

Komplexe Baugrund- und Grundwasserverhältnisse beim Stadtarchiv Köln

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Direktor des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt

Dr.-Ing. Matthias Vogler

Geschäftsführender Gesellschafter der Ingenieursozietät Prof. Katzenbach

Dipl.-Ing. Alexandra Weidle

Projektleiterin am Institut für Geotechnik der TU Darmstadt

1. Einführung

Mit dem Bau der rd. 4 km langen, größtenteils unterirdisch geführten Nord-Süd Stadtbahn Köln zwischen der Haltestelle Breslauer Platz im Norden und der Haltestelle Marktstraße im Süden werden die Kölner Innenstadt und die Südstadt auf dem Schienenweg erschlossen (Bild 1). Bauherrin sind die Kölner Verkehrs-Betriebe AG (kurz: KVB). Die Bauarbeiten für die in die Lose Nord und Süd unterteilte Strecke wurden im Jahr 2004 begonnen.



Bild 1: Trassenplan der Nord-Süd Stadtbahn Köln (aus: Bauportal 12/2009)

Zwischen den Haltestellen Heumarkt und Severinstraße wird am Waidmarkt ein Gleiswechselbauwerk errichtet, das den Wechsel der Züge von einer in die andere Tunnelröhre ermöglichen wird. Die Baugrube für das Gleiswechselbauwerk Waidmarkt besitzt einen Z-förmigen Grundriss mit einer Grundfläche von rund 900 m² (Bild 2). Aufgrund der beengten Platzverhältnisse befindet sich die Verbauwand nur 3 m neben dem Stadtarchiv Köln.

