Zeitschrift: Tec21

Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Band: 132 (2006)

Heft: 41: Gefahrenmanagement

Artikel: Sicher bauen in unruhigem Grund: Geländesetzungen beim Ausbruch des unterirdischen Zwischenlagers für "Castor"-Behälter in Neckarwestheim (D)

Autor: Zurkirchen, René

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-107998

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 27.04.2025

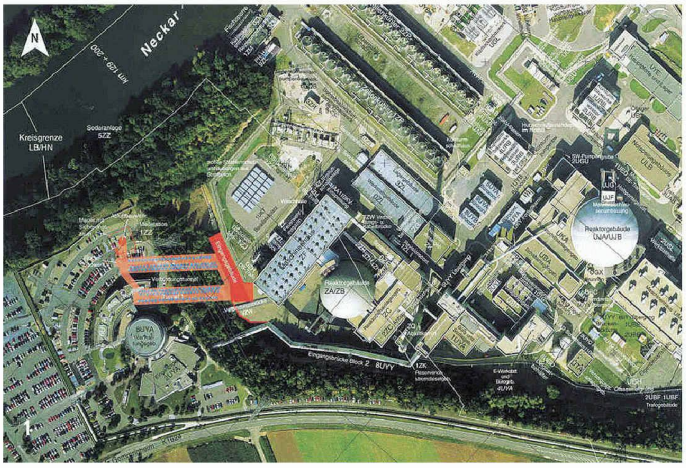
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

René Zurkirchen

Sicher bauen in unruhigem Grund

Geländesetzungen beim Ausbruch des unterirdischen Zwischenlagers für «Castor»-Behälter in Neckarwestheim (D)

Anspruchsvolle Baugrundverhältnisse, die unvorhersehbare Überraschungen für den Bauablauf zur Folge haben, treten nicht nur bei langen Tunnelbauten und Kavernen im Gebirge oder im städtischen Umfeld auf. Auch bei der Erstellung eines unterirdischen Zwischenlagers für nukleare Brennelemente in der sanften Hügellandschaft des Deutschen Neckartals erwiesen sich die auf engem Raum auftretenden geologischen Probleme als unerwartete, schliesslich aber beherrschbare Herausforderung für den Untertagebau.



Bis zur Inbetriebnahme von Bundesendlagern müssen in Deutschland gemäss revidiertem Atomgesetz abgebrannte Brennelemente von Kernkraftwerken am Standort zwischengelagert werden. Aus diesem Grund baut der Betreiber des Kernkraftwerks Neckarwestheim bei Stuttgart, die Energie Baden-Württemberg (EnBW), zurzeit ein unterirdisches Zwischenlager in Neckarwestheim. Die Brennelemente werden in den bekannten Transport- und Zwischenlagerbehältern des Typs «Castor» ins Zwischenlager übergeben.

Projektübersicht

Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse am Standort, an einem ehemaligen Steinbruch, wird für das Zwischenlager die unterirdische Bauweise gewählt (Bild 1). Der Komplex besteht aus einem Eingangsgebäude, zwei parallelen, unterirdischen Kavernen (Tunnel 1 und 2), die an ihrem Ende durch einen Quertunnel verbunden sind, sowie einem Abluft- und Fluchtbauwerk (Bilder 2 bis 4).

Das Eingangsgebäude ist vor der Steilwand des ehemaligen Steinbruches angeordnet. Es besteht aus dem Sozialtrakt, der Eingangshalle mit dem Behältervorbereitungsbereich und weiteren Räumen für Hilfsanlagen. Die groben Abmessungen des Eingangsgebäudes betragen 65 m in der Länge, 13 m in der Breite und 12 m bzw. 16 m in der Höhe.

Die beiden Lagerkavernen sind jeweils ca. 14 m breit, ca. 18 m hoch und ca. 90 m bzw. 82 m lang. Die Behälter werden in den beiden Kavernen auf 151 Stellplätzen aufbewahrt. Mit den Lagerkavernen wird das bestehende Verwaltungsgebäude unterfahren, welches oberhalb des Steinbruches, am Rand der Steilböschung, situiert ist.

