 20 \text{ kN/m}^2$

Die in beiden Berechnungsschnitten ermittelten maximalen Horizontalverschiebungen des Verbaus betragen zwischen 1 cm und 3 cm. Erwartungsgemäß führte der Ansatz der Anfangsscherfestigkeit zu geringfügig kleineren Verschiebungen als der Ansatz der dränierten Scherparameter.

Wegen der insgesamt geringen Verformungen, die nach den rechnerischen Prognosen zu erwarten waren, wurde entschieden, dass das geplante Verbausystem die Verformungsanforderungen ohne weitere Zusatzmaßnahmen bzw. Modifikationen (z.B. Verländerung der Einbindetiefe) erfüllen kann.

6 MESSERGEBNISSE

Wie einleitend erwähnt, wurde die Ausführung der Baugrube im Zuge der Beweissicherung durch ein umfangreiches Messprogramm begleitet. Dabei wurden folgende Parameter messtechnisch erfasst:

- quartäre und tertiäre Grundwasserstände mit Hilfe von Grundwassermessstellen
- erdseitige Porenwasserdrücke durch unmittelbar hinter dem Verbau installierte Porenwasserdruckgeber
- Horizontalverschiebungen des Verbaus durch Inklinometer und geodätische Messungen am Verbaukopf
- Vertikalverschiebungen des Verbaus und der umliegenden Gebäude durch geodätische Messungen

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der baubegleitenden Messungen aufgezeigt. Ein Vergleich der Messergebnisse mit im Vorfeld prognostizierten Werten wird in Kap. 7 vorgenommen.

6.1 GRUNDWASSERSTÄNDE

Der Grundwasserstand in den quartären und tertiären Schichten wurde in insgesamt 17 Grundwassermessstellen beobachtet, die in einem Abstand von bis zu ca. 300 m um die Baugrube angeordnet waren. Die Pegelmessungen dienten zur Überwachung der durch die Baugrubenwasserhaltung bewirkten, weiträumigen Entspannung der tertiären Grundwasserleiter sowie zur Überprüfung, inwieweit der quartäre Grundwasserleiter durch die Maßnahmen beeinflusst wird.

Die Beobachtung der quartären Messstellen zeigte, dass eine nennenswerte Beeinflussung des quartären Grundwasserspiegels durch die Entspannung der tieferliegenden Aquifere nicht stattgefunden hat. Lediglich eine direkt neben dem Verbau angeordnete Grundwassermessstelle ergab einen etwas höheren Spiegelabfall um ca. 1,4 m. Dies ist höchstwahrscheinlich auf hydraulische Verbindungen zwischen Quartär und Tertiär zurückzuführen, die beim Bohren der obersten Ankerlage unvermeidbar erzeugt wurden. In den übrigen quartären Messstellen betrug der bauzeitliche Grundwasserabfall max. ca. 0,5 m.

Weitaus deutlicher als der quartäre Aquifer reagierten den Messungen zufolge die tertiären Grundwasserleiter. Unmittelbar neben der Baugrube wurde eine Reduzierung der gespannten Grundwasserdruckhöhe um ca. 10 m gemessen. Selbst in den ca. 300 m entfernten Messstellen ließen sich noch Druckabfälle von ca. 2-3 m beobachten. Dabei ist jedoch insbesondere im Fall der weiter entfernten Grundwassermessstellen eine Beeinflussung durch weitere Wasserhaltungsmaßnahmen in der Innenstadt nicht auszuschließen.

6.2 PORENWASSERDRUCK

Die Veränderung der Porenwasserdrücke hinter dem Verbau wurden in 6 Messschnitten in jeweils 2 unterschiedlichen Tiefenbereichen des Tertiär erfasst. Zu diesem Zweck wurden je Messschnitt 2 Porenwasserdruckgeber ca. 1-2 m oberhalb und 1-2 m unterhalb der Entspannungslanzen im Baugrund installiert (s. Bild 7, unten rechts).