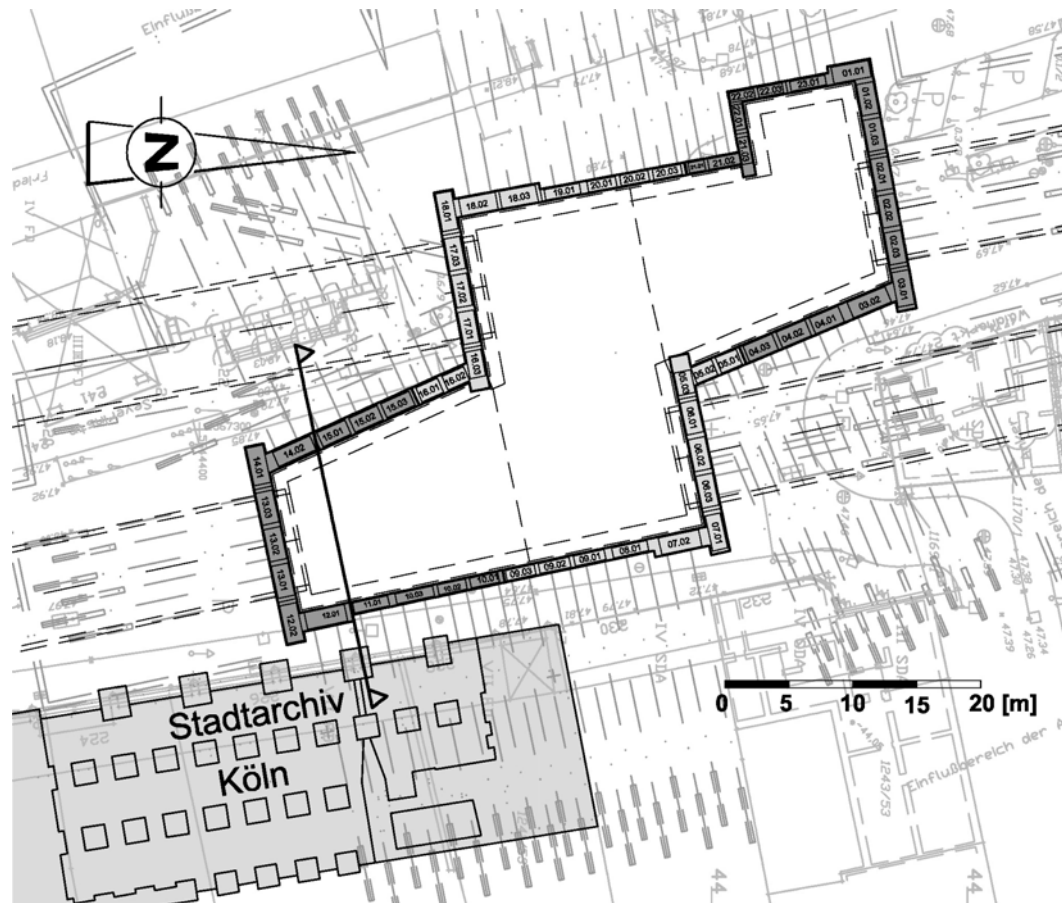


Bild 2: Grundriss der Baugrube Waidmarkt mit Stadtarchiv Köln

Im Jahr 2006 erfolgte die Durchfahrt der Tunnelbohrmaschinen durch die zuvor hergestellten und in diesem Bereich glasfaserbewehrten, 1,5 m dicken Schlitzwände. Zu Beginn des Jahres 2008 wurde mit den weiteren Arbeiten an der Baugrube begonnen. Sukzessive wurden im Zuge des Aushubs zunächst eine Ankerlage, dann in Deckelbauweise der 1,8 m dicke aussteifende Deckel sowie die 0,65 m dicke so genannte Zwischendecke hergestellt (Bild 3). Das Endaushubniveau der Baugrube liegt zwischen 21,34 mNN im Süden und 19,70 mNN im Norden, d.h. bis rund 28 m tief unter der Geländeoberfläche.



