

Professor Dr.-Ing. habil. Christian Moormann

Universitätsprofessor

Direktor des Institutes für Geotechnik
der Universität Stuttgart

öffentlich bestellter und
vereidigter Sachverständiger
für Grundbau, Erdbau, Felsbau
sowie Spezialtiefbau

Möhringer Landstraße 58
70563 Stuttgart

Tel. +49 (0)711 / 685 62437

Fax +49 (0)711 / 685 62439

Mobil: +49 (0)170 / 200 1749

cm@moormann-geotechnik.de

15. September 2014

Schriftstück-Nr. M11-007-501

Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken

Erkundungsphase 6

Rasterförmige Erkundung von Verdachtsflächen außerhalb der Versturzzone in der Beckensohle mittels Vollbohrungen

4. Ergänzung zum Baugrund- und Gründungsgutachten vom 31.01.2012

**Betreiber und
Auftraggeber:**

E.ON Kraftwerke GmbH
Luitpoldstraße 27 · 84034 Landshut
Tel.: 0871 / 694-02

Planer:

Fichtner GmbH & Co. KG
Renewable Energies & Environment
Sarweystraße 3 · 70191 Stuttgart
Tel.: 0711 / 8995-0 · Fax: 0711 / 8995-459
Herr Dipl.-Ing. Christian Siemer (D: -345)
Herr Dipl.-Ing. Matthias Stangl (D: -755)

Ort, Datum:

Stuttgart, 15.09.2014

Verteiler:

Auftraggeber 3fach und 1fach (digital),
Planer 1fach (digital)

Textseiten, Anlagen:

47; 17 (5.113 Seiten)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Vorgang und Veranlassung	3
2 Unterlagen	6
3 Konzept zur Überprüfung der 'Verdachtsflächen' unter der Beckensohle außerhalb der Versturzzonen	8
4 Ausführung der Erkundungsarbeiten	20
4.1 Allgemeines und Bohrverfahren	20
4.2 Durchführung von Referenzbohrungen	23
4.3 Verfüllung der Bohrungen	23
4.4 Besondere Vorkommnisse	25
5 Ergebnisse der Vollbohrungen	28
5.1 Dokumentation der Ergebnisse der Vollbohrungen	28
5.2 Ergebnisse der Referenzbohrungen	34
5.3 Ausführungsbegleitende Auswertung	35
5.4 Nachlaufende Auswertung	35
6 Fachgutachterliche Bewertung	37
7 Resümee und Ausblick	43
Anlagenverzeichnis	46

1 Vorgang und Veranlassung

Die E.ON Wasserkraft GmbH betreibt das ca. 30 km östlich von Nürnberg gelegene Pumpspeicherwerk Happurg. Am 18.01.2011 wurde im Überwachungssystem des Oberbeckens des Pumpspeicherkraftwerkes Happurg ein sehr schneller Anstieg des Wasserspiegels an der Basis der Jurakalke, auf denen das Becken gegründet ist, registriert. In der Folge wurde das Oberbecken umgehend entleert. Nach der Absenkung wurden im südöstlichen Beckenbereich sechs große Einbrüche in der Sohle und weitere Verdachtsflächen festgestellt. Weitere Sohleinbrüche traten in den nachfolgenden Monaten auf.

In diesem Zusammenhang wurde ich auf der Basis meines Leistungs- und Honorarvorschlags vom 20.03.2011 mit Bestellung Nr. 4580080535/KC2/0801/NB vom 17.05.2011 durch die E.ON Wasserkraft GmbH beauftragt, ein Untersuchungsprogramm zur Klärung des Schadensmechanismus und als Grundlage für die weiteren Planungen zu erstellen, die entsprechenden Erkundungsarbeiten fachgutachterlich zu begleiten und im Ergebnis ein Sachverständigengutachten zu erstellen, mit dem in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden Aussagen zur Schadensursache und Vorschläge zur (Untergrund-)Sanierung des Oberbeckens gemacht werden. Die umfangreichen Erkundungsmaßnahmen, die u.a. direkte und indirekte Baugrundaufschlüsse, Großschürfe, verschiedene geophysikalische Messungen, bodenmechanische und hydraulische Feldversuche sowie boden- und felsmechanische Laborversuche umfasste, wurden zunächst im Wesentlichen im Zeitraum vom April 2011 bis Dezember 2011 ausgeführt (**Erkundungsphasen 1 und 2**). Das entsprechende Baugrund- und Sanierungsgutachten wurde mit Datum 31.01.2012 vorgelegt [U01].

Im Ergebnis wurde eine das Oberbecken querende, 60 m bis 80 m, bereichsweise auch bis zu 120 m breite, im Wesentlichen von Nord nach Süd verlaufende 'Versturzzone' identifiziert, die innerhalb der Kalksteine des Malm bis im Mittel 15 m bis 20 m, lokal auch > 35 m Tiefe mit Lockergesteinen gefüllt ist und wohl als eine großräumige Struktur verstürzter Karsthöhlen zu interpretieren ist.

Die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen zeigten, dass außerhalb der Beckensohle unter der Sohldichtung grundsätzlich Kalkstein erwartet werden kann, dass es aber auch Hinweise auf lokale Anomalien gibt, welche prinzipiell mit einer veränderten Beschaffenheit des Untergrundes (verstärkte Klüftung, mit Lockergesteinen gefüllte Karststrukturen, lokal auch unverfüllte Hohlraumstrukturen) zu assoziieren sind. Da es mit den Mitteln der Geophysik nicht möglich war, die aufgezeigten

Anomalien hinsichtlich ihrer Art näher zu identifizieren, wurden im Februar 2012 zwölf ergänzende direkte Baugrundaufschlüsse außerhalb der Versturzzone ausgeführt (**Erkundungsphase 3**), um die Hinweise auf Anomalien im Hinblick auf die Auswirkungen auf das Speicherbecken zu überprüfen. Die Ergebnisse dieser ergänzenden Kernbohrungen wurden zunächst in einem Gutachten vom 16.03.2012 [U05] dokumentiert und dann in einem weiteren Gutachten vom 18.06.2012 [U06] ('1. Ergänzung zum Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012') fortgeschrieben und dabei um die Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche sowie Empfehlungen zu weiteren Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen außerhalb der Versturzzone ergänzt.

Im Zuge der Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens wurde seitens der Fachbehörde (Wasserwirtschaftsamt Nürnberg) auf der Basis der vorliegenden Erkenntnisse zur Untergrundsituation am Oberbecken des Pumpspeicherkraftwerks Happurg angefragt, die Untergrundsituation in den Dammaufstandsflächen außerhalb der Versturzzone vorlaufend ergänzend zu erkunden und in diesem Zusammenhang insbesondere die Höhenlage der Felsoberfläche des Malm, die nur lokal mittels von der Dammkrone aus ausgeführten Kernbohrungen aufgeschlossen worden war, ansonsten aber bisher überwiegend aus Bestandsunterlagen sowie aus den Erkundungsergebnissen am wasser- und landseitigen Dammfuß interpoliert worden war, stichpunktartig zu überprüfen. Da keine realisierbaren technischen Möglichkeiten für eine weitergehende geophysikalische Erkundung der Dammaufstandsflächen bestanden [U07], wurde durch von der Dammoberfläche aus abgeteufte Bohrungen die Untergrundsituation unter den Dammaufstandsflächen außerhalb der Versturzzone differenzierter untersucht und insbesondere die Oberfläche der Kalksteine des Oberen Jura punktuell verifiziert [U08]. Die Ergebnisse dieser im Zeitraum vom Oktober bis Dezember 2012 durchgeführten ergänzenden Kernbohrungen (**Erkundungsphase 4**), wurden im Gutachten vom 01.03.2013 dokumentiert und bewertet ('2. Ergänzung zum Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012') [U10].

Aus den Planungen für die Sanierung des Oberbeckens im Zuge des Jahres 2012 ergab sich hinsichtlich des Massenflusses ein sich aus der Sanierung des Untergrundes im Bereich der Versturzzone (Tragschicht und Bohrsäulen) ergebender Massenüberschuss. In diesem Zusammenhang wurden Überlegungen angestellt, Geländemodellierungen im Bereich der ehemaligen Windwurffläche in der Kainsbacher Senke nordöstlich des bestehenden Oberbeckens vorzunehmen und in diesem Zuge Material in diesem Bereich abzulagern. Da die Archivunterlagen Hinweise auf frühere

Maßnahmen zur Überwachung des an die Kainsbacher Senke anschließenden Hanges ergaben, wurde eine ergänzende Baugrunderkundung mit insgesamt sechs Kernbohrungen (BK 1/2012 bis BK 6/2012) geplant und im Zeitraum Oktober bis Dezember 2012 ausgeführt. Mit Gutachten vom 30.12.2013, zugleich die 3. Ergänzung zum Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012 [U11], wurden die Ergebnisse dieser ergänzenden Baugrunderkundung in der Kainsbacher Senke, die als **5. Erkundungsphase** bezeichnet wird, dokumentiert und geotechnisch bewertet.

Die in dem Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012 [U01] dokumentierten Ergebnisse der zweiten geophysikalischen Messkampagne ergaben für den Bereich der Beckensohle nicht nur Hinweise auf lokale Anomalien (Schwereminima) im Kalkstein außerhalb der Versturzzone, die - wie dargestellt - im Februar 2012 mit den zwölf ergänzenden direkten Baugrundaufschlüssen außerhalb der Versturzzone (Erkundungsphase 3) überprüft wurden (Gutachten vom 18.06.2012: '1. Ergänzung zum Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012' [U06]), sondern identifizierten auch größere zusammenhängende Teilflächen ('Verdachtsflächen'), in denen es Hinweise auf Lockergesteinsmaterial oder starke Klüftung unter der Felslinie gibt bzw. in denen der Verdacht auf lokal stark verminderte Kalksteinmächtigkeiten besteht.

Als Teil des Konzeptes für die Untergrundsanie rung ist vorgesehen, diese **Verdachtsflächen unter der Beckensohle außerhalb der Versturzzone durch rasterförmig angeordnete Bohrungen zu überprüfen**. Mit dieser Maßnahme soll dem hohen Sicherheitsbedürfnis des Betreibers Rechnung getragen werden, der als Anforderung an das Sanierungskonzept vorgegeben hat, dass zukünftige Einbrüche in der Beckensohle „nach menschlichem Ermessen“ auszuschließen sind. Da davon auszugehen ist, dass die vorgenannten Verdachtsflächen durch die im Zuge der späteren Ausführung der Sanierung des Oberbeckens geplante Freilegung des Planums der Beckensohle visuell nicht hinreichend überprüft werden können, wurde nach dem in unserem Gutachten vom 18.06.2012 [U06] beschriebenen Konzept vorgesehen, in diesen außerhalb der Versturzzone liegenden Verdachtsflächen zusätzlich in einem engen Raster Bohrungen auszuführen, um zu überprüfen bzw. zu validieren, dass der Malm-Kalkstein hier unter der Beckensohle mit einer Mindestmächtigkeit ansteht.

Das Vorgehen für die Durchführung der rasterförmigen Bohrungen in diesen Verdachtsflächen und die an die Ausführung der Bohrungen zu stellenden Anforderungen wurden von uns vorab in einem Konzept vom 16.08.2012 definiert [U09].

Auf Veranlassung der E.ON Kraftwerke GmbH wurden entsprechende Erkundungen für die in der Beckensohle außerhalb der Versturzzone liegenden Verdachtsflächen zeitlich vorlaufend zur geplanten Untergrundsanie rung im Zeitraum vom Oktober 2012 bis Mai 2013 ausgeführt. Die Erkundungsarbeiten wurden von uns kontinuierlich fachgutachterlich begleitet und überwacht. Mit dem vorliegenden Gutachten werden die Ergebnisse dieser als **‘6. Erkundungsphase’** bezeichneten umfangreichen Erkundungsmaßnahmen, in deren Rahmen insgesamt 1.514 Vollbohrungen mit mehr als 20.000 Bohrmeter n ausgeführt wurden, dokumentiert. Das vorliegende Gutachten stellt zugleich die ‘4. Ergänzung des Baugrund- und Gründungsgutachtens vom 31.01.2012’ dar.

2 Unterlagen

Zur Erstellung des vorliegenden Berichts wurde u.a. auf folgende Unterlagen zurückgegriffen:

- [U01] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Baugrund- und Sanierungsgutachten“ vom 31.01.2012
- [U02] Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste mbH · GGD, Leipzig:
Ergebnisbericht Pumpspeicherwerk Happurg, Sanierung Oberbecken · Geophysikalische Erkundung im Bereich der Störzone · Geoelektrik, Refraktionstomographie, aufgestellt am 21.09.2011, in [U01]
- [U03] Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste mbH · GGD, Leipzig:
Ergebnisbericht Pumpspeicherwerk Happurg, Sanierung Oberbecken · Geophysikalische Erkundung, Nachtrag 2. Erkundungsphase · Geoelektrik, Gravimetrie, aufgestellt am 22.12.2011, in [U01]
- [U04] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken - Ergänzende Kernbohrungen im östlichen Beckenbereich“, Stellungnahme vom 22.01.2012
- [U05] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Ergänzende Kernbohrungen außerhalb der Versturzzone im Februar 2012“, Gutachten vom 16.03.2012

- [U06] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Ergänzende Kernbohrungen Erkundung und Untergrundsanie rung außerhalb der Versturzzone – 1. Ergänzung des Baugrund- und Gründungsgutachtens vom 31.01.2012“, Gutachten vom 18.06.2012
- [U07] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Ergänzende Erkundung und Untergrundsanie rung im Bereich des Ringdamms außerhalb der Versturzzone · Konzeptpapier“, Geotechnische Stellungnahme vom 30.06.2012
- [U08] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken - Ergänzende Erkundung der Dammaufstandsflächen außerhalb der Versturzzone - Erkundungskonzept“, Geotechnische Stellungnahme vom 15.08.2012
- [U09] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Rasterförmige Überprüfung der Untergrundsituation unter der Beckensohle in Verdachtsbereichen außerhalb der Versturzzone · Konzept und Vorgaben“, Geotechnische Stellungnahme vom 16.08.2012
- [U10] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Erkundungsphase 4 – Ergänzende Erkundung der Aufstandsfläche des Ringdamms außerhalb der Versturzzone – 2. Ergänzung des Baugrund- und Gründungsgutachtens vom 31.01.2012“, Gutachten vom 01.03.2013
- [U11] Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Stuttgart:
„Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken – Erkundungsphase 5 – Ergänzende Erkundung der Baugrundverhältnisse in der Kainsbacher Senke – 3. Ergänzung des Baugrund- und Gründungsgutachtens vom 31.01.2012“, Gutachten vom 30.12.2013

Des Weiteren wird auf das Verzeichnis der verwendeten Unterlagen im Kapitel 2 des Baugrund- und Sanierungsgutachtens vom 31.01.2012 [U01] verwiesen.