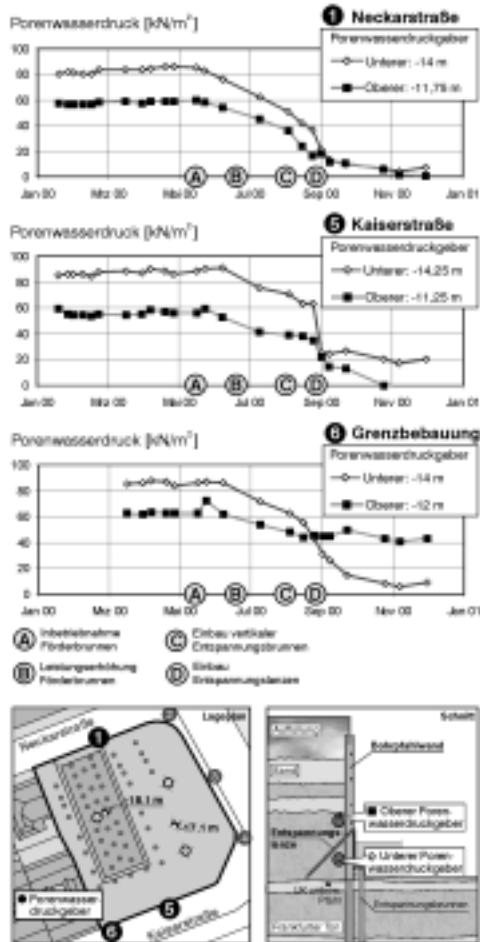


BILD 7 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DES PORENWASSERDRUCKS IN DREI BAUGRUBENSCHNITTEN

Die gemessenen zeitlichen Entwicklungen der Porenwasserdrücke sind in Bild 7 exemplarisch für 3 der 6 Messschnitte dargestellt. Allen Messungen zufolge trat bereits vor dem Einbau der Entspannungslanzen ein unterschiedlich stark ausgeprägter Abfall der Porenwasserdrücke auf. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die Umströmung der unbewehrten Verbaupfähle zurückzuführen. Als weitere Ursache für den frühen Abfall der Porenwasserdrücke sind die Ankerbohrungen anzusehen, die unvermeidbar zu einer Teildrängung der durchörterten grundwasserführenden Schichten sowie zu hydraulischen Verbindungen mit den tieferliegenden, planmäßig entspannten Grundwasserleitern geführt haben. Eine weitergehende Druckentspannung nach Einbau der Entspannungslanzen zeigt sich, mit Ausnahme des oberen Porenwasserdruckgebers im Schnitt 6 (s. Bild 7, unterstes Diagramm) in allen

untersten Diagramm) in allen Messschnitten mit ebenfalls unterschiedlich starker Ausprägung.

Die Funktionsfähigkeit der Entspannungsmaßnahmen wird somit grundsätzlich durch die gemessenen Porenwasserdruckverläufe bestätigt.

6.3 VERSCHIEBUNGEN DES VERBAUS

Die Verschiebungen des Verbaus wurden mit Hilfe von 5 Vertikalinklinometern gemessen, die in den bewehrten Verbaupfählen installiert waren (s. Bild 8, unten). Da generell nicht auszuschließen war, dass der Verbau sich auch im Pfahlfußbereich verschieben wird, wurden die Inklinometermessungen durch geodätische Höhe- und Lagemessungen ergänzt. In Bild 8 sind die Ergebnisse der Verschiebungsmessungen exemplarisch für den Endaushubzustand aufgetragen.