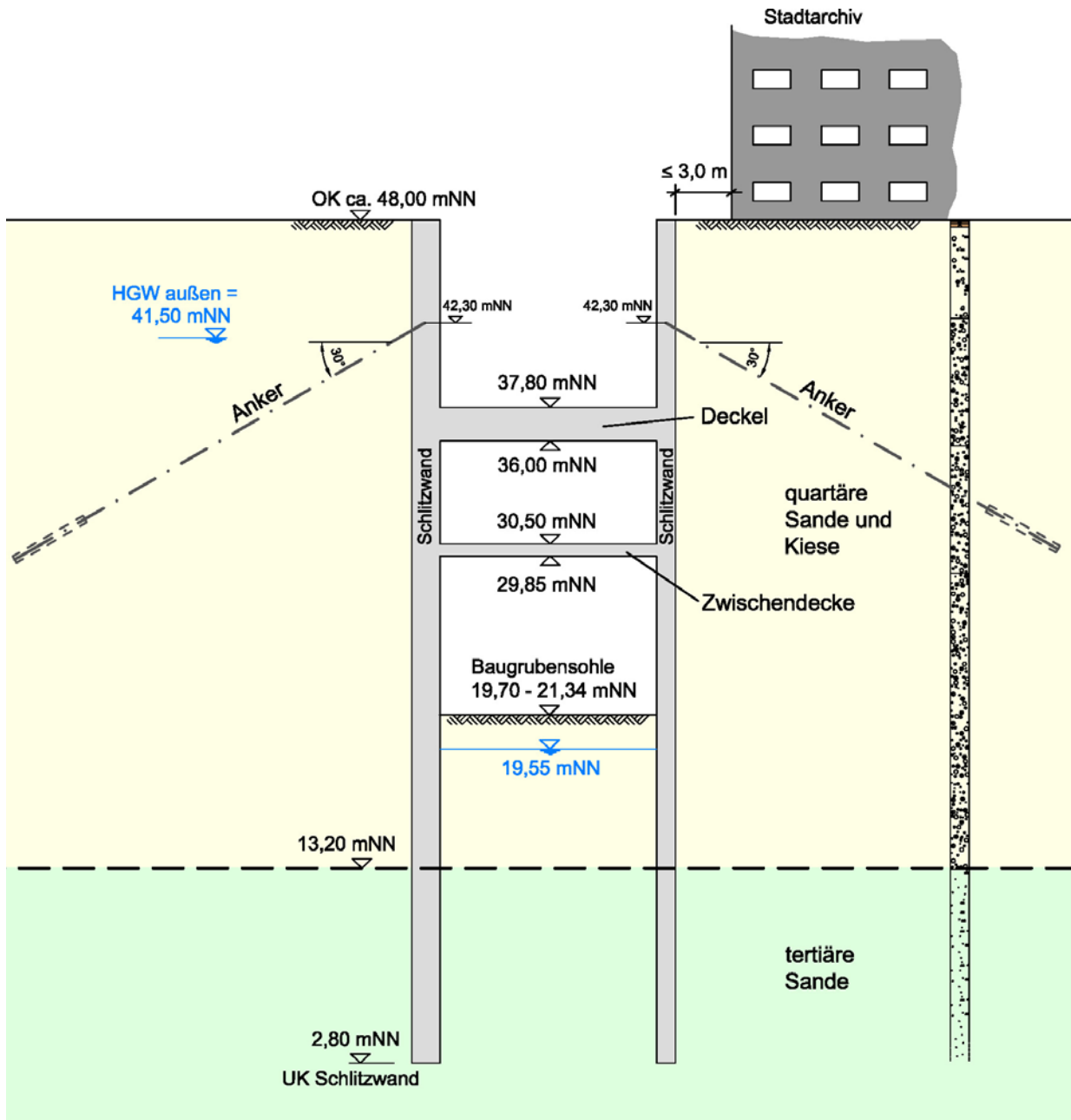


Bild 3: Schnitt durch die Baugrube Waidmarkt am Stadtarchiv Köln (Baugrunddarstellung gemäß Ausschreibungsunterlagen)

2. Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse für das gesamte Projektgebiet der Nord-Süd Stadtbahn Köln wurden in mehreren Phasen erkundet und sind in den Ausschreibungsunterlagen dokumentiert.

Im Bereich des Stadtarchivs liegt die Geländeoberfläche bei rund 48 mNN. Die anthropogenen Auffüllungen mit einer Dicke von rund 5 m bis 7 m werden unterlagert von den quartären Rheinablagerungen, einer Schichtenfolge aus Sanden, Kiessanden und Kies. Die für die quartären Sande und Kiese typischen, unregelmäßig auftretenden Stein- und Blockeinlagerungen wurden auch in den Bohrungen im Projektgebiet dokumentiert.

Für die Baugrube Waidmarkt wurde der Übergang zwischen den quartären Sanden und Kiesen und den tertiären Sanden in einer Tiefe von rund 34,8 m unter der Geländeoberfläche erkundet. Das Tertiär ist als sehr schwach schluffiger, (schwach) feinsandiger Mittelsand angesprochen worden.

Aufgrund der Nähe zum Rhein kommuniziert das Grundwasser am Stadtarchiv direkt mit dem Rheinwasserstand. Folgende Grundwasserstände sind daher laut Ausschreibung zu berücksichtigen:

Mittlerer (bauzeitlicher) Grundwasserstand	MGW:	+ 38,0 mNN
Bemessungswasserstand (3-5-jährlich)	HGW:	+ 41,5 mNN

Die quartären Sande und Kiese sind nach den Beschreibungen in den Ausschreibungsunterlagen der so genannte Hauptgrundwasserleiter und besitzen eine horizontale Durchlässigkeit von 6×10^{-3} m/s.

Für die tertiären Sande wurde in dem den Ausschreibungsunterlagen beiliegenden Baugrundgutachten die Durchlässigkeit für hydraulische Berechnungen mit 1×10^{-5} m/s angegeben.

3. Konzept der Tertiärbaugrube

Entsprechend dem Konzept des Ausschreibungsentwurfes wurde die bis zu 28 m tiefe Baugrube als so genannte Tertiärbaugrube mit Schlitzwänden, die bis in die tertiären Sande einbinden, hergestellt. Die Baugrubenkennzahl beträgt

$$T_{BK} = \frac{H_{res}}{E_s} * 100 = 0,88 \text{ m}$$

mit

- T_{BK} : Baugrubenkennzahl [m]
- H_{res} : Resultierende horizontale Belastung auf die Verbauwand (aktive Seite bis zur Baugrubensohle inkl. Wasserlast) [MN/m]
- E_s : Steifemodul des Bodens [MN/m²]

Damit ist die Baugrube mit $T_{BK} = 0,88 \text{ m} > 0,4 \text{ m}$ in die geotechnische Kategorie GK3 nach DIN 1054 einzustufen (Katzenbach et al., 2006).

Die nach den Ausschreibungsunterlagen im Vergleich zu den quartären Sanden und Kiesen vergleichsweise geringdurchlässigen tertiären Sande sollten hier als natürliche Abdichtung dienen, so dass der aus der Absenkung des Grundwassers in der Baugrube erzeugte Potenzialunterschied vollständig in den tertiären Sanden abgebaut werden sollte (vgl. Bild 4).