3 Konzept zur Überprüfung der 'Verdachtsflächen' unter der Beckensohle außerhalb der Versturzzonen

In unserem Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012 [U01] sind die Ergebnisse zweier geophysikalischer Messkampagnen dokumentiert, die im Jahr 2011 im Bereich des Oberbeckens durchgeführt wurden. Während die erste Messkampagne primär auf die Ermittlung der räumlichen Ausdehnung der Versturzzone und die Klärung der Baugrundverhältnisse in dieser Versturzzone ausgerichtet war (Bericht vom 21.09.2011, [U02]), wurde in einer zweiten Messkampagne im Oktober und November 2011 insbesondere die Bereiche der Beckensohle untersucht, die außerhalb der Versturzzone im östlichen Bereich des Beckens (Teilfläche 1) und im westlichen Bereich des Beckens (Teilfläche 2) liegen; in diesen Bereichen war unter der Sohl-dichtung grundsätzlich Kalkstein erwartet worden. Im Rahmen der zweiten geophysikalischen Messkampagne wurden in diesen Bereichen ergänzende geoelektrische Messungen sowie mikrogravimetrische Messungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der zweiten geophysikalischen Messkampagne sind in dem Bericht der Geophysik GGD · Leipzig vom 22.12.2011 dokumentiert und bewertet [U03]. Die Ergebnisse wurden in unserem Baugrund- und Sanierungsgutachten vom 31.01.2012 [U01] detailliert dargestellt und beurteilt. Bild 1 zeigt die abgeleitete Karte der Felsoberfläche nach der sogenannten Komplexinterpretation (nach Phase 2, GGD).

Danach kann aus den Ergebnissen der Geoelektrik abgeleitet werden, dass im Ostteil des Beckens (Teilfläche 1) über weite Strecken Fels unter der Beckensohle vorhanden ist. Es wurde allerdings als Ergebnis der zweiten geophysikalischen Messkampagne ein System von niedrigen Widerständen unterhalb der hochohmig abgebildeten Felsoberfläche nachgewiesen, welche prinzipiell mit einer veränderten Beschaffenheit des Untergrundes, beispielsweise in Form verstärkter Klüftung oder bindiger Kluff-/Karst- oder Hohlraumfüllungen, zu assoziieren sind. Diese Widerstandsminima treten lokal im Niveau der Felsoberfläche auf, so dass Unterbrechungen des Felskörpers unter der Beckensohle nicht ausgeschlossen werden können.

Die mit den geoelektrischen Auffälligkeiten aufgezeigten Imperfektionen wurden durch die zusätzlich im Rahmen der zweiten geophysikalischen Messkampagne durchgeführten mikrogravimetrischen Messungen redundant bestätigt. Die gravimetrischen Ergebnisse (Schwerekarten) zeigen eine auffällige Korrelation mit der vermuteten Verteilung der Lockermaterialien nach der Geoelektrik. Insbesondere jene

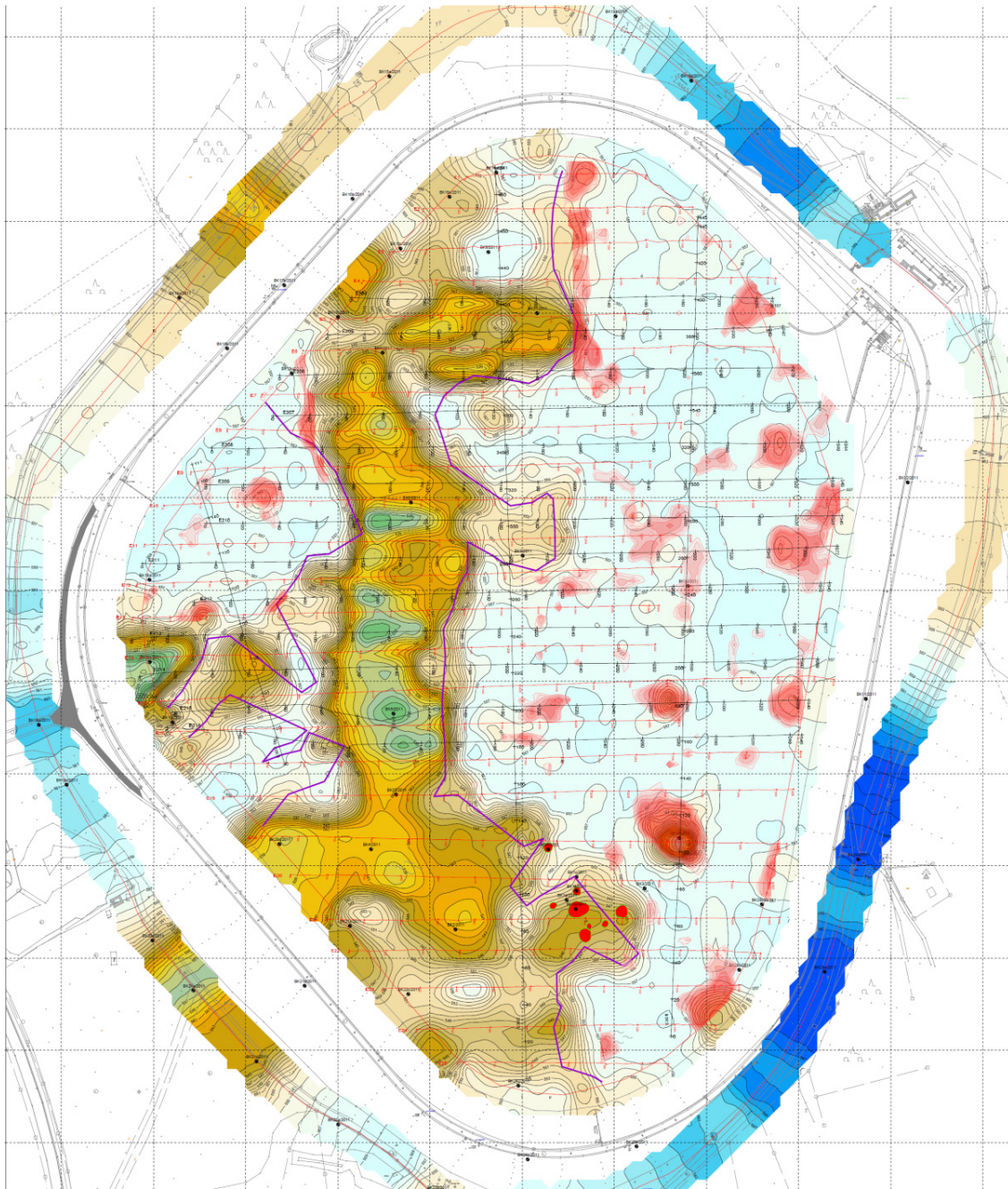


Bild 1 Ergebnis 1.+2. Erkundungsphase von 2011: Geophysik, Karte der Felsoberfläche nach Komplexinterpretation (Phase 2, GGD) [U03]

Stellen, an denen niedrige Widerstände im Niveau der Felsoberfläche auftreten, bilden sich im Schwerefeld als lokale Minima ab. Auf Grund der weitgehenden Übereinstimmung im Auftreten von gravimetrischen und elektrischen Minima kann gefolgert

werden, dass die im Bereich der Felsfläche ausgehaltenen niederohmigen Strukturen mit Materialien relativ verminderter Dichte, d.h. einer erhöhten Klüftigkeit, bzw. mit mit Lockergesteinen gefüllten Karststrukturen oder lokal auch mit unverfüllten Hohlraumstrukturen einhergehen.

Der westliche Bereich (Teilfläche 2) außerhalb der Versturzzone konnte im Ergebnis der geophysikalischen Untersuchungen [U03] als weitgehend homogener Fels angenommen werden, wobei auch hier einzelne, lokale Anomalien identifiziert wurden.

Es ist mit den Mitteln der Geophysik nicht möglich, die aufgezeigten Anomalien hinsichtlich ihrer Art näher zu identifizieren, das heißt, zuverlässig zu klären, ob es sich um echte Hohlräume, um verfüllte Karststrukturen oder lediglich um eine erhöhte Klüftigkeit des Kalksteins handelt.

In dem Bericht der Geophysik GGD · Leipzig vom 22.12.2011 [U03] wurden in Abstimmung mit uns ergänzende direkte Baugrundaufschlüsse empfohlen, um die nachgewiesenen lokalen Anomalien im Hinblick auf die Auswirkungen auf das Speicherbecken zu überprüfen. Konkret wurden vorab 10 Anomaliebereiche, als A 1 bis A 10 bezeichnet, identifiziert, für die eine Überprüfung durch Kernbohrungen empfohlen wurde.

Vor diesem Hintergrund wurden im Februar 2012 unter unserer fachgutachterlichen Überwachung in der Summe 12 ergänzende Kernbohrungen (A1/2012 bis A12/2012) in der Beckensohle außerhalb der Versturzzone in den indizierten lokalen Anomaliebereichen ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Kernbohrungen sind in unserem Gutachten vom 18.06.2012 [U06] dokumentiert. Danach wurden in nahezu allen ausgeführten Kernbohrungen Karststrukturen mit Lockergesteinsfüllungen angetroffen. Die zum Teil erheblichen Lockergesteinsmächtigkeiten sind in Bild 2 zusammenfassend visualisiert. Hinsichtlich der detaillierten Ergebnisse dieser Kernbohrungen wird auf [U06] verwiesen.

Im Bereich der Beckensohle außerhalb der Versturzzone bestand damit basierend auf den in zwei Phasen flächig ausgeführten geophysikalischen Untersuchungen und den punktuell ergänzenden direkten Aufschlüsse ein Kenntnisstand, der es erlaubte, lokale Anomalien und potentielle flächige Schwächezonen (‘Verdachtsflächen’) zu identifizieren. In der sogenannten Faktenkarte (Bild 2, aus [U03]) sind diesen potentiellen flächigen Schwächezonen (‘Verdachtsflächen’) unter der Beckensohle farblich hervorgehoben.

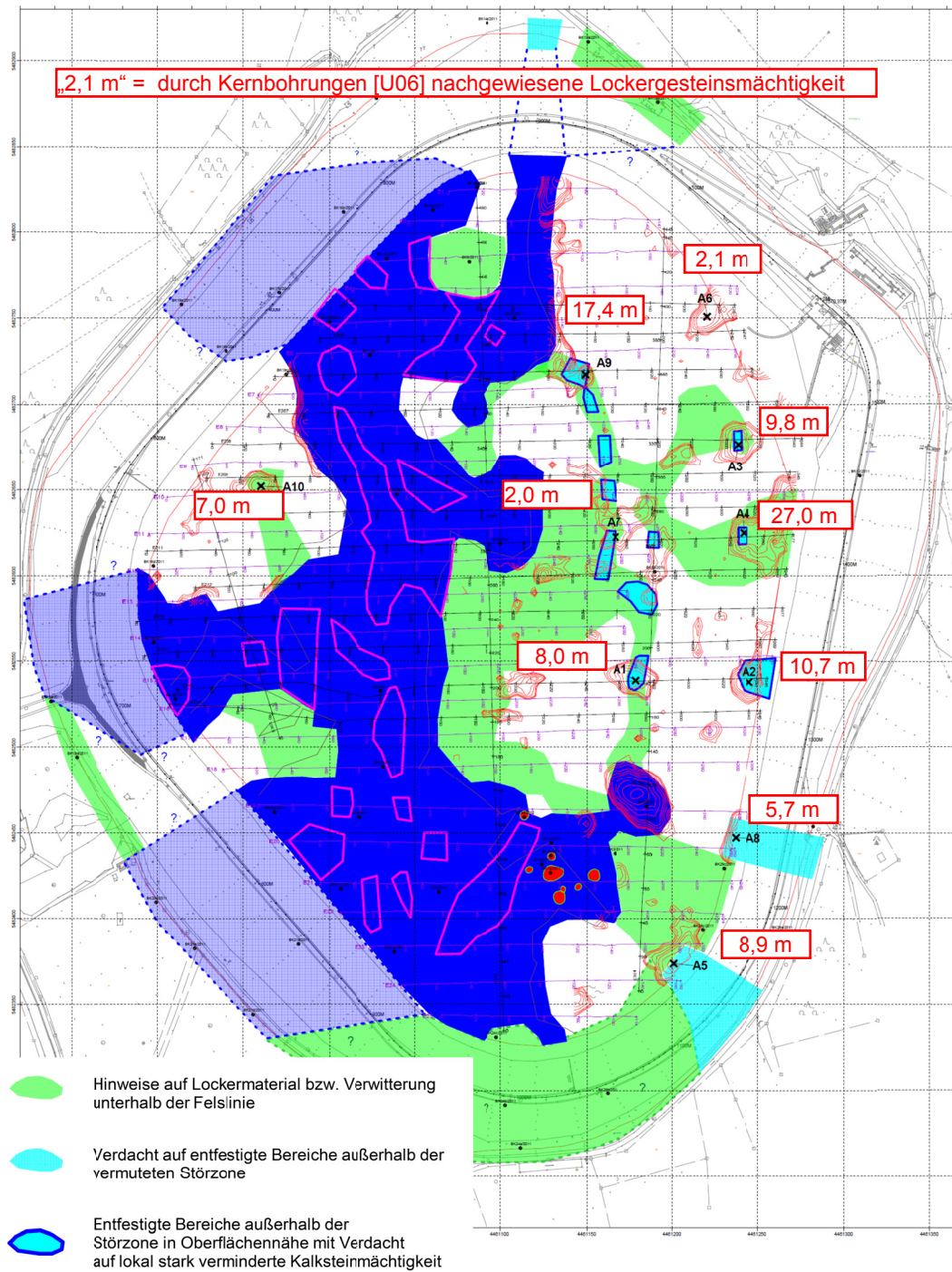


Bild 2 Faktenkarte als Ergebnis der 2011 ausgeführten geophysikalischen Erkundungen [U03] mit Darstellung der geophysikalisch induzierten möglichen Verdachtsflächen und Anomalien (rote Höhenangaben entsprechen der 2012 erkundeten Lockergesteinsmächtigkeit [U06])

Großräumige nicht gefüllte Hohlräume oder gar Höhlenstrukturen unterhalb der Beckensohle können außerhalb der Versturzzone innerhalb des von den geophysikalischen Messungen erfassten Tiefenbereiches, i.e. überwiegend mindestens 20 m unter aktueller Beckensohle, nach den Angaben in [U02] und [U03] sicher ausgeschlossen werden.