Geologie

Der Untergrund im Bereich des Zwischenlagers besteht aus einer Lockergesteinszone, welche auf dem oberen Muschelkalk (Fels) aufliegt. Die Lockergesteinsüberdeckung ist ca. zwischen 14 m und 27 m mächtig. Die Schichtgrenze zwischen den beiden Zonen liegt im Bereich der Kavernen, in den oberen 10 Metern des Ausbruchprofils. Der überwiegende Teil der Lockergesteinszone wird durch Löss und Lösslehm gebildet. Es handelt sich dabei um durch Wind abgelagertes Material, welches relativ homogen als teilweise feinsandiger und überwiegend toniger Schluff ansteht. Das Material ist gemäss Prognose in der Regel als steif einzustufen. Infolge Kalkverkittung (höhere Festigkeit) ist es überwiegend als halbfest anzusprechen. Unterhalb der Löss-/Lösslehmschichten liegen Auensedimente, stärker tonige Schluffe und Tone. Diese weisen im Vergleich zum Löss und Lösslehm eine deutlich höhere Plastizität auf und sind durchweg mindestens halbfest bis fest. Teilweise befinden sich unter den Auensedimenten und über dem Muschelkalk Hochterrassen-Sande und/oder -Schotter.

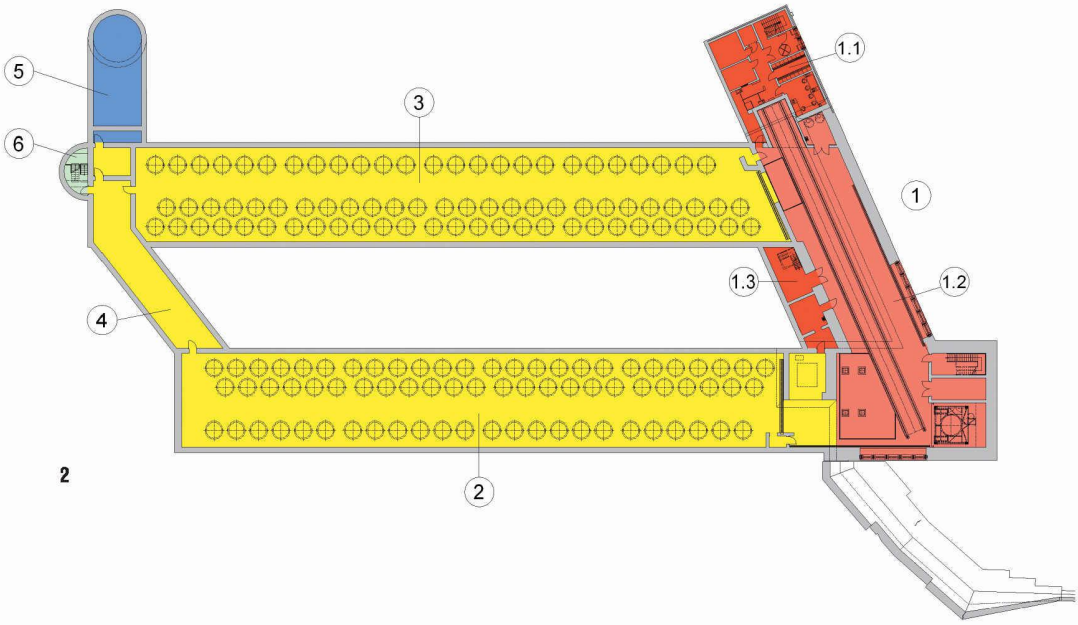
Innerhalb des Kavernenprofils besteht der Festgesteinsbereich ausschliesslich aus Oberem Muschelkalk als annähernd horizontal geschichtete Blau- und Trochitenkalke mit Zwischenschichten aus Tonmergel. Der Muschelkalk zeigt neben den horizontalen Schichtflächen ein ausgeprägtes Muster etwa vertikaler Trennflächen im Abstand von wenigen dm bis zu einigen m.