Im Vergleich zu den Angaben in den Ausschreibungsunterlagen, die eine Einbindung der Schlitzwand ins Tertiär von mindestens 2 m vorsah, war zur Einhaltung des Nachweises der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch eine deutlich größere Einbindung der Schlitzwand in die tertiären Sande erforderlich. Im mittleren, breiten Bereich der Baugrube musste daher die Schlitzwand rund 7 m tief, d.h. bis 6,25 mNN in die tertiären Sande geführt werden, in den Eckbereichen war eine Einbindung von 10,40 m, d.h. bis 2,80 mNN in die tertiären Sande erforderlich. Zur zusätzlichen Druckentlastung wurden in den Eckbereichen insgesamt vier Entspannungsbohrungen (Durchmesser 900 mm) bis Schlitzwandunterkante angeordnet.

Wie in der Ausschreibung vorgesehen, sollte das in die Baugrube einströmende Restwasser mittels Brunnen aus den quartären Sanden und Kiesen abgepumpt werden. Dafür wurden die vier Quartärbrunnen B1 bis B4 mit Durchmesser 900 mm projektiert. In Bild 5 sind die Schlitzwand sowie die ursprünglich geplanten Brunnen und Entspannungsbohrungen im Grundriss dargestellt.

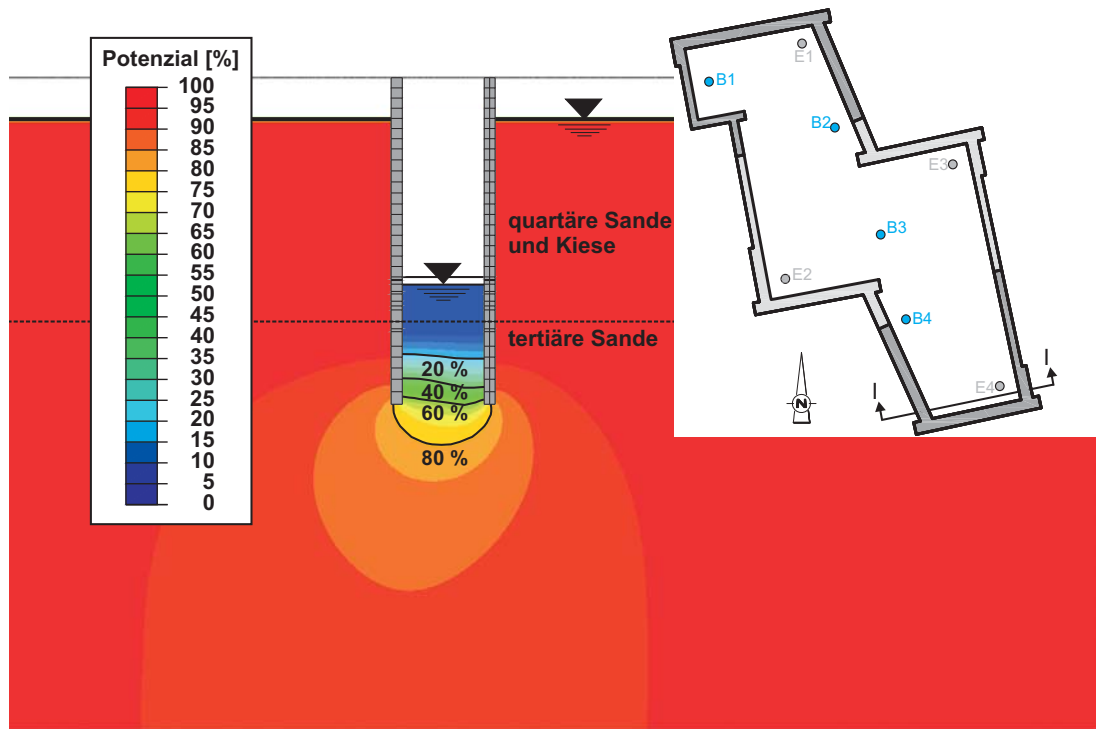


Bild 4: Ergebnis der eigenen hydraulischen Berechnungen zum Potenzialabbau in den tertiären Sanden infolge Grundwasserabsenkung in der Baugrube