Damit verbleiben mit Hinblick auf das für das Oberbecken seitens des Betreibers vorgegebene Sanierungsziel für die außerhalb der Versturzzone liegenden Bereiche der Beckensohle zwei Aspekte, die durch die bisher durchgeführten Erkundungen nicht vollständig abgedeckt werden können:

- a) Derzeit können kleinräumige Anomalien bzw. Karststrukturen, wie etwa Spalten oder schlotartige Strukturen mit Ausdehnung im Dezimeterbereich bis hin zu wenigen Metern nicht identifiziert werden, da sie hinsichtlich ihrer kleinräumigen Ausdehnung mit den geophysikalischen Verfahren nicht aufgelöst werden können.

Zur Überprüfung dieser kleinräumigen, bis an die Beckensohle heranreichenden Anomalien ist unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten vorgesehen, im Zuge der Ausführung der Untergrundsanie rung die Beckendichtung (inklusive Schutzschicht und Dränagesand) im gesamten Beckenbereich, d.h. nicht nur in der Versturzzone, temporär zu entfernen und den im Planum erwarteten Kalkstein flächig freizulegen, um diesen dann ingenieurgeologisch zu kartieren. Auf diese Weise können auch kleinräumige Karststrukturen in Höhe des Planums der Beckensohle zuverlässig erkannt und erforderlichenfalls saniert werden.

- b) Ferner weist die die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zusammenfassende Faktenkarte (Bild 2) im Beckenbereich außerhalb der Versturzzone Verdachtsflächen aus, in denen es „Hinweise auf Lockermaterial bzw. Verwitterung unterhalb der Felslinie“ gibt (grüne Bereiche in Bild 2), wobei wir dies als Hinweise auf starke Klüftung - teils mit verstärktem Lockergesteinsbesatz - interpretieren, bzw. bei denen es sich um „Entfestigte Bereiche außerhalb der Störzone in Oberflächennähe mit Verdacht auf lokal stark verminderte Kalksteinmächtigkeit“ handelt (türkisfarbene Bereiche in Bild 2). Hierbei könnte es sich um lokale Karststrukturen handeln, die, so deutet es ihre Anordnung an, auch unterirdisch miteinander verbunden sein könnten.

Im Hinblick auf den zweiten Aspekt, der möglichen Existenz von stark entfestigten bzw. geklüfteten Kalksteinbereichen bzw. Lockergesteinszonen unter einer im Pla-

num des Beckens anstehenden, aber nur geringmächtigen Kalksteindecke, wird die zuvor unter a) beschriebene und als Teil der Sanierungsarbeiten geplante visuelle Kontrolle des Planums der Beckensohle bzw. der Felsoberfläche zu keinen weiteren Erkenntnissen führen. Erforderlich ist vielmehr eine zusätzliche Überprüfung der (Mindest-)Mächtigkeit des anstehenden, bezüglich seiner Oberfläche einer optischen Überprüfung zugänglichen Kalksteins.

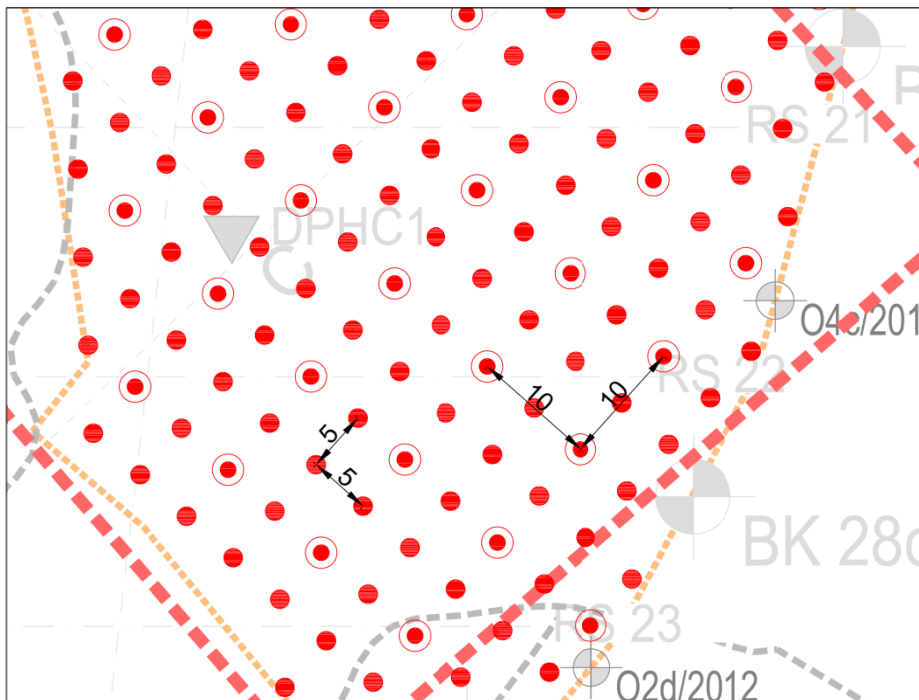
In unserem Gutachten vom 18.06.2012 [U06] wird daher empfohlen, in diesen durch die geophysikalischen Untersuchungen identifizierten 'Verdachtsflächen' (grüne und türkisfarbene Teilbereiche in Bild 2) in einem regelmäßigen Raster vertikale Bohrungen abzuteufen, mit denen nachzuweisen ist, dass der im Planum erwartete Kalkstein des Oberjura, stratigraphisch als Untere Kimmeridge-Schichten (Malm γ) und Werkkalke (Malm β) einzuordnen, mit einer im Hinblick auf die Anforderungen des Oberbeckens ausreichenden Mindestmächtigkeit ansteht.

Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass in der Beckensohle geoelektrische Messungen in in Ost-West-Richtung orientierten Schnitten in einem gegenseitigen Abstand von 10 m und mikrogravimetrische Messungen in einem gleichmäßigen Raster von 5 m mal 5 m durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass wesentliche Anomalien - z.B. Hohlräume - mit einem Durchmesser von etwa 5 m in 10 m Tiefe, d.h. mit einem Durchmesser-/ Tiefenverhältnis von etwa 1:2, mit diesen geophysikalischen Messverfahren erkannt wurden. Insoweit können große, höhlenartige Hohlräume in einem für die Standsicherheit der Beckensohle relevanten Bereich weitgehend ausgeschlossen werden.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde in [U09] vorgesehen, die ergänzenden Erkundungsbohrungen in den identifizierten Teilbereichen (grüne und türkisfarbene Bereiche in Bild 2) in einem Raster von 5 m mal 5 m und die Erkundungstiefe mit 5 m unter Oberfläche Kalkstein festzulegen. Ferner wurde vorgesehen, von den vorgenannten Bohrungen die in einem Raster von 10 m mal 10 m liegenden Bohrungen bis 10 m Erkundungstiefe unter Oberfläche Kalkstein zu verlängern, um im Sinne einer nachhaltigen Nachweisführung nachzuweisen, dass in den Verdachtsflächen auch im Tiefenabschnitt von 5 m bis 10 m keine größeren Hohlräume oder lockergesteinsgefüllten Karststrukturen bestehen. Beim Antreffen von Anomalien o.ä. konnte das Raster auf 2,5 m mal 2,5 m verdichtet werden.



Bild 3a Geplante ergänzende Erkundung mittels rasterförmig angeordneten Bohrungen der Beckensohle außerhalb der Versturzzone mittels rasterförmig angeordneten Bohrungen



Ergänzende Erkundung im 5 m x 5 m Raster
mit 5 m Einbindung in Fels - Beckensohle

● G070-J5

Ergänzende Erkundung im 10 m x 10 m Raster
mit 10 m Einbindung in Fels - Beckensohle

● H150-A7

Bild 3b Detail (Ausschnitt) zu Bild 3a: Anordnung der Bohrungen in einem gleichmäßigen (Ausgangs-)Raster von 5 m mal 5 m

Beim Antreffen von Karststrukturen, Lockergesteinspartien oder stark klüftigem Kalkstein waren die Bohrungen entsprechend tiefer zu führen, bis eine minimale Einbindetiefe von rund 5 m bzw. von 10 m in einen weitgehend kompakten Kalkstein nachgewiesen werden konnte.

Die geplante Anordnung der Bohrungen ist in Bild 3a dargestellt. Der durch die Bohrungen abgedeckte Bereich umfasst neben den zuvor beschriebenen Teilbereichen außerhalb der Versturzzone (grüne und türkisfarbene Bereiche in Bild 2) auch teilweise unmittelbar angrenzende lokale Anomaliebereiche (rot schraffierte Bereiche in Bild 2) sowie kleinere Bereiche in der Versturzzone, bei denen der 'Verdacht' besteht, dass der unter der Beckensohle erwartete Kalkstein nur geringmächtig ist.

Das originäre Erkundungsprogramm umfasste insgesamt rund 1.350 Bohrungen in der Beckensohle mit etwa 10.900 laufenden Bohrmeter.

Das Bohrverfahren für diese ergänzenden Erkundungsbohrungen, bei denen es sich vom Charakter her eher um 'Tastbohrungen' handelt, war so festzulegen, dass die die Felsoberfläche unterlagernde Lockergesteinspartien ab einer Schichtmächtigkeit von etwa 0,2 m und stark klüftige Partien im Kalkstein unter bodenmechanischen Gesichtspunkten sicher erkannt werden können. Ein vollständiger Kerngewinn war nicht erforderlich. Es war jedoch zu berücksichtigen, dass der unter der Beckensohle anstehende Kalkstein überwiegend geklüftet und bereichsweise stärker verkarstet ist. Es waren daher erhöhte Anforderungen an die „Sensitivität“ des Bohrverfahrens zu stellen, um den Übergang vom Kalkstein in lockergesteinsgefüllte Partien und vice versa zuverlässig zu detektieren.

Zugleich war bei der Wahl des Bohrverfahrens zu berücksichtigen, dass eine vergleichsweise große Anzahl von Bohrungen und eine hohe Summe an Bohrmeter erforderlich wird und die Geräte entsprechend schnell umgesetzt werden können.

Als geeignete Bohrverfahren wurden im Vorfeld unter den vorgenannten Randbedingungen u.a. das Überlagerungsbohrverfahren mit Aufsatzhammer (Imlochhammer) und der Einsatz eines Rollenmeißels identifiziert. Vorgesehen war also die Ausführung der Bohrungen ohne Kerngewinn als sogenannte Vollbohrungen.

Es wurde vorgegeben, die Bohrungen grundsätzlich verrohrt auszuführen, zumindest aber die Möglichkeit vorzusehen, eine (Fels-)Verrohrung nachzuführen, um die Stabilität des Bohrloches auch in ausgedehnteren lockergesteinsgefüllten Partien zu gewährleisten.

Da ein Kerngewinn nicht vorgesehen war, konnte der Durchmesser der Bohrungen an denjenigen von marktüblichen Geräten für Ankerbohrungen o.ä. angepasst sein, wobei Durchmesser von ≥ 56 mm sinnvoll und ausreichend erschienen.

Das Bohrgut war mit Luftspülung zu fördern, da eine Wasserspülung im Hinblick auf die Erosionsempfindlichkeit der Kluft- und Karstfüllungen nicht zugelassen wurde.

Als entscheidende Anforderung wurde vorgegeben, dass jede Bohrung objektiv prüfbar protokolliert wird. Es wurde daher erforderlich, Bohranlagen einzusetzen, die mit einem Bohrdatenschreiber ausgerüstet sind, der alle wesentliche Bohrparameter zumindest aber

- die Drehgeschwindigkeit (Drehzahl),
- den Anpressdruck (Hydraulik Schlitten) und
- die Vortriebsgeschwindigkeit (Vorschub/Zeit).

kontinuierlich aufzeichnet und es erlaubt, die Bohrdaten reproduzierbar zeit- und bohrtiefenabhängig zu dokumentieren und zu visualisieren. Die Dokumentation und graphische Visualisierung der Bohrdaten war Teil der Leistungen des Bohrunternehmers.