Vortriebskonzept und Vortriebsmethode

Das Zwischenlager wird von zwei Angriffsstellen aus gebaut. Der Vortrieb der beiden Lagerkavernen erfolgt,

1
Lageplan des Kernkraftwerks Neckarwestheim bei Stuttgart (D). Die Anordnung des im Bau begriffenen Zwischenlagers für «Castor»-Behälter ist rot eingezeichnet (Bilder: Gähler und Partner AG)

2
Situation GKN-Zwischenlager für «Castor»-Behälter, Mst. 1:1000
1 Eingangsgebäude, bestehend aus:
1.1 Sozialtrakt
1.2 Eingangshalle
1.3 Räume für Hilfsanlagen der Behälterreinigung
2 Tunnel 1
3 Tunnel 2
4 Verbindungstunnel
5 Abluftbauwerk
6 Fluchtbauwerk



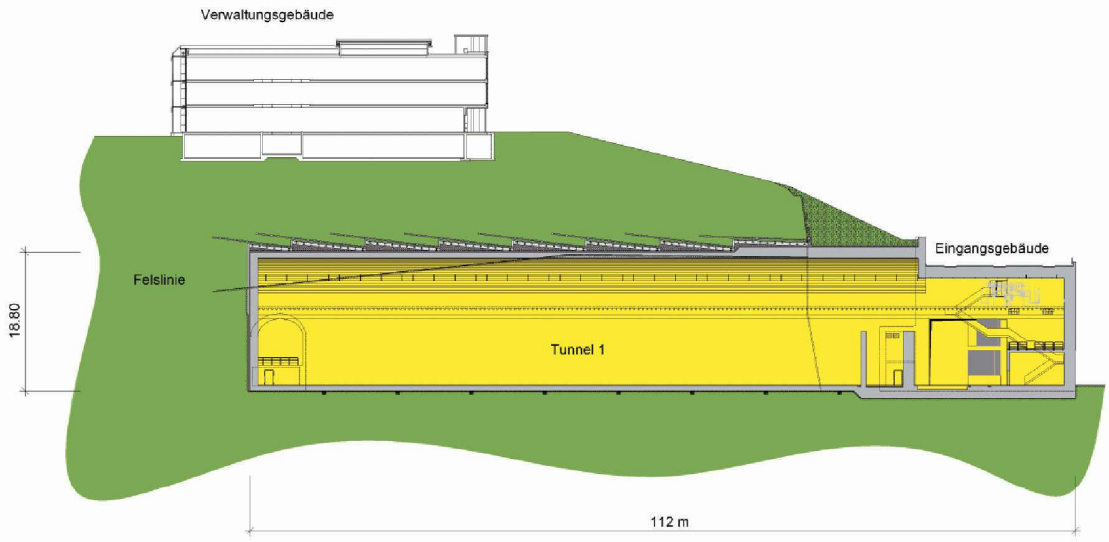
ausgehend vom unteren Kraftwerksbereich, aus einem vorgängig erstellten Voreinschnitt in der Steilwand des ehemaligen Steinbruches.
Auf dem Parkplatz vor dem Verwaltungsgebäude oberhalb der Steilwand werden der Abluftschacht und der Bauschacht abgeteuft. Der Abluftschacht hat einen Durchmesser von 8 m und wird später der Entlüftung der gesamten Anlage dienen. Im Bereich des späteren Fluchtbauwerkes wird der Bauschacht mit einem Durchmesser von ca. 20 m abgeteuft. Dieser ermöglicht den Einbau der Verkleidung im Verschneidungsbereich von Lagerkaverne, Flucht- und Abluftbauwerk.

Bauschacht

Aufgrund der örtlichen Liegenschaftsverhältnisse ist es nicht möglich, den Schacht kreisrund auszubilden. Weil der Bauschacht bis zur Verschneidung mit der Lagerkaverne im Lockergestein liegt, hat dies eine aufwändige Sicherung zur Folge (Bild 5).
Vorgängig zum Ausbruch werden bis zu 24 m lange, 1 m dicke bewehrte Bohrpfähle erstellt, die in den Fels eingebunden sind. Die Räume zwischen den Pfählen werden während des absenkenden Aushubs mit Spritzbeton ausgefacht. Auf verschiedenen Aushubkoten werden Riegel zur Stützung der Bohrpfähle eingebaut. Diese werden als Stahl-Beton-Verbundträger ausgebildet, wobei auf der abgeflachten Schachtseite HEM 500 als Stahlprofile versetzt werden. Die untersten Betonriegel auf Höhe der Pfahlfüsse können wegen der in den Bauschacht einmündenden Kalottenvortriebe der Lagerkavernen und des Ablufttunnels nicht mehr rundherum erstellt werden. Deshalb werden diese Teilriegel mittels temporärer Vorspannanker zurückgehalten.