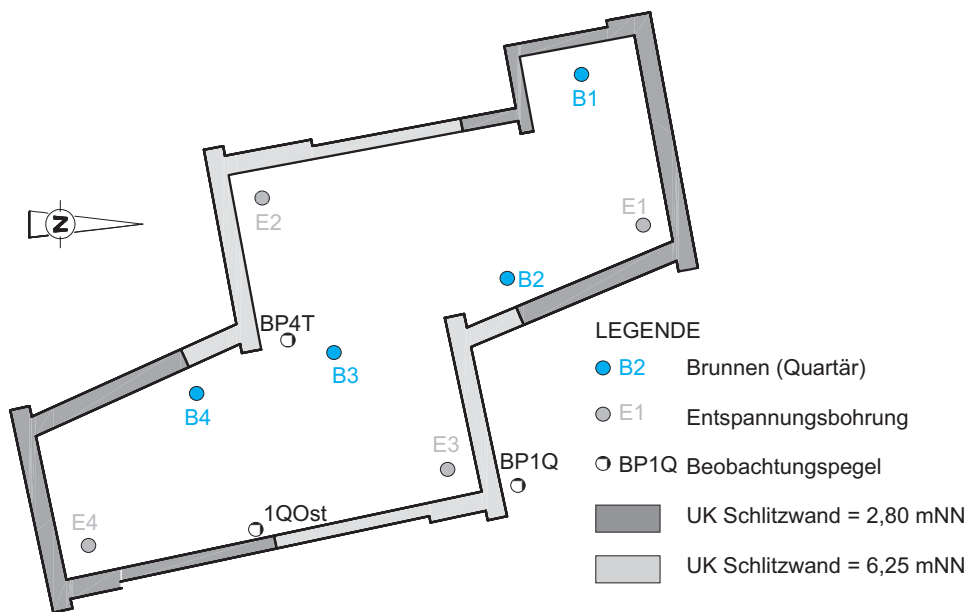


Bild 5: Konzept der Wasserhaltung gem. Ausführungsplanung inkl. beispielhaft ausgewählter Beobachtungspegel

4. Bauausführung

Bei der Herstellung der Schlitzwände wurde neben den quartären Sanden und Kiesen der Rheinablagerungen und den tertiären Sanden auch Braunkohle aufgeschlossen, die in den Ausschreibungsunterlagen nicht ausgewiesen war, weil sie in den auf dem Baufeld durchgeführten Erkundungen nicht angetroffen worden war.

Im Zuge des Aushubs sind mit der in der Baugrube installierten Wasserhaltungsanlage, die als Entspannungswasserhaltung konzipiert war, bei einer Wasserspiegeldifferenz von bis zu 16 m mit mehr als 300 m³/h unerwartet große Grundwassermengen gefördert worden. In Bild 6 sind sowohl die Förderraten als auch die Absenkung als Wasserspiegeldifferenz zwischen dem Grundwasserstand außerhalb und innerhalb der Baugrube dargestellt.