Unabhängig davon waren die Bohrarbeiten durch den Geräteführer/Bohrmeister zu protokollieren. Dabei waren in Anlehnung an DIN 4125:1990, Anhang A, bzw. DIN 4022:1987, Teil 1, Anhang B, neben Angaben zur (abweichenden) Bohrtechnik insbesondere alle Feststellungen bei den Bohrarbeiten, wie Bohrfortschritt, Anpressdruck, Farbe und Beschaffenheit des gefördertem Bohrgutes, Klüfte/Hohlräume etc. unabhängig vom Bohrdatenschreiber aufzuzeichnen und in Formblättern zu protokollieren. Die eingesetzten Formblätter wurden vor Aufnahme der Bohrarbeiten mit uns als Geotechnischem Gutachter des Bauherrn abgestimmt.

Die Eignung des Bohrverfahrens war zu Beginn der ergänzenden Erkundungsarbeiten nachzuweisen. Das Verfahren und das Vorgehen war daher zunächst durch Referenzbohrungen zu kalibrieren und zu verifizieren. Dazu waren für jede eingesetzte Bohranlage und -mannschaft unmittelbar neben drei der zehn im Februar 2012 in der Beckensohle ausgeführten Kernbohrungen A1/2012 bis A10/2012 Referenzbohrungen abzuteufen und die gewonnenen Bohrdaten mit den Ergebnissen der Kernbohrungen abzugleichen. Auf dieser Basis war das Vorgehen für die weiteren Erkundungsbohrungen zu überprüfen und gegebenenfalls fortzuschreiben.

Die Erkundungsbohrungen waren unmittelbar nach Herstellung hydraulisch wirksam zu verschließen, um ein Eindringen von Oberflächenwasser in den sensiblen Untergrund zu verhindern.

Die Kennzeichnung der Bohrungen erfolgte nach dem in den Bildern 4a und 4b dargestellten Prinzip. Danach wurde die Beckensohle durch ein regelmäßiges Raster von Achsen in ein System von sogenannten Quadranten unterteilt (Bild 4a), die nach den begrenzenden Rasterlinien eindeutig gekennzeichnet sind (z.B. C070, C080 etc.). Jeder im Grundriss rechteckige 'Quadrant' besitzt dabei Abmessungen von 25,0 m mal 62,5 m, wobei die längere Seitenlänge in Südost-Nordwest-Richtung orientiert ist. In einem Grundraster von 2,5 m mal 2,5 m umfasst damit jeder Quadrant

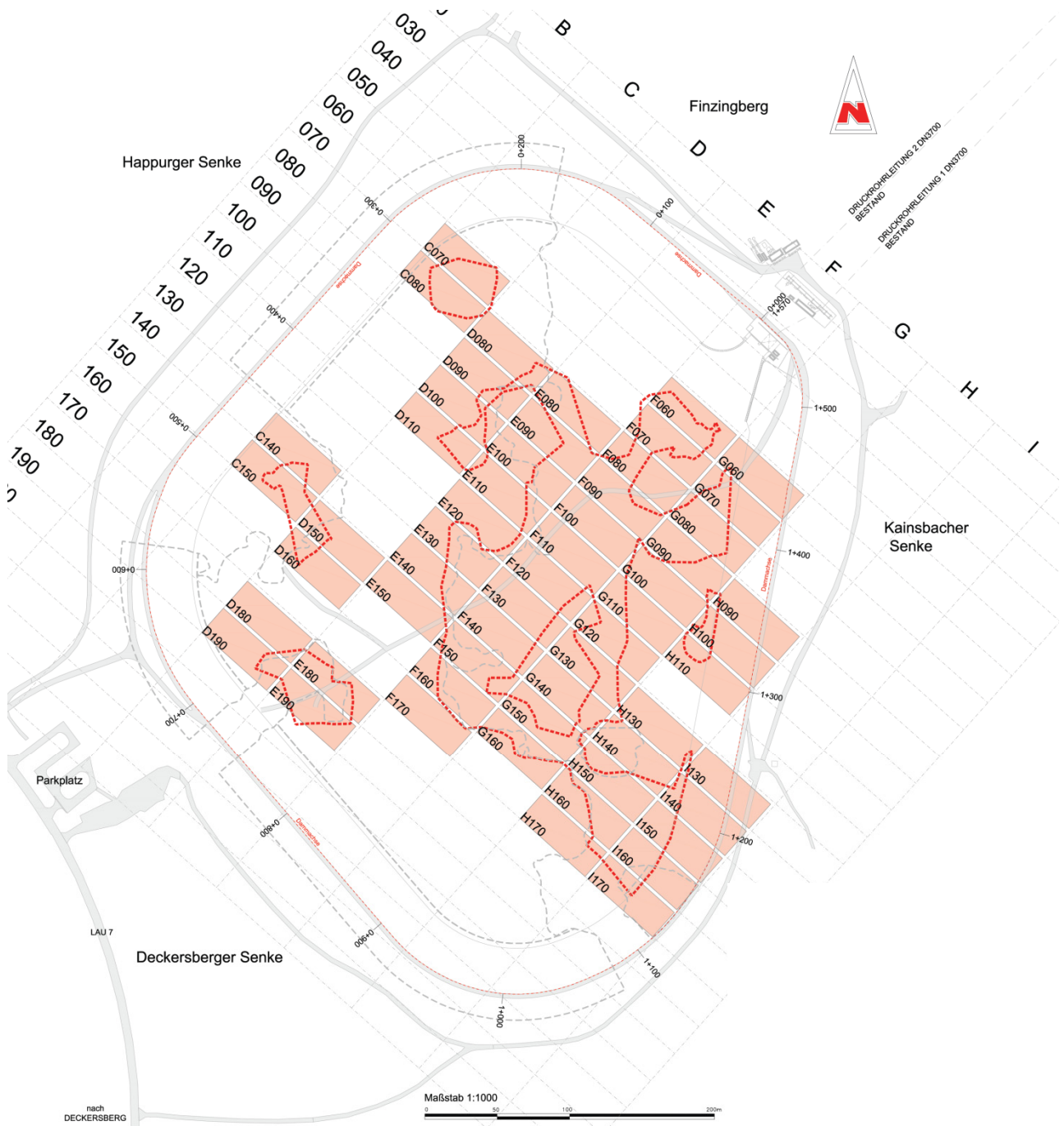


Bild 4a Ergänzende Erkundung mittels rasterförmig angeordneten Bohrungen der Beckensohle außerhalb der Versturzzone: Einteilung der Beckensohle in Achsen und ein Raster von Quadranten

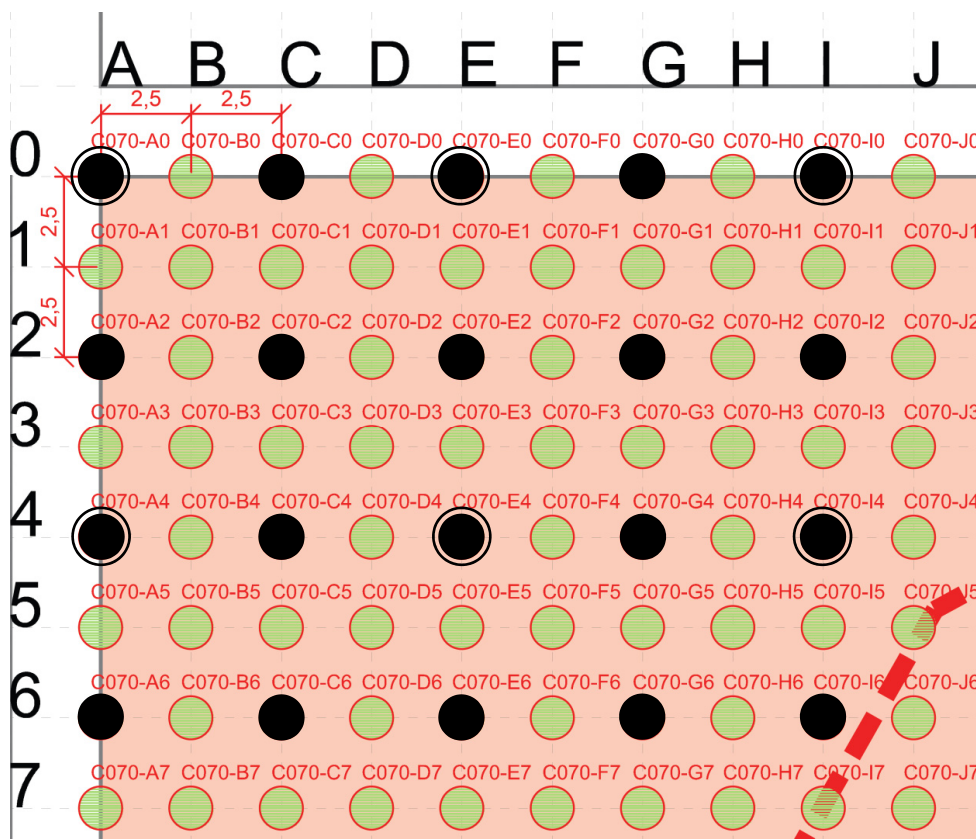
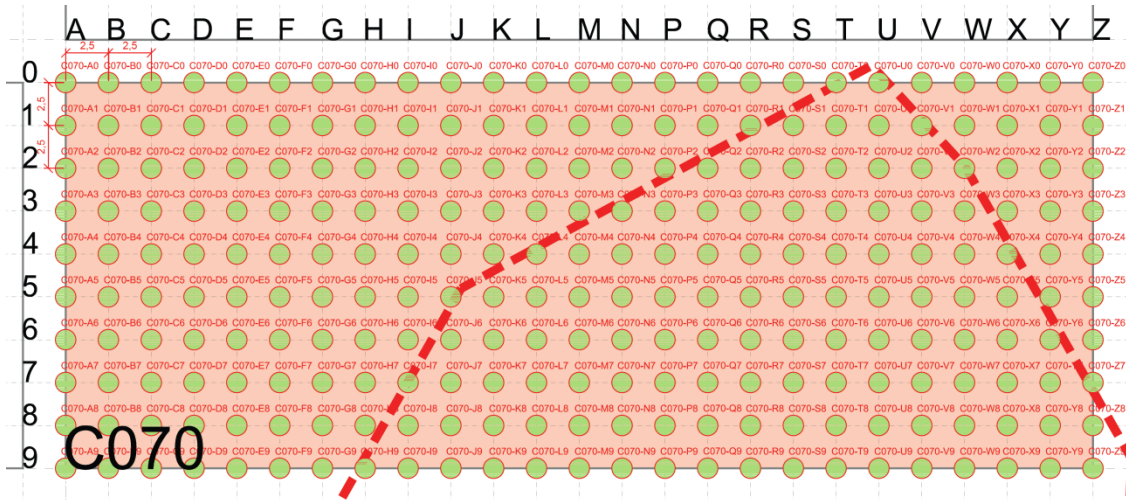


Bild 4b Detail zu Bild 4a: Bezeichnung der Bohrungen innerhalb eines Quadranten (Beispiel: C070); oben: gesamter Quadrant, unten: Ausschnitt. Planmäßig ausgeführt: schwarz markierte Bohrungen

potentiell 25 mal 10 gleich 250 Bohransatzpunkte. Planmäßig ausgeführt wurden die Bohrungen jedoch in einem Raster von 5 m mal 5 m, so dass sich je Quadrant planmäßig bis zu 13 Bohransatzpunkte in der längeren und 5 Bohransatzpunkte in der kürzeren Richtung eines Quadranten ergaben, in der Summe also 75 Bohransatzpunkte je Quadrant. Die Kennzeichnung der einzelnen Bohransatzpunkte erfolgte entsprechend mit einer sich aus dem jeweiligen Quadranten und der Position des Bohransatzpunktes innerhalb des Quadranten zusammensetzenden Bezeichnung (siehe Bild 4b). So kennzeichnet z.B. die Bezeichnung C070-E2 einen Bohransatzpunkt an der Position „E2“ (10 m südöstlich und 10 m südwestlich der nordwestlichen Ecke („oberen linken Ecke“) im Quadranten „C070“. Mit dieser Systematik ist jeder der letztlich mehr als 1.500 Bohransatzpunkte mit einer sechsstelligen Bezeichnung eindeutig identifizierbar und räumlich zuordbar.

Die Planung sah zunächst die in Bild 4a dargestellten 58 Quadranten vor, mit denen die sich insbesondere aus der geophysikalischen Erkundung ergebenden Verdachtsflächen (Bild 2) unter der Beckensohle außerhalb der Versturzzone abgedeckt wurden. Im Zuge der Erkundungsarbeiten ergab sich bedingt durch am äußeren Rand der geplanten Quadranten angetroffene Anomalien die Notwendigkeit, einzelne ergänzende Bohrungen in angrenzenden, ursprünglich nicht geplanten Quadranten abzuteufen.

4 Ausführung der Erkundungsarbeiten

4.1 Allgemeines und Bohrverfahren

Als geeignete Bohrverfahren war im Vorfeld das Überlagerungsbohrverfahren mit Aufsatzhammer (Imlochhammer) und der Einsatz eines Rollenmeißels identifiziert worden, wobei von der beauftragten Bohrfirma der Einsatz eines Aufsatzhammers (Imlochhammer) favorisiert wurde und zunächst zum Einsatz kam.

Das Bohrverfahren erwies sich indes im Hinblick auf die Interpretierbarkeit der aufgezeichneten Bohrdaten als nicht zuverlässig und somit nicht ausreichend zielführend, so dass nach entsprechenden Erprobungen, insbesondere im Zusammenhang mit der Ausführung der Referenzbohrungen, für die Ausführung der rasterförmigen Vollbohrungen der Einsatz eines rotierenden Bohrverfahrens mit Rollenmeißel gewählt

und angewendet wurde. Die Bohrungen wurden dabei mit einem Durchmesser von 75 mm ausgeführt.

Von der Geländeoberfläche aus wurde im Bereich der Beckendichtung zunächst als temporäre Verrohrung ein Stahlrohr mit einem Durchmesser von 100 mm bis eine Tiefe von meist 1,4 m, lokal auch bis 1,6 m eingesetzt, mit dem die hier in der Bohrlochwandung anstehenden Schichten der Beckensohle gestützt und zugleich der Zutritt sich zeit- und bereichsweise auf der mineralischen Dichtung der Beckensohle stauenden Oberflächenwassers in das Bohrloch vermieden wurde. Diese Schutzverrohrung wurde nach Verfüllung eines Bohrloches mit Tonpellets wieder gezogen.