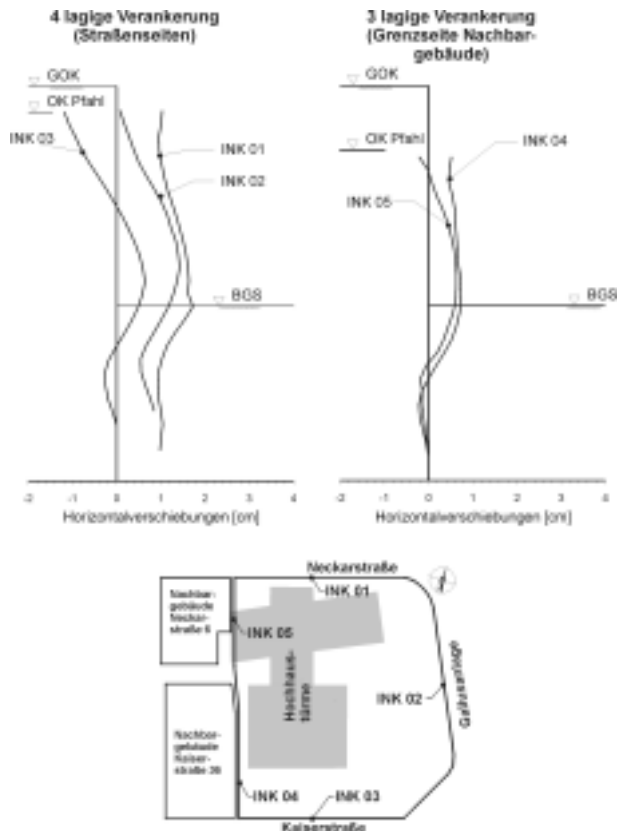


BILD 8 HORIZONTALVERSCHIEBUNGEN DES VERBAUS IM ENDAUSHUBZUSTAND

In den straßenseitigen, 4lagig rückverankerten Verbaubereichen wurden maximale Horizontalverschiebungen von 0,6 cm (INK 03) bis 1,7 cm (INK 01) in Richtung Baugrube gemessen. Der entlang der Grenze zur Nachbarbebauung 3lagig verankerte Verbau verschob sich in den Messschnitten um max. 0,7 cm in Richtung Baugrube. Verschiebungen des Verbaufußes sind den Messungen zufolge nur an den Baugrubenseiten Neckarstraße und Gallusanlage aufgetreten.

Im Vergleich zu den Verschiebungen, die bei früheren Baugruben im Frankfurter Ton mit vergleichbaren Verbausystemen und Aushubtiefen beobachtet wurden, sind die o.g. Messwerte als außerordentlich gering anzusehen. Das Verhältnis der maximalen Horizontalverschiebung ($\delta_H = 1,7 \text{ cm}$) zur Baugrubentiefe ($H = 18 \text{ m}$) liegt mit weniger als 0,1 % in einer Größenordnung, die im Frankfurter Ton in der Regel nur bei Bohrpfahlwänden mit innenliegender Aussteifung erreicht wird (vgl. [5]).

6.4 ANKERKRÄFTE

Die in der Verbaustatik ermittelten Gebrauchskräfte der Verpressanker erreichten Werte bis zu ca. 450 kN. Diese Werte wurden unter Zugrundelegung der vorliegenden Erfahrungen mit Verpressankern im Frankfurter Ton als obere Grenze angesehen. Zur Überprüfung, ob die planmäßigen Ankerkräfte zu realisieren sind, wurden im Zuge der Ausführung an 6 der hoch belasteten Anker Eignungsprüfungen durchgeführt. Die Eignungsprüfungen wie auch die Abnahmeprüfungen verliefen durchweg positiv.

Um eine über die Eignungs- und Abnahmeprüfungen hinausgehende Kontrolle der Ankerkräfte und ihrer Entwicklung mit dem Aushubfortschritt zu ermöglichen, wurden in einzelnen Bereichen des Verbaus spezielle Ankerköpfe vorgesehen, die die Durchführung von Abhebeversuchen ermöglichten. In Bild 9 werden die im Endaushubzustand gemessenen Ankerkräfte den ursprünglichen Vorspannkräften gegenübergestellt.

Die Diagramme zeigen die auch in den Zwischenaushubzuständen festgestellte Tendenz, dass mit dem Aushubfortschritt eine Reduzierung der Ankerkräfte auftrat. Die im Endaushubzustand gemessene Ankerkraftabnahme betrug bezogen auf die Festlegelasten zwischen 7 % und 27 %.