Kalottenvortrieb

Der Ausbruch der Lagerkavernen wird unterteilt in einen Kalottenvortrieb (max. Höhe 10.35 m, max. Breite 20.80 m), welcher teilweise im Lockergestein und teilweise im Fels erfolgt, und einen Strossenabbau (Höhe 10.6 m, Breite 14.8 m), welcher vollständig im Fels liegt. Die Kalotte der nördlichen Kaverne mit Verbindung zum Bauschacht sowie die ersten 50 m der südlichen Kaverne werden im Vollausbruch aufgefahren (Bild 7). Um die Verformungen möglichst gering zu halten, wird ein dem Kalottenausbruch vorauseilender, gespreizter Rohrschirm in mehreren Etappen erstellt. Dieser Rohrschirm überbrückt als steifes Element den ungesicherten Bereich zwischen Ortsbrust und der bereits erstellten Spritzbetonschale. Die Rohre sind vor der Brust im noch nicht ausgebrochenen Material eingebunden und hinten auf der Spritzbetonschale abgestützt. Die Rohrlänge beträgt 15 m und die Überlappung der Rohre der einzelnen Etappen 5 m. Der Ausbruch im Schutze des Rohrschirms erfolgt in Etappen von 1 m. Die Sicherung besteht aus Stahleinbau mit HEB 240-Profilen (Abstand 1 m) und einem mit Matten bewehrten, 50 cm dicken Spritzbetongewölbe. Im Auflagerbereich wird die Schale auf eine Dicke von 1 m aufgeweitet und mit einer kräftigen Längsbewehrung sowie Stahlankern verstärkt. Das Kalottenauflager befindet sich stets im Fels.
Um ein Ausbrechen des Lockermaterials aus der Ortsbrust zu verhindern und um die Verformungen der Ortsbrust gegen den Hohlraum möglichst klein zu halten, ist eine systematische Brustsicherung mit 17 m langen, glasfaserverstärkten Kunststoffbündelankern (GFK) und 10 cm Stahlfaserspritzbeton vorgesehen. Die GFK-Bündelanker werden gleichzeitig mit den Rohrschirm-



3

etappen erstellt. Diese intensive Ortsbruststützung ist ein wichtiges Element zur Reduktion der Verformungen und damit der Setzungen an der Oberfläche. Die Anzahl der zu bohrenden Rohrschirm-Rohre wie auch die Anzahl der einzubringenden Brustanker pro Etappe variiert mit der Höhe der Felskote. Der Ausbruch erfolgt mit einem Hydraulikbagger, falls notwendig unter Zuhilfenahme eines Abbauhammers.

Strossenabbau

Nach dem Vortrieb der Kalotten und dem Abteufen der Schächte folgt der Strossenabbau des Gesamtbauwerkes. Beim Abbau der Strossen wird in einem ersten Arbeitsgang der Kern gelöst. Die zurückgelassenen Bermen stabilisieren derweil die Wände und erlauben einen zügigen Ausbruch ohne zusätzliche Sicherungsmassnahmen.

Die Profilierung der Wände erfolgt im Nachgang mit Öffnungsweiten von wenigen Metern, wobei die Sicherungsmittel bestehend aus Bewehrungsmatten, Spritzbeton und Ankern umgehend eingebaut werden. Im obersten Bereich der Strosse wird der Fels systematisch mit 3 Reihen SN-Ankern mit einer Länge von 6 m und einem Durchmesser von 63.5 mm gesichert. In den darunterliegenden Reihen sind die Anker noch 4 m lang, bei einem Durchmesser von 40 mm.