Die übrigen Bohrungen wurden von der Bohrfirma in der Regel unverrohrt ausgeführt, soweit im Einzelfall nicht tiefreichende, mächtige lockergesteinsgefüllte Karststrukturen das Nachführen einer Verrohrung erforderlich machten.

Das Bohrgut wurde mit dem Lufthebeverfahren gefördert. Auf Grund der beim Bohren im Kalkstein damit verbundenen Staubentwicklung wurden die Bohrgeräte so aufgestellt, dass die Staubentwicklung für benachbarte Bohrmannschaften reduziert wurde (siehe Fotodokumentation in Anlage 2).

In der Summe wurden von der Stölben GmbH, Zell/Mosel, unter unserer fachgutachterlichen Begleitung vom 15.10.2012 bis 22.05.2013 in der Beckensohle insgesamt

1.514 Vollbohrungen mit Bohrlängen von 5,49 m bis 52,40 m,
in der Summe mit insgesamt 20.250,4 m laufenden Bohrmeter

niedergebracht.

In der Summe der 20.250,4 m laufenden Bohrmeter sind 539,33 m Bohrmeter für die Durchführung von Referenzbohrungen enthalten (Abschnitt 4.3).

Für die Bohrarbeiten wurden zeitweise bis zu 6 Geräten und Bohrmannschaften zeitgleich eingesetzt, so dass Wochenleistungen von bis zu 1.280 Bohrmeter erzielt werden konnten.

Insgesamt waren im Laufe der Bohrarbeiten 10 Bohrgeräte im Einsatz, überwiegend Geräte des Typs 'Beretta T 51' und 'Beretta T 52' (Hersteller: Beretta) sowie 'NL1' (Hersteller: Botec-Scheitza) und 'Socomafor 50' (Hersteller: Socomaloc), untergeordnet auch der Typen 'Sedidrill 200' und 'Sedidrill 250' (Hersteller: Sedidrill). Alle Geräte wurden individuell durch Referenzbohrungen überprüft und hinsichtlich der Interpretation ihrer Bohrdaten untersucht (Abschnitte 4.2 und 5.2).

Die Fotodokumentation in Anlage 2 zeigt exemplarisch die Ausführung der Bohrarbeiten im Oberbecken und die eingesetzten Geräte inklusive der Einrichtungen zur Aufzeichnung der Bohrdaten.

Beim Antreffen von Karststrukturen, Lockergesteinspartien oder stark klüftigem Kalkstein waren, wie in Abschnitt 3 dargestellt, die Bohrungen entsprechend tiefer zu führen, bis eine minimale Einbindetiefe von rund 5 m bzw. von 10 m in einen weitgehend kompakten Kalkstein nachgewiesen werden konnte. Auf Grund der bei der Ausführung in dem planmäßigen Tiefenbereich angetroffenen Anomalien und Karststrukturen, musste die Erkundungstiefe während der Ausführung häufig angepasst werden, so dass sich in der Summe deutliche Mehrmeter ergaben.

Maßgebend für die Aussagekraft und damit den Erfolg der rasterförmigen Bohrungen zur Überprüfung der Untergrundsituation in den außerhalb der Versturzzone detektierten Verdachtsflächen unter der Beckensohle war die Sorgfalt bei der Ausführung der Bohrungen und deren schlüssige Dokumentation. Es waren daher hohe Anforderungen an die gleichbleibend hohe Qualität von Bohrausführung und Dokumentation zu stellen, damit im Ergebnis ein klares und eindeutiges Bild über die Untergrundsituation gewonnen werden konnte. Unverzichtbar war der Einsatz erfahrener Bohrmeister während der gesamten Bohrkampagne. Ferner wurde auf eine möglichst geringe Personalfuktuation geachtet, um die projektspezifischen Erfahrungswerte im Sinne der Kontinuität der Durchführung der Bohrarbeiten und der Aufzeichnungen nutzen zu können.

Die Bohrarbeiten wurden von uns kontinuierlich fachgutachterlich begleitet, dabei wurden regelmäßig, d.h. arbeitstäglich, die Ausführung von mehreren, von unterschiedlichen Bohrgeräten/-mannschaften ausgeführten Bohrungen vor Ort beobachtet, das Bohrgut angesprochen und die Beobachtungen von uns unabhängig protokolliert sowie die Ergebnisse der Aufschriebe mit denjenigen der Bohrgeräteführer und mit den Ergebnissen der Bohrdatenschreiber abgeglichen. Die von uns erstellten Protokolle haben wir zu unseren Unterlagen genommen, wo sie bei Bedarf eingesehen werden können. Hierauf aufbauend wurden, soweit erforderlich, ergänzende Hinweise an die Bohrgeräteführer gegeben, um eine einheitliche Ansprache der während der Bohrarbeiten gemachten Beobachtungen sicherzustellen, was auch im Hinblick auf eine beim Antreffen von Anomalien in der planmäßigen Aufschlusstiefe während der Bohrabreiten unmittelbar erforderlich werdende Anpassung der Erkundungstiefe von besonderer Bedeutung war.

4.2 Durchführung von Referenzbohrungen

Zu Beginn der Bohrarbeiten jedes Bohrgerätes wurden unter unserer fachgutachterlichen Begleitung Referenzbohrungen ausgeführt. Hierzu wurden in unmittelbarer Nähe, in der Regel in einem Abstand von 2 m zu ausgewählten Kernbohrungen der im Februar 2012 ausgeführten Erkundungsphase 3 [U06] Vollbohrungen ausgeführt und die Ergebnisse des Bohrdatenaufschriebs sowie des händisch geführten Bohrprotokolls mit den Ergebnissen dieser Kernbohrungen abgeglichen. Die Referenzbohrungen wurden dabei in der Regel im Nahbereich der 2012 ausgeführten Kernbohrungen A3/2012, A4/2012 und A9/2012 ausgeführt. Die mit den unterschiedlichen Bohranlagen sukzessive angeordneten Referenzbohrungen wurden dabei sternförmig um die Kernbohrungen herum, orientiert an den Himmelsrichtung N, O, S, W, angeordnet.

Tabelle 1 fasst die ausgeführten Referenzbohrungen für die einzelnen Bohrgeräte zusammen. Die Bezeichnung „A4-R-W“ kennzeichnet dabei eine Referenzbohrung (R), die unmittelbar westlich (W) der Kernbohrung A4/2012 ausgeführt wurde.

Während die mit einem Imlochhammer ausgeführten Referenzbohrungen in der Summe keine zufriedenstellende Interpretation der Bohrdaten erlaubten, ergaben sich aus den mit dem Rollmeißel durchgeführten Bohrungen Bohrdatenaufschriebe, die in Verbindung mit den händisch geführten Bohrprotokollen grundsätzlich zu einer guten Interpretationsfähigkeit der Daten führten und im Abgleich mit den benachbarten Referenz- bzw. Kernbohrungen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der grundsätzlichen Identifikation von stark entfestigten und mit Lockergestein gefüllten Karststrukturen und Hohlräumen zeigten (siehe Abschnitt 5.2).

4.3 Verfüllung der Bohrungen

Die Vollbohrungen wurden unmittelbar nach ihrer Herstellung hydraulisch wirksam verschlossen, um ein Eindringen von Oberflächenwasser in den sensiblen Untergrund zu verhindern. Im Hinblick auf die Klüftigkeit des Kalksteins wurden hierbei über die gesamten Bohrstrecken Tonpellets (‘Compactonit’) eingesetzt.

Die Verfüllung der Bohrungen ist für jede einzelne Bohrung durch ein Verfüllprotokoll nach DIN EN ISO 22475-1 dokumentiert, das Bestandteil der Dokumentation der Bohrarbeiten ist (Anlagen 3).

Bohrgerät für Vollbohrungen (VB)		Referenzbohrung	Ausführung
Bezeichnung	Typ		
VB01	Sedidrill 200	A3-R-N ¹⁾	31.10.2012
		A4-R-N ¹⁾	25.10.2012
		A9-R-N ¹⁾	26.10.2012
		A9-R-NW ²⁾	08.11.2012
VB02	Sedidrill 250	A3-R-W ²⁾	15.11.2012
		A4-R-W ¹⁾	06.11.2012
		A7-R-N-XH ²⁾	15.11.2012
		A7-R-N-XR ¹⁾	14.11.2012
		A7-R-W ²⁾	07.11.2012
VB03	Sedidrill 200	A4-R-NW ²⁾	22.11.2012
VB04	Geo305	nicht zum Einsatz gekommen	
VB05	Beretta T 51	A7-R-S ¹⁾	12.11.2012
		A7-R-NW ²⁾	26.02.2013
VB06	Beretta T 52	A3-R-O ¹⁾	21.11.2012
		A4-R-O ²⁾	13.11.2012
		A7-R-O ²⁾	15.11.2012
VB07	NL1	A7-R-SW ²⁾	23.01.2013
		H100-E9 ²⁾	19.12.2012
VB08	BSR2	A4-R-SO ²⁾	16.01.2013
		A7-R-SO ²⁾	09.01.2013
VB09	Socofamor 50	A4-R-SW ²⁾	22.01.2013
		C80-S1 ²⁾	25.01.2013
VB10	Sedidrill 200	F100-K5 ²⁾	08.02.2013
¹⁾ Einsatz Imlochhammer		²⁾ Einsatz Rollmeißel	

Tabelle 1 Bohrgeräte für die Vollbohrungen in der Beckensohle:
 ausgeführte Referenzbohrungen

Eine Analyse des Verbrauchs an Tonpellets zeigt im Einzelfall einen geringfügigen Minderverbrauch, überwiegend aber einen Mehrverbrauch, der sich unter Berücksichtigung, d.h. Abzug eines planmäßigen Mehrverbrauchs von 10 % des theoretischen Bohrlochvolumens in der Summe aller Bohrungen noch auf rund 18,6 t beläuft. Dieser

nicht unerhebliche Mehrverbrauch ist auf die Klüftigkeit und die angetroffenen Karststrukturen im Malm zurückzuführen.

4.4 Besondere Vorkommnisse

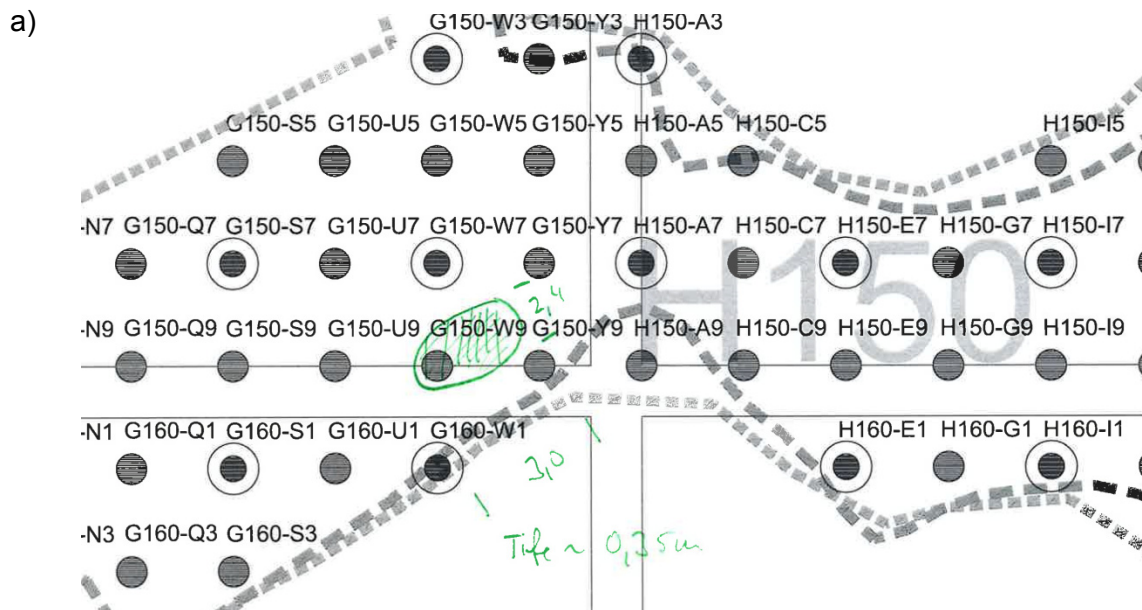
Während bzw. im Zusammenhang mit der Ausführung der Vollbohrungen sind weitere Anomalien bzw. Einbrüche in der Beckensohle eingetreten.

Der erste Vorfall ereignete sich Mitte November 2013, als bei Bohrarbeiten im Quadranten G070 westlich des hier verlaufenden Weges erkennbar wurde, dass in diesem Bereich das sich auf der Beckensohle stauende Niederschlagwasser über eine Fehlstelle in der Dichtung der Beckensohle in die darunterliegende Dränschicht und den Untergrund abströmte. Bereits am 08.10.2012 war von der Betriebsleitung des Kraftwerkes Happurg, Herrn Meyer, gemeldet worden, dass der Dränageauslauf 7 am nordöstlichen Rand des Beckens nach starken Regenfällen vom 06.10. bis 07.10.2012 Wasser führte und dabei auch Sand ausgeschlemmt wurde, bei dem es sich offenkundig um Dränagesand aus der Dränageschicht der Beckensohle handelte. Dieser Sandaustrag und die Sandablagerung in dem Gerinne des Dränageauslaufs 7 hatte bis Mitte November 2013 deutlich zugenommen. Nach einer provisorischen Sanierung der mineralischen Dichtung im Bereich des Quadranten G070 konnte beobachtet werden, dass die Wasserführung und damit auch der Austrag von Dränagesand im Bereich des Dränageauslaufs 7 versiegte.