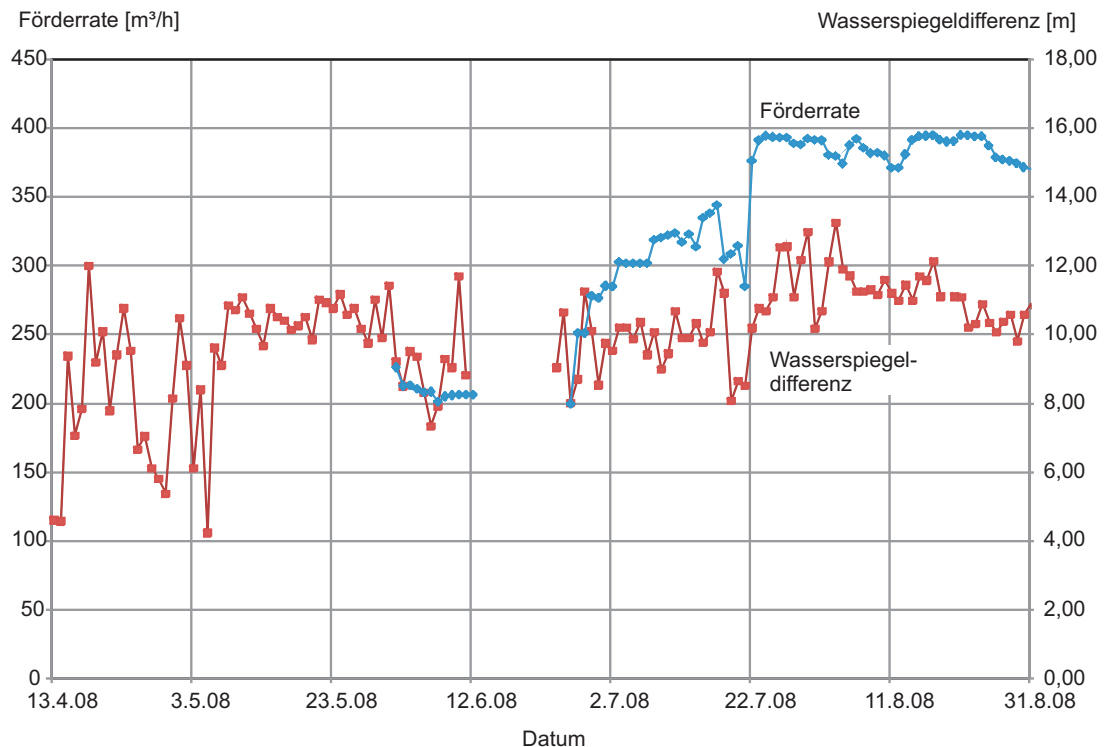


Bild 6: Förderrate und Wasserspiegeldifferenz zwischen Grundwasserspiegel außerhalb und innerhalb der Baugrube während der Aushubarbeiten



Mit der installierten Wasserhaltungsanlage ist es wegen des unerwartet großen Wasserandrangs nicht gelungen, das Grundwasser innerhalb der Baugrube bis unter die Baugrubensohle abzusenken, obwohl – in Ergänzung zur ursprünglichen Planung – bereits die sechs zusätzlichen Brunnen ZB1 bis ZB6 im Quartär innerhalb der Baugrube nachträglich installiert worden waren.

Aus den im Sinne der Beobachtungsmethode nach DIN 1054 (2005) Abs. 4.5 durchgeführten Kontrollmessungen ergab sich, dass der dem Konzept der Tertiärbaugrube zugrunde liegende, vollständige Potenzialabbau in den tertiären Sanden nicht erreicht worden ist.

Da der Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen der Baugrubensohle mit der vorhandenen Wasserhaltungsanlage nicht zu erbringen war, war eine Fortschreibung des Konzeptes der Wasserhaltung unter Berücksichtigung der baustatischen Anforderungen des bereits fertiggestellten Deckels und der Zwischendecke erforderlich. Von September bis Dezember 2008 wurden daher insgesamt 13 zusätzliche Brunnen mit Filterstrecken in den tertiären Sanden zur Druckentlastung installiert (Bild 7).

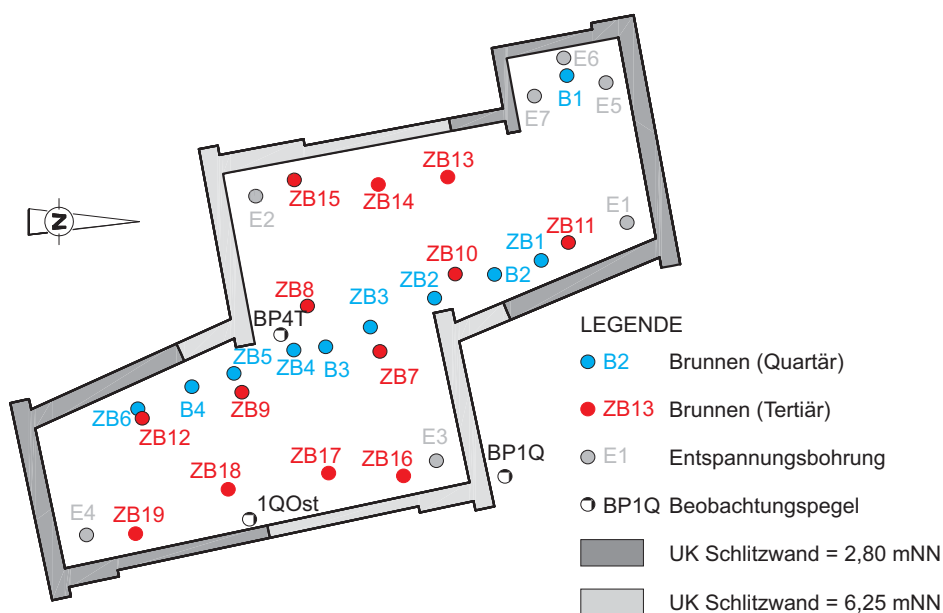


Bild 7: Wasserhaltungsanlage mit zusätzlichen Brunnen zur Reduzierung des Wasserdruckes unterhalb der abdichtenden Braunkohleschicht inkl. beispielhaft ausgewählter Beobachtungspegel

In Bild 8 ist deutlich die Reduzierung des Wasserdruckes im Tertiärpegel BP4T durch die zusätzlichen Brunnen ab Ende September 2008 erkennbar. Gleichzeitig konnte der Wasserspiegel in der Baugrube in den quartären Sanden und Kiesen auf das geforderte Absenksziel von 19,55 mNN abgesenkt werden. Die Förderrate wurde durch die zusätzlichen Brunnen insgesamt auf im Mittel rund 650 m³/h erhöht.