Zulässige Setzungen an der Terrain-Oberfläche

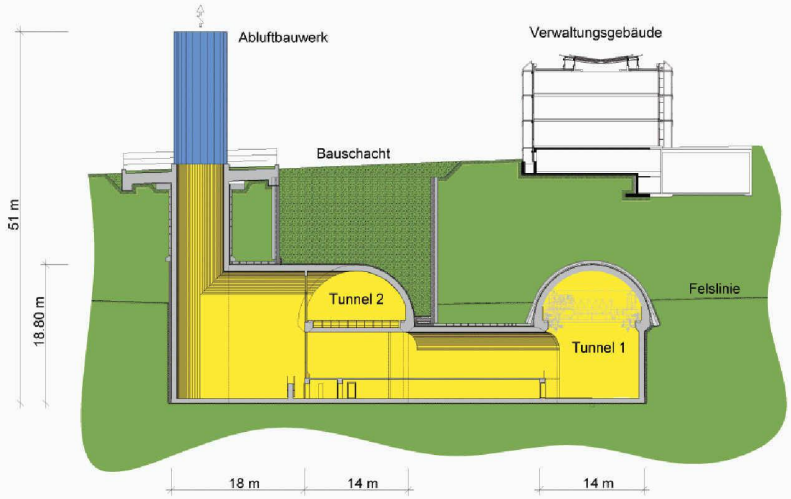
Mit der südlichen Lagerkaverne wird das Verwaltungsgebäude des Kernkraftwerkes unterfahren. Der Abstand zwischen Kalottenfirste und Sohlplatte des Stahlbetonbaus beträgt dabei 8 – 11 m. Setzungen an der Terrainoberfläche sind beim Ausbruch der Lagerkavernen nicht zu vermeiden. Sie sind jedoch derart zu begrenzen, dass das Verwaltungsgebäude und der nahe liegende Hochspannungsmast keine oder höchstens architektonische Schäden erleiden. Konstruktive Schäden sind auszuschliessen. Das Kriterium der Schadensbegrenzung an bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen ist in der Regel nicht das Totalmass der Setzungen, sondern die Differenzsetzungen. Diese verursachen unterschiedliche Verformungen in den Tragkonstruktionen, Leitungssystemen etc. und damit zusätzliche Zwängungskräfte. Die Differenzsetzungen werden durch die maximale Neigung der durch den Vortrieb der Kavernen erzeugten Setzungsmulde begrenzt (Winkelverdrehung).

Gemäss Kramer[1] halten sich die Schäden an Stahlbetonskelettkonstruktionen wie dem zu unterfahrenden Verwaltungsgebäude bis zu einer Winkelverdrehung von 1/250 in unbedenklichen Grenzen. Aus der dargestellten Kurve (Bild 9) wird deutlich, dass architektonische Schäden relativ kostengünstig behoben werden können. Wird die Grenze von etwa 1/250 bis 1/200 der Winkelverdrehung überschritten, steigen die Kosten sprunghaft an.

Mit dem für das Verwaltungsgebäude festgelegten maximal zulässigen Grenzwert von 1/300 für die Winkelverdrehung sind allenfalls geringfügige architektonische Schäden zu erwarten, und die Tragsicherheit ist gemäss durchgeführten Nachrechnungen jederzeit gewährleistet.

Zu erwartende Setzungen

Die zu erwartenden Setzungen an der Terrainoberfläche wurden mit FE-Modellen berechnet, aus denen die folgenden Erkenntnisse gewonnen wurden:



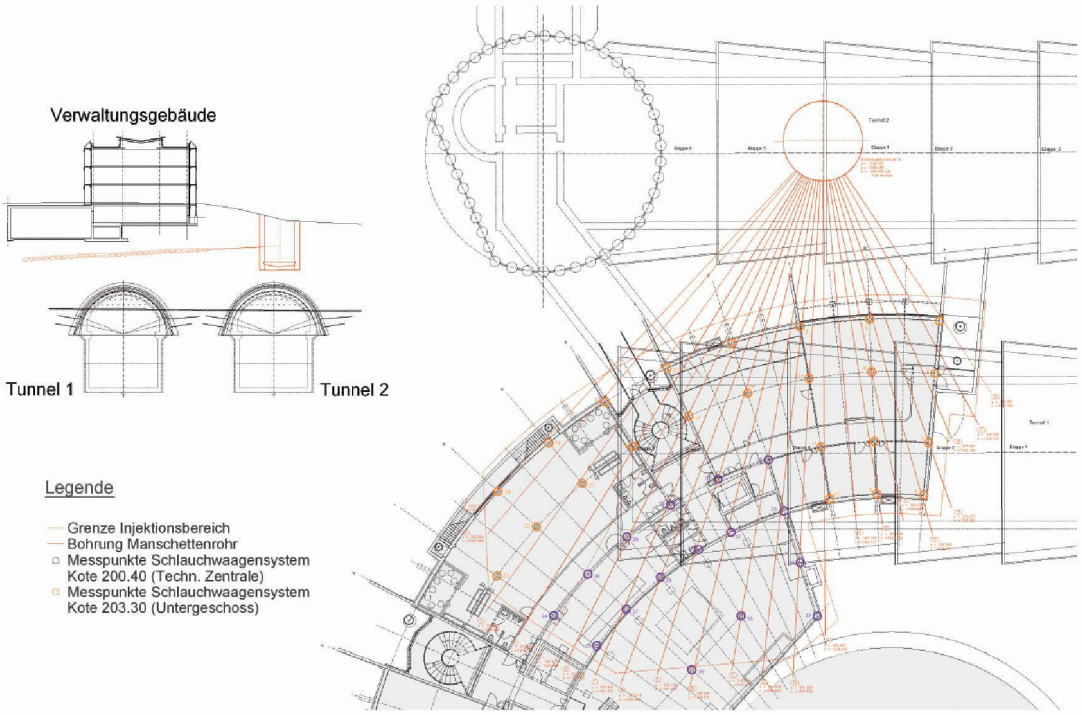
4

3
Längsschnitt des GKN-Zwischenlagers für «Castor»-Behälter, Mst. 1:1000
4
Querschnitt des GKN-Zwischenlagers für »Castor»-Behälter, Mst. 1:1000.
Blick vom Tunnelende in Richtung der Eingangshalle
5
Bauschacht, im Hintergrund das Verwaltungsgebäude

– Der grösste Teil der Verformungen während des Ausbruchs der Lagerkavernen tritt vorauseilend, d. h. vor Einbau der Ausbruchsicherung, in der Kalotte ein. Ist die Kalotte mit der sehr steifen Spritzbetonschale gesichert, nehmen die Terrainsetzungen nur noch geringfügig zu. Die Verformungen infolge Abtiefen der Strosse im Fels sind klein.
– Die auftretenden Verformungen bis zum Einbau des Kalottengewölbes hängen stark von den eingebauten Bauhilfsmassnahmen (Rohrschirmen und Ortsbrustankern) ab. Ein steifer Rohrschirm und eine massive Ankerung der Ortsbrust helfen, die vorauseilenden Verformungen auf ein zulässiges Mass zu minimieren. Das wesentliche Element zur Reduktion der Terrainsetzungen stellen die Ortsbrustanker zur Stützung der Ortsbrust bzw. zur Versteifung des Stützkerns dar.
– Die Ortsbrustankerung muss auf ca. 80 % der vorhandenen Primärspannungen ausgelegt werden, damit die Winkelverdrehungen des Verwaltungsgebäudes die zulässigen Werte mit einer gewissen Sicherheitsreserve nicht erreichen. Die so ermittelten Winkelverdrehungen des Verwaltungsgebäudes betragen dann maximal ca. 1 / 500 und der Absolutwert der maximalen Terrainsetzung ca. 4 cm.
Unter der Annahme einer Verbundspannung zwischen Ortsbrustanker und Baugrund wurde eine erforderliche Anzahl von 1 Anker pro m² Ortsbrustfläche ermittelt.