Der zweite Einbruch ereignete sich am 29.04.2013 im Bereich der Vollbohrungen G150-U9 / G150-W7 / G150-Y9 / G160-W1 (Übergang Quadranten G150 zu G160 und H150). Im Einzelnen können die Erkenntnisse zu diesem Einbruch wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Einbruch lag im südöstlichen Bereich des Beckens im Bereich der Vollbohrung G 150-W9. Der Einbruch lag damit in vergleichsweise geringer Entfernung, nördlich der im Januar 2011 eingetretenen Sohleinbrüche.
- Der Einbruch besaß im Grundriss Abmessungen von etwa 2,4 m mal 3,0 m. Das Schadensbild entsprach demjenigen früherer Einbrüche, d.h. es hatte sich in einer kreisrunden bis elliptischen Fläche eine annähernd ebene Einsenkung ergeben (siehe Bild 5). Das vertikale Versatzmaß betrug etwa 0,35 m.

- Die Vollbohrung G150-W9, die am 26.04.2013 ausgeführt wurde, lag außermittig in der Einbruchfläche. In der Vollbohrung war bis 12,5 m unter der Beckensohle charakteristisches braunes Lockergestein in Form von schluffigen Sanden angetroffen worden, die auffällig vernässt waren.
- In den der Bohrung G150-W9 benachbarten Vollbohrungen G150-W7 im Norden (Lockergestein bis 12,8 m), G150-Y7 im Nordosten (Lockergestein bis 9,1 m), G150-Y9 im Osten (Lockergestein bis 4,6 m) und G160-W1 im Süden (Lockergestein bis 7,5 m) wurden ebenfalls braune Lockergesteine, vermutlich in Form schluffiger Sande, angetroffen.
- Die Ursache für den erneuten Einbruch ist nur schwer eindeutig zu identifizieren. Eine naheliegende Erklärung könnte in der vorlaufenden Ausführung der Vollbohrung G150-W9 in Verbindung mit sehr intensiven Niederschlägen an dem dem Verbruch vorausgehenden Wochenende zu finden sein. Andererseits deutet nichts darauf hin, dass die Bohrung G150-W9 nicht fachgerecht verfüllt wurde. Zudem wurde bereits bei der Ausführung der Bohrung G150-W9 auffällig vernässtes Lockergestein im Tiefenbereich 5,0 m bis 12,5 m unter Beckensohle angetroffen. Außerdem ist festzustellen, dass die Bohrung nicht im Zentrum des Einbruchs liegt. Es ist daher wahrscheinlich, dass in diesem Bereich bereits eine Vorschädigung vorhanden war, gegebenenfalls in Folge der 2011 eingetretenen Einbrüche, die - eventuell in Verbindung mit der Ausführung der Vollbohrung G150-W9 - wahrscheinlich aber in Zusammenhang mit den intensiven Niederschlagsereignissen an dem dem Einbruch vorhergehenden Wochenende zu dem erneuten Einbruch geführt haben.
- Auf Grund der Lage des Einbruchs in einem Bereich mit tiefreichenden Lockergesteinen wurde der Bereich zeitnah provisorisch saniert, um weitere Schäden, insbesondere aber das Eindringen weiteren Oberflächenwassers zu vermeiden.



b)



Bild 5 Einbruch in der Beckensohle im Bereich der Vollbohrung G150-W9 am 29.04.2013. a) Lage des Einbruchs; b) Foto vom 29.04.2013

5 Ergebnisse der Vollbohrungen

5.1 Dokumentation der Ergebnisse der Vollbohrungen

Die Ergebnisse der Vollbohrungen wurden von der ausführenden Bohrfirma in den Anlagen 3 in insgesamt 10 Aktenordnern mit jeweils folgenden Auswertungen dokumentiert:

- a) einer zusammenfassenden graphischen Darstellung der Bohrdaten und der Ansprache des Bohrgeräteführers (in den Unterlagen der Fa. Stöben als 'Bohrprofil' bezeichnet),
- b) dem Schichtenverzeichnis, i.e. der Aufschrieb des Bohrgeräteführers während der Bohrarbeiten;
- c) dem Verfüllprotokoll.

Bild 6 zeigt ein Beispiel für die als 'Bohrprofil' bezeichnete zusammenfassende graphische Darstellung der Bohrdaten und des händischen Aufschriebs (hier beispielhaft für die Vollbohrung C070-L7). Bild 7 dokumentiert an Hand der gleichen Vollbohrung das für das vom Bohrgeräteführer während der Bohrarbeiten geführte Schichtenverzeichnis.

Hierzu sind folgende Erläuterungen zu machen:

- Im Rahmen der Bohrarbeiten wurden folgende Parameter über entsprechende an den Bohrgeräten befestigte Messeinrichtungen automatisch aufgezeichnet und gespeichert:
 - Drehgeschwindigkeit (Drehzahl) [U/min],
 - Drehmoment [bar],
 - effektiver Anpressdruck (Hydraulik Schlitten) [bar],
 - Bohrfortschrittsgeschwindigkeit (Vorschub/Zeit) [m/h],
 - Beschleunigung [bar] bzw. [m/h²].

Von diesen Messwerten sind die Parameter Bohrfortschrittsgeschwindigkeit, Drehmoment und Beschleunigung für jede Bohrung in die zusammenfassenden graphischen Darstellungen (Beispiel: Bild 6) aufgenommen worden, während die Parameter effektiver Anpressdruck und Drehgeschwindigkeit nur in den entsprechenden Datenfiles der Datenbank dokumentiert sind.

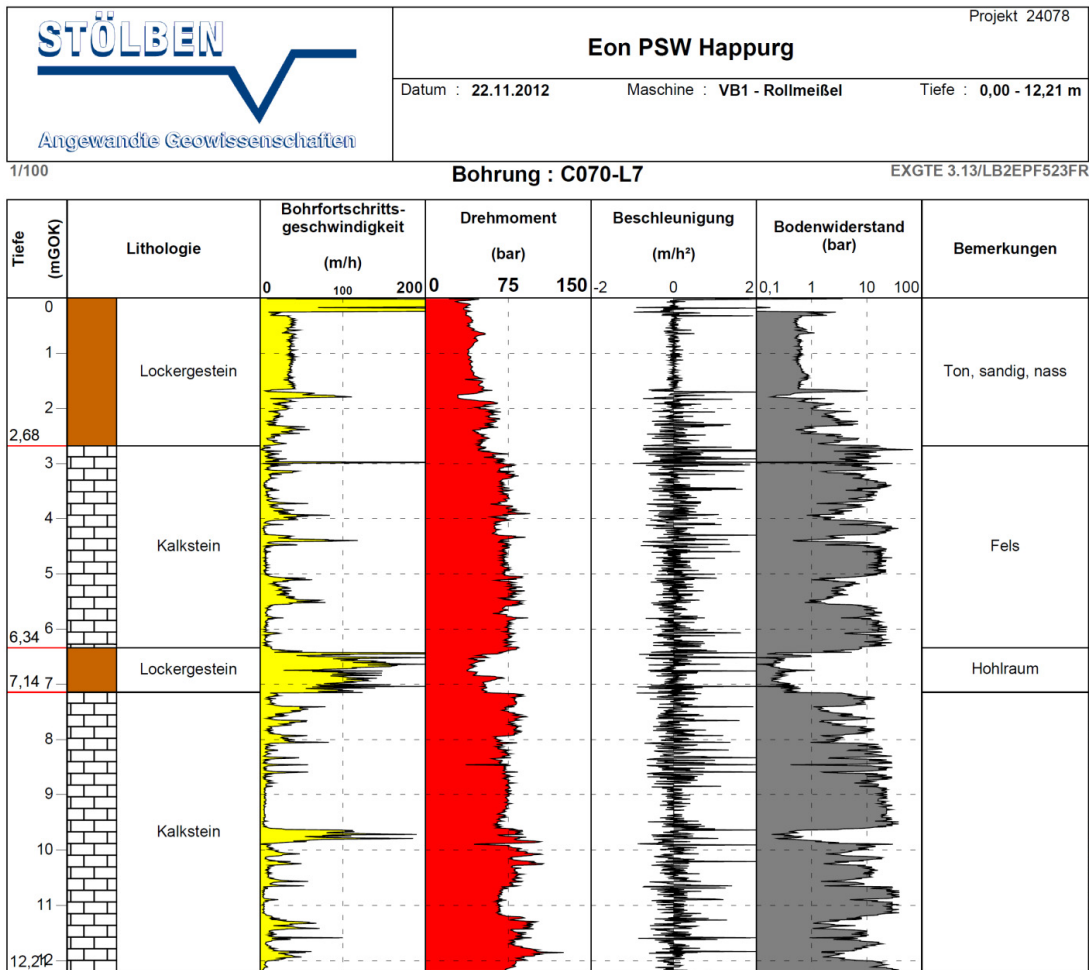


Bild 6 Dokumentation der Erkundungsergebnisse der Vollbohrungen: Beispiel für die Zusammenfassende Darstellung von Bohrdaten und Auswertung händisches Bohrprotokoll (hier Bohrung C070-L7)

Zusätzlich wurde in die graphische Auswertung die Darstellung des „Bodenwiderstands“ mit der Einheit [bar] aufgenommen. Bei diesem Parameter handelt es sich nicht um eine unmittelbar gemessene Größe, sondern eine aus den übrigen Messgrößen abgeleitete Größe, eine Art Summenparameter, der sich aus folgender Beziehung ergibt:

$$\text{Bodenwiderstand} = \frac{\text{effektiver Andruck je Flächeneinheit}}{\text{momentane Geschwindigkeit}} \cdot \text{Normgeschwindigkeit}$$

Projekt / Nr. Eon PSW Happurg / 24078

Bohrungsnummer C070-L7

Bohrgerät VB1 - Rollmeißel

Geräteleiter Lehegarat

Endtiefe GOK: 12,21 m

Datum: 22.11.12

Seite: 1 / 1



Tiefe ab	Boden-/felsart				Farbe				Beschaffen- heit		Austrag		Wasser		Bemerkungen
	Kalk- stein	Locker- gest.	Hohl- raum	Grau- weiss	braun	rot	Hart/ fest	weich	Ja	Nein	trocke	nass			
m														(Tiefe Verrohrung, Durchrutschen, sonstige Farben,...)	
0,00		X			X			X	X			X		Ton, sandig	
2,68	X			X			X		X		X			Fels	
6,34			X											Hohlraum	
7,14	X			X			X		X		X				

Verrohrung bis 9,50 m

Verfüllung mit Quellton: 3,5 Sack à 25Kg

Bild 7 Dokumentation der Erkundungsergebnisse der Vollbohrungen:
 Beispiel für ein händisches Bohrprotokoll (hier Bohrung C070-L7)

Der Andruck je Flächeneinheit wird dabei unter Berücksichtigung des Eigengewichts von Bohrkopf und Bohrgestänge aus dem auf die mit dem Durchmesser des Bohrwerkzeugs (hier: 43,8 cm²) berechnete Fläche bezogenen effektiven Anpressdruck (Andruck abzüglich Gegendruck) ermittelt. Es handelt sich dabei nicht unmittelbar um eine physikalisch bewertbare Größe, sondern um einen qualitativ interpretierbaren Parameter für den resultierenden Widerstand des Gebirges beim Bohrvorgang.

- Während des Bohrvorganges wurde vom Geräteleiter für jede Bohrung ein händisches Bohrprotokoll geführt, auf dem folgende Beobachtungen verzeichnet wurden:
 - die Boden-/Felsart im Sinne der 'Kategorien' Kalkstein / Lockergestein / Hohlraum; die Ansprache der Boden-/Felsart erfolgte dabei auf Basis der Beobachtungen beim Austrag des Bohrgutes und der Staubentwicklung;

- die Farbe des Bohrgutes auf Basis des Austrags und der Staubentwicklung;
- die Beschaffenheit des Gebirges (Kategorien: 'hart/fest' oder 'weich') auf Basis des qualitativen Bohrfortschrittes sowie
- in einer Spalte 'Bemerkungen' eine zusammenfassende Bewertung oder sonstige Auffälligkeiten.

Wie das Beispiel in Bild 7 zeigt, wurden die wesentlichen Parameter in Form einer 'Ankreuzliste' vermerkt, um den Geräteführern im Zuge des raschen Bohrfortschritts neben der Bedienung des Bohrgerätes eine Aufzeichnung zu ermöglichen.

- Die beispielhafte Darstellung in Bild 6 zeigt die Ergebnisse des automatischen Bohrdatenaufschriebs im Abgleich mit dem händischen Aufschrieb, der basierend auf dem Bohrprotokoll (Bild 7) in die Spalte 'Lithologie' übernommen wurde, wobei durch die Signatur die angesprochene Boden-/Felsart als Kategorie Kalkstein, entfestigter Kalkstein, Lockergestein oder Hohlraum erkennbar wird und durch die gewählte Farbe der Signatur die während der Bohrarbeiten angesprochene Farbe des Bohrgutes dokumentiert wird.

Aus der hier beispielhaft für die Vollbohrung C070-L7 aufgetragenen Darstellung wird deutlich, dass im Bereich von Lockergesteinen die Bohrfortschrittsgeschwindigkeit deutlich ansteigt, zugleich der Bodenwiderstand deutlich abfällt.