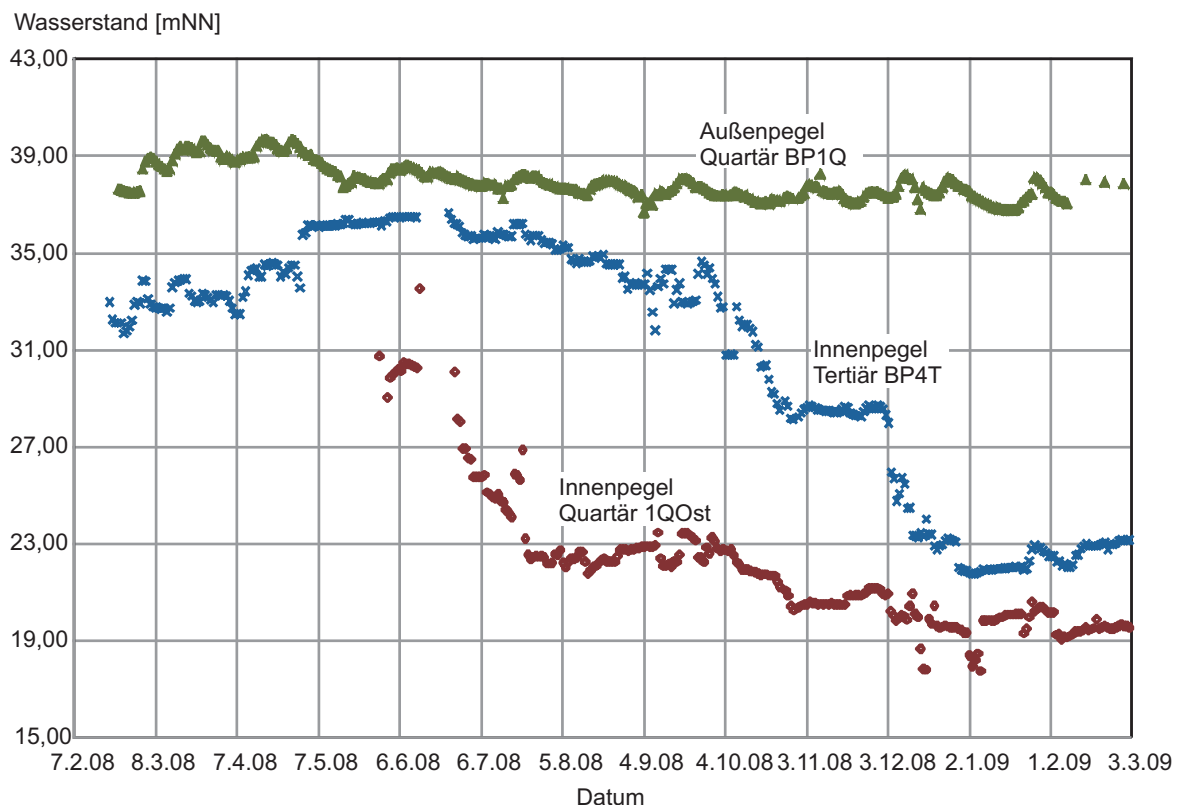


Bild 8: Grundwasserganglinien Baugrube Waidmarkt

5. Einsturz des Stadtarchivs Köln

Am 03.03.2009 kam es bei Erreichen des Endaushubniveaus zu einer Havarie in Form eines plötzlichen Wasser- und Bodeneinbruchs im süd-östlichen Teil der Baugrube und zu einem trichterförmigen Bodeneinbruch hinter der Schlitzwand im Bereich des dortigen Stadtarchivs, das vollständig einstürzte. Zwei Anwohner benachbarter Häuser verloren dabei auf tragische Weise ihr Leben, alle anderen Anwohner sowie die Besucher bzw. die Bediensteten des Stadtarchivs konnten durch das umsichtige Verhalten der Baustellenmannschaft im letzten Moment gewarnt und dadurch gerettet werden.