Erfahrungen während des Ausbruchs

Während der Vortrieb der nördlichen Lagerkaverne bis zum Bauschacht keine Probleme bereitet und die Einsenkungen der Terrainoberfläche über der Kaverne unter den Erwartungen bzw. den errechneten Werten liegen, muss der Kalottenvortrieb der südlichen Lagerkaverne nach 50 m, kurz vor der Unterfahrung des Verwaltungsgebäudes, vorübergehend eingestellt werden. Zu diesem Zeitpunkt fehlen noch 36 m bis zum Vortriebsende.
Der Grund für die Einstellung der Vortriebsarbeiten ist die rasche Zunahme der Setzungen des Verwaltungsgebäudes im Nahbereich der Lagerkaverne. Obwohl der Ausbruch der Kalotte noch vor dem Verwaltungsgebäude steht, hat sich der östlichste Teil des Gebäudes in wenigen Tagen um mehr als 2.5 cm gesenkt. Die Setzungen treten insbesondere auch beim Erstellen der vorauseilenden Bohrungen für den Rohrschirm, die Ortsbrustanker und die Sondenextensometermessungen auf. Weiter kann erstmalig beobachtet werden, dass die Bohrlöcher zum Teil nicht mehr standfest sind.
Unmittelbar nach Einstellung der Vortriebsarbeiten stabilisieren sich die Setzungen. Am Verwaltungsgebäude sind im Kellergeschoss die ersten architektonischen Schäden in Form von Rissen (Rissbreite max. 1 – 2 mm) in den nicht tragenden Wänden sowie harmlose Haarrisse in den Stahlbetonteilen des Tragwerkes zu verzeichnen. Gemäss zusätzlich durchgeführten Nivellementmessungen an der Kellerdecke sind die Winkelverdrehungen zu diesem Zeitpunkt an vier Stellen grösser als 1 / 500. Diese Verkippungswerte können die architektonischen Schäden erklären.
Während des Stillstands im Vortrieb der südlichen Lagerkaverne wird der Kalottenvortrieb der nördlichen Kaverne fortgeführt, ohne dass die Setzungen markant zunehmen. Dies obwohl der Vortrieb der nördlichen Kaverne weiter fortgeschritten ist und die Felskote dort eher tiefer liegt. Für dieses unterschiedliche Verhalten wird keine Erklärung gefunden.



6

Zwei Wochen nach Einstellung des Vortriebs werden die Arbeiten in der südlichen Lagerkaverne wieder aufgenommen und die restlichen Rohrschirmrohre sowie zusätzliche Ortsbrustanker gesetzt. Während dieser Bohrarbeiten nehmen die Setzungen erneut ausserordentlich rasch, innert einer Woche, um mehr als 1 cm, zu, so dass sich die südöstliche Gebäudedecke (grösste Einsenkung) total um fast 4 cm gesenkt hat. Damit ist der festgelegte Eingreifwert erreicht, und die Vortriebsarbeiten werden erneut eingestellt.

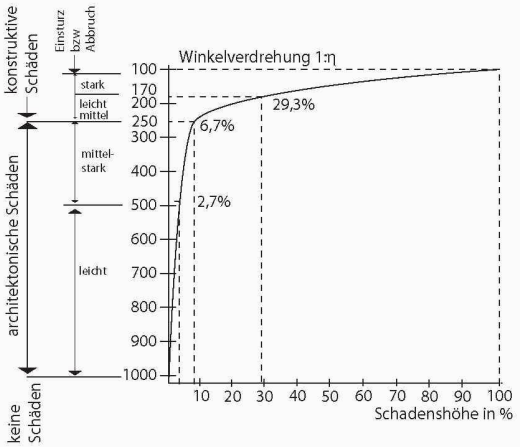
Mit weiteren Erkundungsbohrungen kann die beobachtete Anomalie im Baugrund teilweise aufgeklärt werden. Im Wesentlichen liegt die Ursache im um 2 – 5 % grösseren Wassergehalt und damit in der weicheren Konsistenz des Lösslehms unter dem Verwaltungsgebäude. Das Phänomen der sehr raschen Setzungszunahme in diesem undurchlässigen Baugrund, das im Widerspruch zur Konsolidationstheorie steht, wird von den am Projekt Beteiligten aber weiterhin nicht restlos verstanden. Klar ist jedoch, dass ohne zusätzliche Massnahmen beim weiteren Kalottenvortrieb der südlichen Lagerkaverne mit unzulässig hohen Setzungen bzw. Verkippungen des Verwaltungsgebäudes gerechnet werden muss. Die ergriffenen Zusatzmassnahmen sind konzeptionell so festgelegt worden, dass die Situation beherrscht wird, obwohl das Baugrundverhalten nicht vollständig erklärt werden konnte.