- Ein weiteres Beispiel für die Korrelation zwischen händischem Bohrprotokoll und den automatisch erfassten Bohrdaten zeigt Bild 8 an Hand der Vollbohrung G090-H5. In der abgebildeten graphischen Auswertung ist deutlich zunächst bis 1,8 m Tiefe unter Bohransatzpunkt die Lockergesteinsfolge der Beckensohle erkennbar, bevor bis ca. 3,5 m eine Partie folgt, die an Hand des erhöhten Bodenwiderstandes wie auch des Verlaufs der Bohrbeschleunigung in Übereinstimmung mit dem vom Bohrgeräteführer protokollierten weißen Austrag von Kalksteinstaub als Kalkstein identifiziert werden kann, der aber, wie das händische Bohrprotokoll vermerkt „entfestigt“ ist, was auch die hier noch erhöhte Bohrfortschrittsgeschwindigkeit bestätigt. Zwischen 3,5 m und 6,5 m Tiefe folgt weitgehend kompakter Kalkstein bevor zwischen 6,5 m und 11,1 m eine mit bräunlich gefärbten Lockergestein gefüllte Karststruktur folgt, die nicht nur in dem händischen Bohrprotokoll entsprechend vermerkt wurde, sondern sich auch in den Bohrdaten in Form eines deutlich erhöhten Bohrfortschritts und eines gegen Null gefallenem Bodenwiderstandes widerspiegelt; ein Indikator für die weitgehend steinfreie Lockergesteinsfüllung sind die geringen Beschleunigungen in diesem Bereich. Ab 11,1 m Tiefe

folgt wiederum Kalkstein, der - wie die Bohrdaten zeigen - von einigen lokalen Kluft- bzw. Karststrukturen (u.a. bei 12,2 m bis 12,4 m und 15,0 m bis 15,3 m) durchzogen ist. Die Vollbohrung G090-H5 dokumentiert damit eine Situation, bei der eine 4,6 m mächtige, lockergesteinsgefüllte Karststruktur unter einer Kalksteindecke ansteht und die damit für die durch die geophysikalische Erkundung indizierten Verdachtsbereiche (Bild 1) erwartet worden waren.

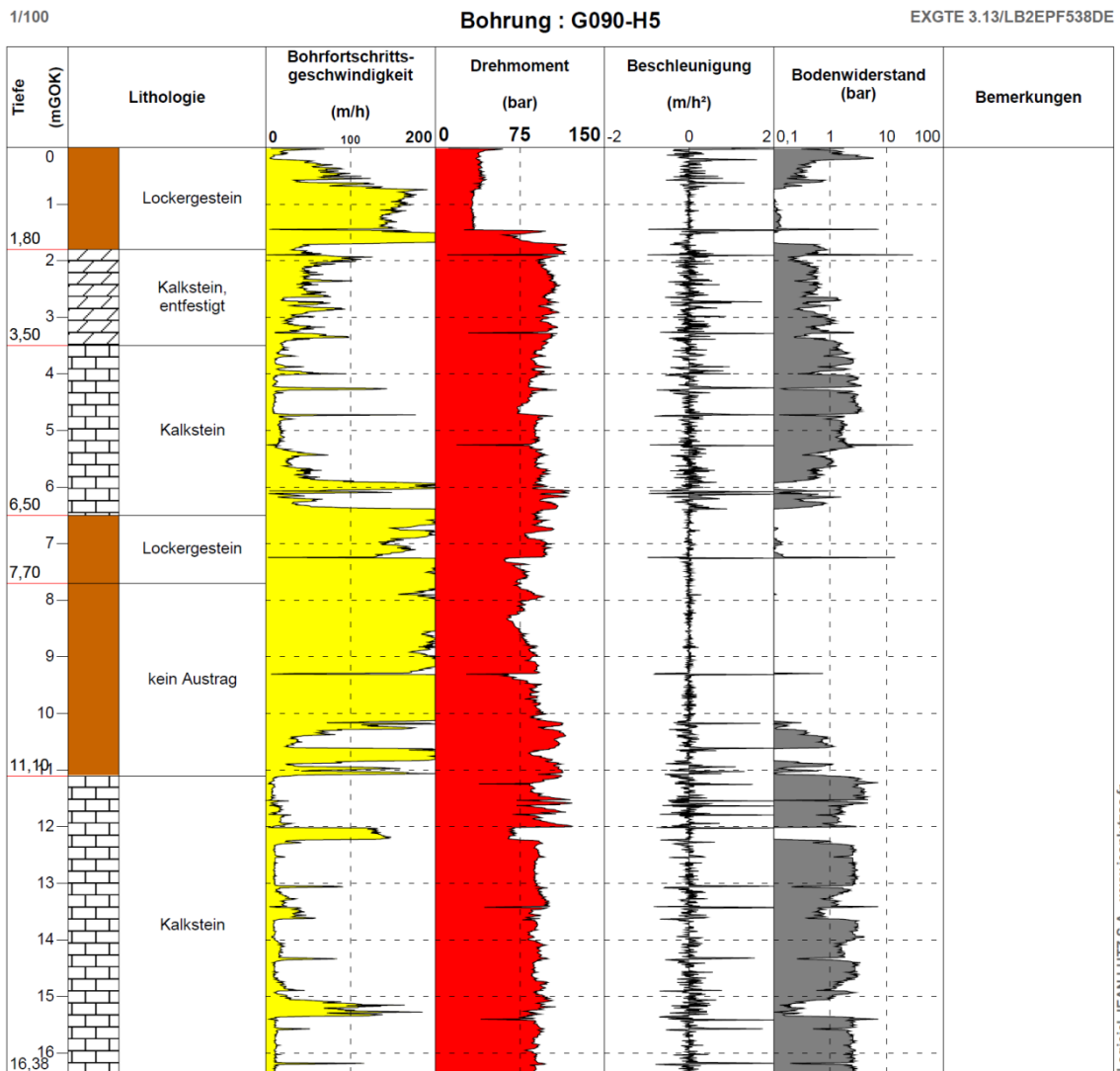


Bild 8 Dokumentation der Erkundungsergebnisse der Vollbohrungen:
 Zusammenfassende Darstellung von Bohrdaten und Auswertung
 händisches Bohrprotokoll für Vollbohrung G090-H5

Die kleinräumig wechselnde Verkarstung der Kalksteine des Malm und die hieraus resultierende Komplexität der Baugrundsituation im Bereich des Oberbeckens spie-

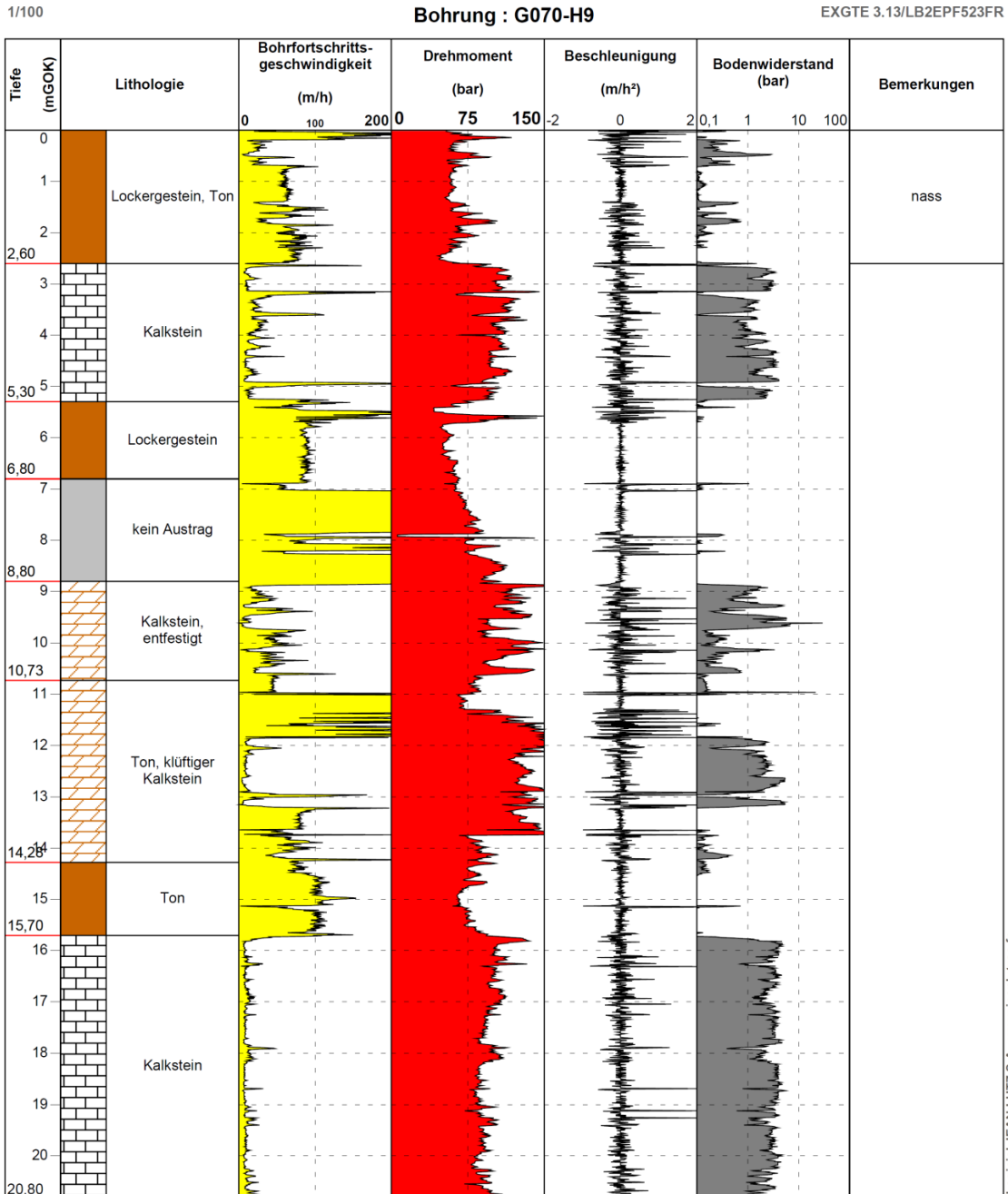


Bild 9 Dokumentation der Erkundungsergebnisse der Vollbohrungen:
 Zusammenfassende Darstellung von Bohrdaten und Auswertung
 händisches Bohrprotokoll für Vollbohrung G070-H9

gelt sich in zahlreichen Vollbohrungen wieder. Beispielhaft ist in Bild 9 die graphische Darstellung der Ergebnisse der Kernbohrung G070-H9 abgebildet. Die Bohrung zeichnet sich durch mehrere lockergesteinsgefüllte Karststrukturen und stark geklüftete Kalksteinpartien aus, wobei sich auch hier eine gute Korrelation zwischen der Ansprache des Bohrgeräteführers ('Lithologie') und den automatischen Bohrdaten zeigt.

5.2 Ergebnisse der Referenzbohrungen

Die Ergebnisse der mit einem Rollmeißel durchgeführten Referenzbohrungen lieferten hinsichtlich der Ansprache des Bohrgeräteführers wie auch hinsichtlich der automatisch aufgezeichneten Bohrdaten eine gute Übereinstimmung mit den benachbarten Kernbohrungen aus dem Februar 2012.

Als Beispiel für den Abgleich zwischen einer mit einem Rollenmeißel durchgeführten Referenzbohrung und dem Ergebnis der Kernbohrung gibt Bild 10 die graphische Darstellung der Bohrdaten der mit dem Bohrgerät VB 08 ausgeführten Referenzbohrung A4-R-SO wieder, die am 16.01.2013 rund 2 m südöstlich der Kernbohrung A4/2012 ausgeführt wurde.

Die im Abgleich von Vollbohrung und Kernbohrung feststellbaren Abweichungen hinsichtlich der Tiefe der mächtigen lockergesteinsgefüllten Karststruktur sowie hinsichtlich der durch die Referenzbohrung indizierten weiteren Karststrukturen im tieferen Kalkstein sind erfahrungsgemäß auf die auch auf kurzer Distanz variierenden Ausbildung der Karststrukturen zurückzuführen.