Bei dem Schadensereignis wurden rund 10.000 Tonnen Bodenmaterial in 10 bis 15 Minuten in die Baugrube hineingespült. Die Ursache, warum es zu dem Wasser- und Bodeneinbruch gekommen ist, ist bis heute nicht bekannt und wird durch umfangreiche Untersuchungen erkundet.

6. Ursachenanalyse

Im Zuge der Ursachenanalyse wird die Baugrube seit der Havarie quasi als großmaßstäblicher Geotechnik-Versuchsstand genutzt. Eine Vielzahl der Brunnen innerhalb der Baugrube wird als Beobachtungspegel zur Dokumentation und Analyse der Grundwassersituation genutzt, was möglich ist, weil die Brunnen seit der Havarie nicht mehr in Betrieb sind. Diese seit der Havarie durchgeführten Messungen zeigen, dass die Braunkohleschicht nahezu vollflächig im Bereich der Baugrube vorhanden ist. Lediglich im mittleren, östlichen Bereich der Baugrube um die Entspannungsbohrung E3 (Bild 5) befindet sich ein räumlich eng begrenztes Fenster in der ansonsten durchgängigen Braunkohleschicht. Die wie eine abdichtende Membran wirkende Braunkohleschicht sorgt dafür, dass unterhalb der Braunkohle noch ein Potenzial von 80 % bis 90 % vorhanden ist, wenn keine Brunnen in den tertiären Sanden in Betrieb sind.

Seit der Havarie wurden zur Gefahrenabwehr, zur Beweissicherung und für die in den kommenden Wochen abzuschließende Baumaßnahme zur Archivalienbergung (sog. Bergebaugrube) rund 300 Sondierungen mit der Schweren Rammsonde DPH, mehr als 10 Baugrundaufschlussbohrungen, rund 60 Pfahlbohrungen bis in die tertiären Sande, geohydraulische sowie geophysikalische und thermografische Untersuchungen des Baugrundes (und der Schlitzwand) im Bereich des Schadens durchgeführt.

Es hat sich damit nachträglich gezeigt, dass eine Braunkohleschicht nicht nur innerhalb der Baugrube sondern auch außerhalb großflächig vorhanden ist. Durch ihre abdichtende Wirkung trennt sie die beiden Schichtpakete der quartären Sande und Kiese und der tertiären Sande hydraulisch vollständig voneinander ab.

Durch die mit den Feldmessungen validierten numerischen Computer-Simulationsberechnungen am zeitvarianten dreidimensionalen Finite-Element-Modell der Baugrube und des umgebenden Baugrundes wurden und werden die komplexen Baugrund- und Grundwasserverhältnisse im Zuge der Ursachenanalyse untersucht.

Die im Rahmen der Ursachenanalyse durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die gemessenen Wasserdruckverhältnisse und Förderraten nur dann zutreffend nachvollzogen werden können, wenn

- die Braunkohleschicht als abdichtende Membran in den Berechnungen berücksichtigt wird und
- die tertiären Sande eine gegenüber den Angaben für hydraulische Berechnungen in den Ausschreibungsunterlagen um das 25-fache größere Durchlässigkeit

besitzen.

Diese beiden Sachverhalte, die abdichtende Wirkung der nahezu vollflächig vorhandenen Braunkohleschicht und die um das 25-fache größere Durchlässigkeit der tertiären Sande, zeigen im Nachhinein grundsätzlich andere hydrogeologische und hydromechanische Randbedingungen für die Errichtung der Baugrube als ursprünglich angenommen. Mit den sehr umfangreichen Untersuchungen sind nunmehr unerwartet komplexe Baugrund- und Grundwasserverhältnisse beim Stadtarchiv Köln festgestellt worden.

Ob sich weitere Annahmen und Randbedingungen aus der Entwurfs- und Ausschreibungsphase als nicht zutreffend erweisen, wird erst im Zuge der weiteren Erkundungen erkennbar werden. Dazu gehören auch alle aus dem Umfeld der Baugrube resultierenden Einflüsse aus den benachbarten Bauwerken bzw. der Vorgeschichte des Umfeldes.

Literatur

DIN 1054 (2005)

Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Beuth Verlag, Berlin.

Katzenbach, R., Weidle, A., Hoffmann, H., Vogler, M. (2006)

Beherrschung des Risikopotenzials Tiefer Baugruben im urbanen Umfeld – Aktuelle Szenarien. Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), 135-142.