Die festgestellten Abnahmen resultieren vermutlich aus dem Anspannen der benachbarten und tieferliegenden Anker und aus dem zeitverzögerten Verformungsverhalten des Frankfurter Tons, das u.a. zu Spannungumlagerungen in die massiven Kalksteinbänke geführt haben könnte.

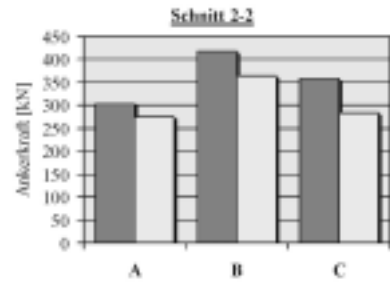
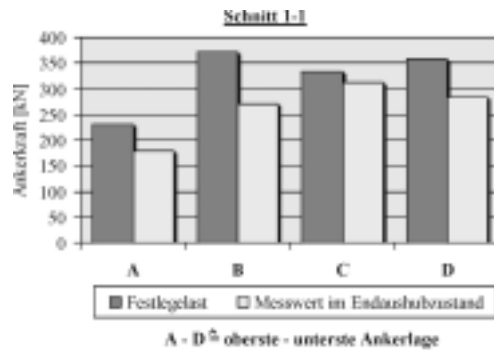


BILD 9 VORSPANNKRÄFTE UND IM ENDAUSHUBZUSTAND GEMESSENE ANKERKRÄFTE

7 GEGENÜBERSTELLUNG MESSUNG - PROGNOSE

Im Folgenden werden die im Endaushubzustand gemessenen Porenwasserdrücke und Horizontalverschiebungen des Verbaus mit den prognostizierten Werten verglichen.

7.1 PORENWASSERDRÜCKE

In Bild 10 sind die Messwerte aller Porenwasserdruckgeber sowie der in der Verbaustatik angesetzte, idealisierte Wasserdruckverlauf in einem Prinzipschnitt des Verbaus grafisch dargestellt.

Die Darstellung verdeutlicht, dass der in der Planung angenommene Wasserdruckverlauf durch die Messwerte generell unterschritten wurde. Die getroffenen Annahmen zum Wasserdruck lagen somit unverkennbar auf der sicheren Seite. Ursache für die rechnerische Überschätzung des erdseitigen Wasserdruckes könnten u.a. die in Kap. 6.2 beschriebenen Einflüsse der Ankerbohrungen sein, die in der numerischen Strömungssimulation nicht berücksichtigt wurden.



BILD 10 WASSERDRUCKVERLAUF, VERGLEICH ZWISCHEN PROGNOSE UND MESSUNG

7.2 HORIZONTALVERSCHIEBUNGEN DER VERBAUWAND

Die gemessenen und prognostizierten Horizontalverschiebungen des Verbaus sind in den nachfolgenden Diagrammen für den Endaushubzustand dargestellt.

Für den straßenseitigen, 4lagig rückverankerten Verbau liegen die prognostizierten Werte weitgehend innerhalb der Bandbreite, die sich aus den Messwerten ergibt. Die maximale Verschiebung, die in der auf dränen basierenden Berechnung ermittelt wurde, wird lediglich an dem Messschnitt Neckarstraße annähernd erreicht.

An der Seite der unmittelbar angrenzenden Nachbargebäude werden die prognostizierten Horizontalverschiebungen durch die Messwerte deutlich unterschritten. Die nach den Prognosen hier anzunehmende Verschiebung des Verbaufußes wird durch die Messwerte nicht bestätigt. Die hier festgestellten Differenzen zwischen Messung und Prognose sind vermutlich teilweise auf die Anordnung der Inklinometer in der Nähe der vergleichsweise steifen Verbauecken zurückzuführen sein. Diese Anordnung ergab sich aus der Zielsetzung, die Verbauecken möglichst im unmittelbaren Bereich der verformungsempfindlichen Nachbarbauwerke zu beobachten. In der vertikal-ebenen Modellierung des Verbaus wird demgegenüber theoretisch ein unendlich ausgedehnter Verbaustreifen abgebildet, so dass die aussteifende Wirkung der Verbaueckenbereiche rechnerisch vernachlässigt wurden.