Ausgleichsinjektionen

Zum Ausgleich der unvermeidbaren Setzungen beim weiteren Vortrieb unter dem Verwaltungsgebäude werden Ausgleichsinjektionen im Soilfrac-Verfahren als baubegleitende Massnahme ausgeführt. Dabei wird eine feststoffreiche Bindemittelsuspension über Manschettenrohre in den Boden gepresst, der dadurch gezielt aufgesprengt wird. Hierbei bilden sich im Ausgangszustand eines normal konsolidierten Bodens zunächst vorwiegend vertikale Lamellen, die zu einer horizontalen Verspannung und Verdichtung im Boden führen. Mehrfache Nachverpressungen führen zu neuen Verästelungen und zu einem Anwachsen der Horizontal- und Vertikalspannungen. Im so vorbereiteten Boden können durch gezielt zugeführte Feststoffvolumen kontrollierte Bodenhebungen vorgenommen werden. Die Steuerung des Verfahrens erfolgt mit der Wahl der Injektionschargen (Druck, Menge, Anzahl Injektionsphasen), der örtlichen Verteilung der Injektionspunkte und der zeitlichen Abfolge in Kombination mit einer permanenten Messung der Reaktionen des Bodens bzw. des darüber befindlichen Verwaltungsgebäudes. Aufgrund der teilweise sehr weichen Bodenverhältnisse ist die Verwendung einer reinen Suspension problematisch, da diese unter dem hohen Verpressdruck Wasser abgibt, was sich negativ auf den anstehenden Baugrund auswirkt. Deshalb wird der Suspension ein mineralischer Beschleuniger zudosiert, der ihre Stabilität wesentlich erhöht.

Die Injektionsbohrungen werden aus einem Injektionsschacht fächerartig unter dem Gebäude erstellt (Bild 6). Der Bohrfächer geht davon aus, dass sich Hebungen im anstehenden Baugrund mit einem Winkel von ca. 60° bis 70° fortpflanzen. Die Abstände zwischen Injektionsfächer und Bodenplatte des Gebäudes betragen ca. 2.5 m bis 5.5 m und minimal ca. 5.5 m zur Firste der Kaverne. Die Manschettenrohre sind so angeordnet, dass alle Punkte des Stützenrasters des Gebäudes direkt erreicht werden können.

6
Anordnung der von einem Injektionsschacht aus erstellten Ausgleichsinjektionen (rot eingezeichnet) zur Hebung des Baugrunds unter dem Verwaltungsgebäude
7
Kalottenvortrieb für die Lagerkavernen
8
Ulmenstollenvortrieb für die Erstellung der südlichen Lagerkaverne im verschlechterten Baugrund
9
Schadenshöhe an Stahlbetonskelettkonstruktionen in Abhängigkeit der durch den Vortrieb der Kavernen erzeugten Winkelverdrehung an der Erdoberfläche (maximale Neigung der Setzungsmulde), nach Kramer[1]



9

Umstellung der Vortriebsmethode

Im verschlechterten Baugrund kann mit der bisherigen Vortriebsmethode «Vollausbruch in der Kalotte» die Stützung der Ortsbrust nicht mehr mit ausreichender Sicherheit gewährleistet werden. Deshalb wird auf einen Ulmenstollenvortrieb umgestellt, der eine grössere Flexibilität bietet und die Risiken durch die verkleinerten Vortriebsquerschnitte reduziert (Bild 8).

Das für die Ulmenstollen neu entwickelte Sicherungskonzept baut darauf auf, möglichst viele Komponenten des Vollausbruch-Verfahrens zu übernehmen. Der Rohrschirm und die Ortsbrustankerung als vorauseilende Sicherungsmittel werden beim Mittelteil beibehalten. In den Ulmenstollen wird mit IBO-Ankern gespriesst und die Ortsbrust gesichert. Der Ausbau besteht aus Bögen vom Typ HEB 240, die im Bereich der Innenulmen um einen HEB-180-Träger ergänzt werden. Die einzelnen Ulmenstollen, die Firstkalotte und der Kern werden etappenweise in einem Mindestabstand von 20 m hintereinander aufgefahren. Erst nach komplettem Ausbruch aller Teilquerschnitte erfolgt der Abbruch der Ulmenstiele, die vorgängig mittels einer Seilsäge im Firstbereich schonend abgetrennt werden.

René Zurkirchen, dipl. Bauing. ETH, Gähler und Partner AG, Ennetbaden, R.Zurkirchen@gpag.ch

Literatur

1 Kramer, H.: Senkungsschäden an Hochbauten durch Fremdeinflüsse. Forschungsberichte Bauwesen, Gesamthochschule Essen, Heft 4 (1978) S. 183–197