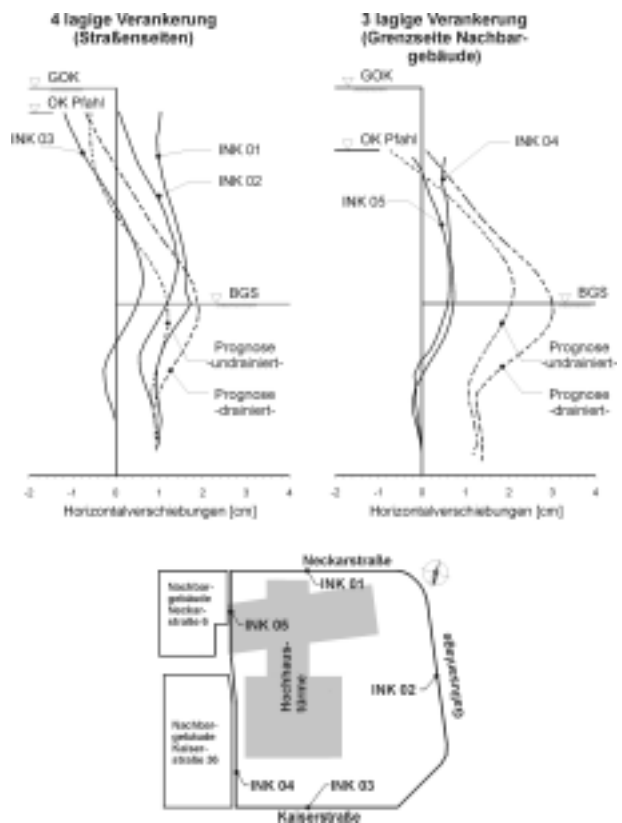


BILD 11 PROGNOSTIZIERTE UND GEMESSENE HORIZONTALVERSCHIEBUNGEN DER VERBAUWAND

8 AUSBLICK

Für die Planung der Baugrube Gallileo wurden innovative Ansätze zur Bemessung und Ausführung der Baugrubenumschließung angewandt. Die aus den baubegleitenden Messungen gewonnenen Werte bestätigen, dass die wirtschaftlichen und technischen Ziele des Verbaueckkonzeptes erreicht werden konnten:

- Die Verformungen des Verbaus konnten auf ein außerordentlich geringes Maß begrenzt werden.
- Die planmäßige Reduzierung des Wasserdrucks wurde erreicht, wobei die umweltrechtliche Forderung, den oberflächennahen Grundwasserhaushalt zu schonen, eingehalten werden konnte.

Die mit der Baugrube des Hochhauses Gallileo gewonnenen Erfahrungen werden derzeit in der Planung der Baugrube eines aktuellen Hochhausprojektes in Frankfurt am Main verwertet. Im Rahmen des Projektes Urban Entertainment Center sollen 2 Hochhäuser und mehrere Flachbauwerke auf einem ca. 50000 m² Grundstück nahe des Messeturms errichtet werden.

Für die Baugrube haben sich Krebs und Kiefer als Planer und Arcadis als Baugrund- und Gründungsberater aufgrund der positiven Erfahrungen bei der Baugrube Gallileo für ein ähnliches Baugrubenkonzepthes entschieden. Die Baugrube des Urban Entertainment Centers wird ca. 19 m tief in den Frankfurter Ton einbinden.

Das nachfolgende Bild zeigt einen Schnitt durch die in der ersten Bauphase vorgesehene Bebauung, die wie das Hochhaus Gallileo auf einer Kombinierte Pfahl-Plattengründung abgesetzt werden soll.

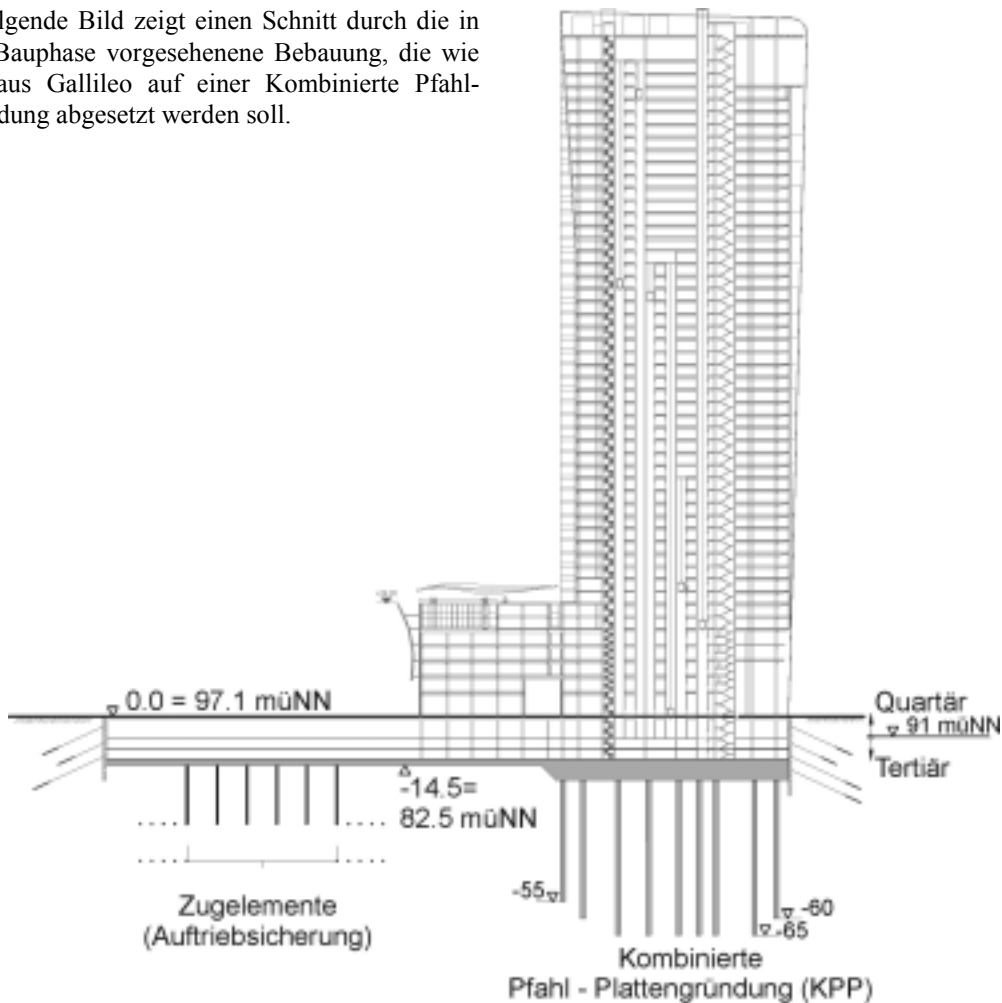


BILD 12 DAS URBAN ENTERTAINMENT CENTER IN FRANKFURT AM MAIN

9 REFERENZEN

- [1] Steiger H., Pitteloud L.: Neue Entwicklung für die Optimierung der Bemessung von tiefen Baugruben in Frankfurt am Main. 8. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 55, 81-98, 2001-10-28
- [2] Pitteloud L., Steiger H.: Hochhaus Gallileo – Tiefe Baugrube mit Reduktion des Wasserdrucks im Frankfurter Ton. Beratende Ingenieure 7/8, Springer-VDI-Verlag, 2001, Düsseldorf
- [3] Plaxis Finite Element Code for soil and rock analyses, Version 7, Manuals, Balkema-Verlag, 1998
- [4] El-Mossallamy, Y.: Performance of deep excavation in overconsolidated clay, measurements and numerical analysis. The 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, January 7 – 12, 2001, Arizona
- [5] Moormann, Chr., Katzenbach, R.: Entwurfsoptimierung von tiefen, wasserdichten Baugruben bei anisotropen Baugrund- und Grundwasserverhältnissen, 26. Baugrundtagung, 2000, Hannover, 15-32