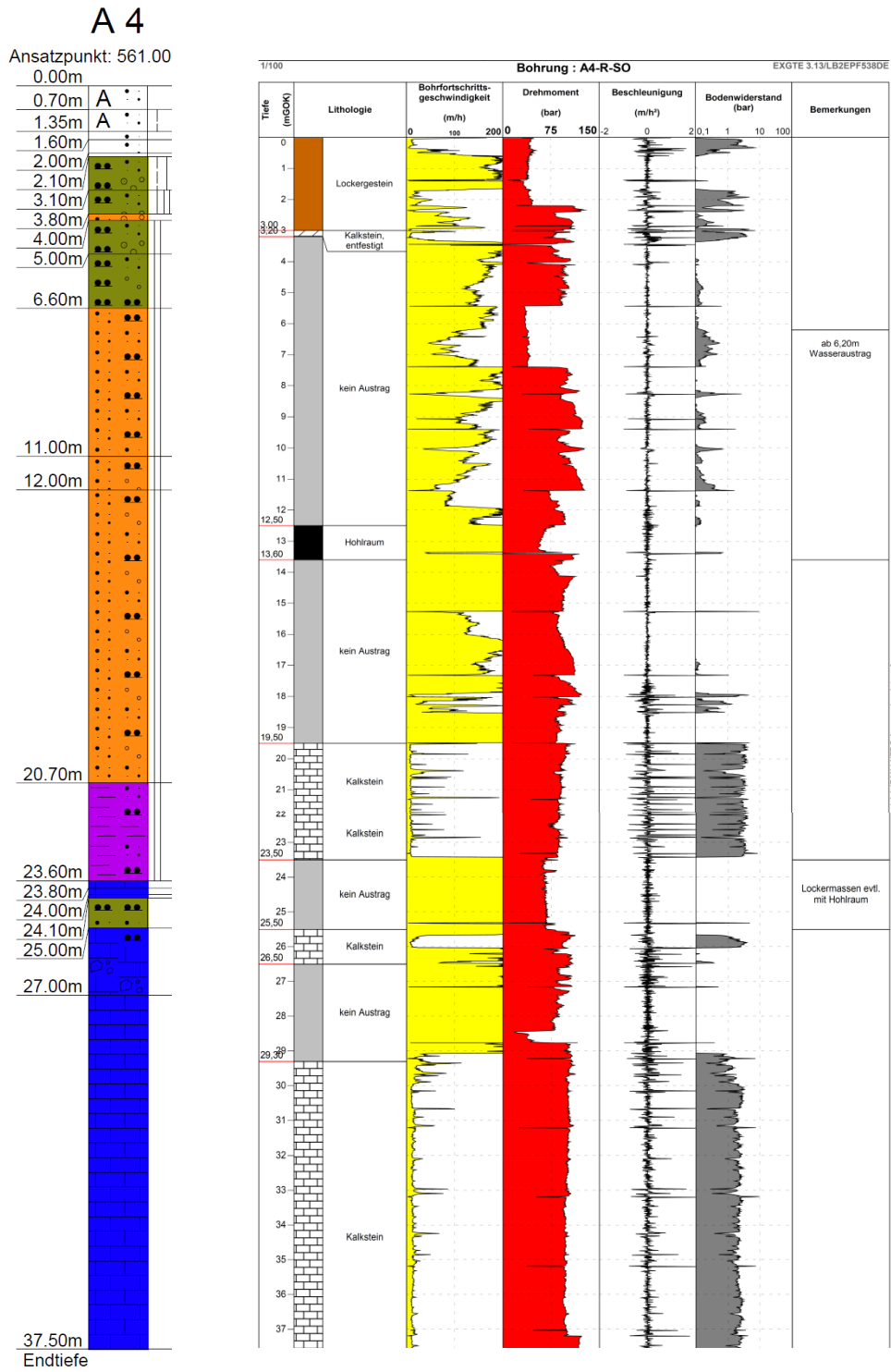


Bild 10 Abgleich zwischen Referenzbohrung A4-R-SO und Kernbohrung A4/2012

5.3 Ausführungsbegleitende Auswertung

Während der Bohrarbeiten wurden neu gewonnene Bohrdaten in der Regel arbeits-täglich ausgewertet und hinsichtlich ihrer wesentlichen Ergebnisse in Lagepläne über-tragen. Auf dieser Basis konnte im Abgleich zwischen benachbarten Vollbohrungen und in der Gesamtschau der sich sukzessive verdichtenden Erkundungsergebnisse die Ausdehnung von Anomalien und Karststrukturen beurteilt werden und fachgut-achterliche Aussagen zu einer gegebenenfalls erforderlichen Vergrößerung der Er-kundungstiefe einzelner Bohrungen getroffen werden.

Zudem wurden die händischen Aufzeichnungen der Bohrgeräteführer mit den eige-nen unabhängigen Aufzeichnungen der Fachbauleitung verglichen und erforderli-chenfalls Auffälligkeiten bzw. Abweichungen aufgeklärt.

5.4 Nachlaufende Auswertung

In einem weiteren nachlaufenden Schritt wurde für jede Bohrung das vom Gerätefüh-rer händisch aufgezeichnete Bohrprotokoll mit den Ergebnissen der automatischen Bohrdatenschreiber abgeglichen und sich dabei ergebenden Diskrepanzen überprüft. Dabei wurde den Ergebnissen der automatischen Bohrdatenschreiber bedingt durch deren Objektivität und Kontinuität in der Regel die größere Aussagekraft zugewiesen.

Basierend auf dieser fachgutachterlichen Bewertung der Ergebnisse der Bohrdaten-aufschriebe wurde bei etlichen Bohrungen die Darstellung der Lithologie an die aus den Bohrdatenaufschrieben ableitbaren Verhältnisse angepasst.

Die entsprechend unseren Vorgaben angepassten graphischen Darstellungen von Bohrdaten und händischem Bohrprotokoll ('Lithologie') wurden für die betroffenen Vollbohrungen von der ausführenden Bohrfirma in Anlage 4 („Korrigierte Bohrprofile der Vollbohrungen“) dokumentiert. Diese Bohrprofile wurden unserer Fachgutachterli-chen Bewertung in Abschnitt 6 zu Grunde gelegt.

6 Fachgutachterliche Bewertung

In der Nachbereitung wurde jede einzelne Vollbohrung sorgfältig fachgutachterlich auf der Basis der graphischen Darstellung der händischen Bohrprotokolle und der automatisch aufgezeichneten Bohrparameter hinsichtlich des zu Grunde liegenden Baugrundaufbaus analysiert und bewertet.

Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengefasst, um in komprimierter Form möglichst detaillierte Erkenntnisse bereit stellen zu können.

Die in Anlage 5 auf insgesamt 57 Tabellenseiten dokumentierte Auswertung enthält für jede Vollbohrung der 6. Erkundungsphase folgende Angaben:

- Bezeichnung der Vollbohrung,
- geodätisch eingemessener Rechts- und Hochwert der Vollbohrung;
- Ansatzhöhe der Vollbohrung / Bestandsniveau Beckensohle;
- geforderte Einbindetiefe im kompakten Kalkstein;
- ausgeführte Bohrlänge der Vollbohrung [m] und Niveau UK Bohrung;
- Lockergesteinsmächtigkeit unter der Beckensohle und unter dem mit 1,5 m angenommenen Regelaufbau der Beckensohle;
- die Höhenlage der Oberfläche des 'klüftigen' Kalksteins, wobei der Kalkstein unterhalb dieses Niveaus noch klüftig sein und wechselnde Festigkeiten aufweisen kann, jedoch nicht in erheblichem Umfang verkarstet ist;
- die Höhenlage der Oberfläche des 'massiven' Kalksteins, unter der dieser mit der geforderten Mächtigkeit von 5 m bzw. 10 m als weitgehend 'kompakt' und nicht oder allenfalls untergeordnet klüftig ansteht;
- für die erste und zweite „Kalksteindecke“, d.h. von lockergesteinsgefüllten Karststrukturen unterlagerten Kalksteinpartien, die Oberkante und Unterkante der Kalksteindecke;
- für die (erste größere in einer Bohrung angetroffene) Karststruktur die Oberkante und Unterkante;
- eine verbale Beschreibung des Lockergesteins und des 'klüftigen' Kalksteins inklusive möglicher Karststrukturen/Hohlräume und überlagernder Kalksteindecken,
- eine verbale Beschreibung des „liegenden“ Kalksteins, d.h. unterhalb der Oberfläche des 'massiven' Kalksteins
- das Datum der Ausführung der Vollbohrung,

- eine mögliche unabhängige fachgutachterliche Begleitung und Aufnahme der Vollbohrung während der Ausführung,
- das für diese Vollbohrung eingesetzte Bohrgerät,
- eine zusammenfassende gutachterliche Beschreibung und Bewertung der jeweiligen Vollbohrung sowie eine erste Einschätzung des möglichen Sanierungsbedarfs, der aber vom Planer noch ganzheitlich zu bewerten und differenziert zu planen ist. Dieser fachgutachterlichen Bewertung wurde dabei nicht nur die jeweilige Vollbohrung zu Grunde gelegt, sondern stets auch die Ergebnisse der im Umfeld liegenden, benachbarten Vollbohrungen berücksichtigt, um u.a. die Ausdehnung von Karststrukturen zu beurteilen.

Diese tabellarisch Auswertung und fachgutachterliche Bewertung der Vollbohrungen bildet das zentrale Ergebnis der ausgeführten rasterförmigen Erkundung der außerhalb der Versturzzone liegenden Beckensohle und sollte den weiteren Planungen zur Sanierung zu Grunde gelegt werden.

Auf der Basis dieser tabellarischen Auswertung wurde ferner eine zeichnerische Darstellung der Ergebnisse der Vollbohrungen im Grundriss des Oberbeckens abgeleitet (Anlagen 6). Hierzu werden für alle Vollbohrungen in insgesamt vier Lageplänen folgende Angaben zahlenmäßig dargestellt (beispielhafter Ausschnitt in Bild 11):

- die Bezeichnung der Vollbohrung,
- die geodätisch eingemessene Höhe des Bohransatzpunktes [mNN],
- in grüner Schrift die Unterkante der Lockergesteinsmächtigkeit unter dem Bohransatzpunkt [m]; ein zweiter, in Klammern gesetzter Wert beschreibt die Tiefe [m], bis zu der der Kalkstein unter dem Bohransatzpunkt entfestigt bzw. stark klüftig ist;
- darunter in roter Schrift, wiederum bezogen auf den Bohransatzpunkt, die Oberkante und Unterkante von mit Lockergestein gefüllten, im Einzelfall auch offenen Karststrukturen, wobei bei mehreren, über die Erkundungstiefe aufgeschlossenen Karststrukturen die Angaben für alle Karststrukturen untereinander notiert werden; bei in Klammern gesetzten Angaben in roter Schrift handelt es sich um Anomalien, die als Zonen stark klüftigen Kalksteins, nicht jedoch als (lockergesteinsgefüllte) Karststrukturen interpretiert wurden.

Basierend auf der unter dem Bohransatzpunkt angetroffenen Lockergesteinsmächtigkeit ist das Symbol der jeweiligen Vollbohrung farbig angelegt (Bild 11).

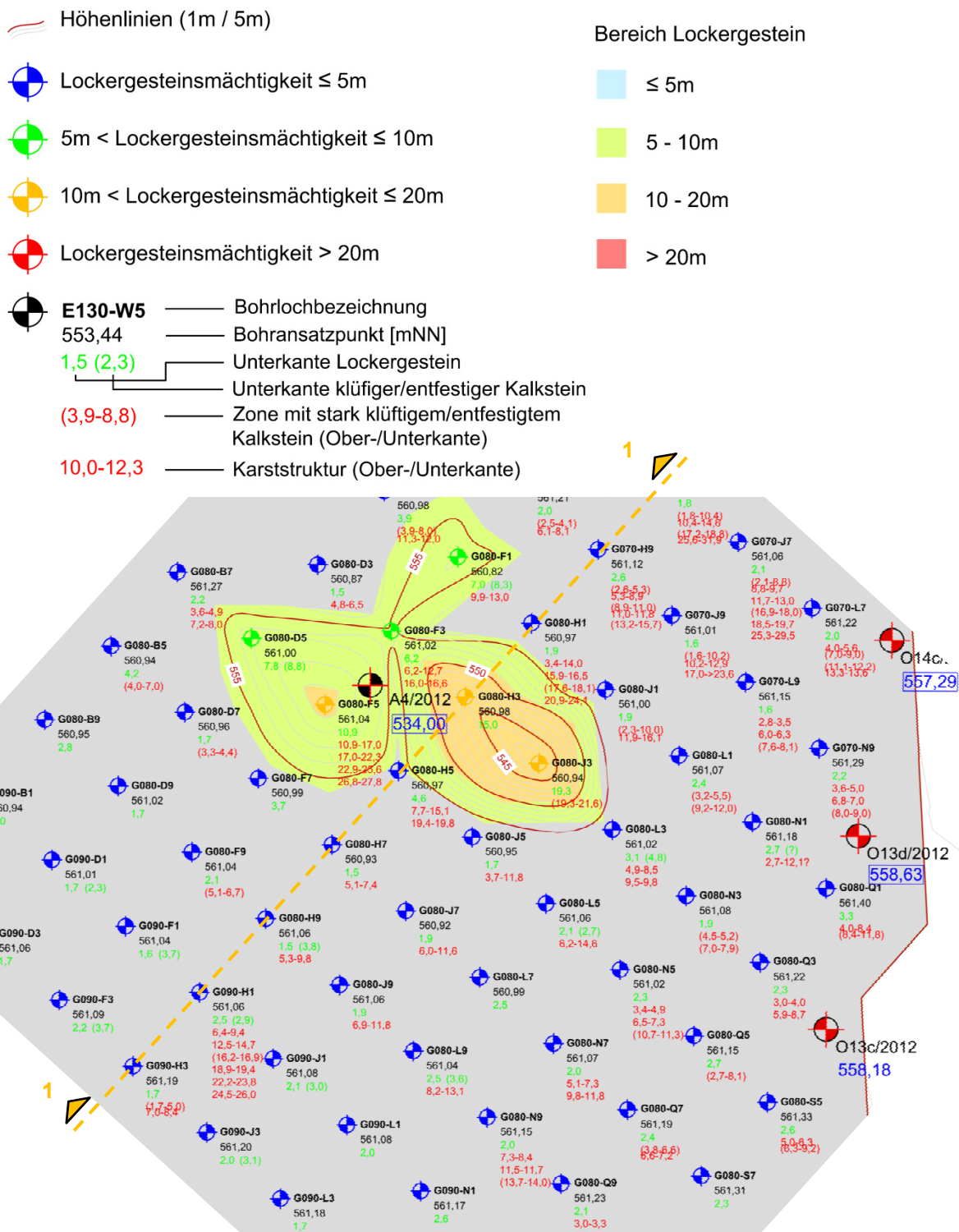


Bild 11 Zeichnerische Darstellung der Auswertung und Bewertung der Ergebnisse der Vollbohrungen im Grundriss (Ausschnitt Teilfläche)

Die Darstellung der Ergebnisse der Vollbohrungen im Grundriss, hier beispielhaft in Bild 11 zeigt, dass in zahlreichen Bohrungen komplexe Karststrukturen angetroffen wurden, wodurch die Beurteilung der Baugrundverhältnisse als räumlich variable Situation erschwert wird. Ein besseres Verständnis der im Kalkstein außerhalb der Versturzzone angetroffenen Verhältnisse erlaubt die Betrachtung von vertikalen Schnitten. Beispielhaft für drei ausgewählte Bereiche werden die Ergebnisse der Vollbohrungen daher in Anlage 12 in drei Baugrundschnitten ausgewertet. Bild 12 zeigt beispielhaft die Auswertung für einen auch in Bild 11 ausschnittsweise dargestellten Schnitt im Bereich der Quadranten G080 und G090 im östlichen Beckenbereich. Neben den unmittelbaren Ergebnissen der Vollbohrungen werden interpolierend die Schichtanteile dargestellt, wobei orange hinterlegt Lockergesteine (Sande, Schluffe), hellblau hinterlegt stark klüftige und entfestigte Kalksteinpartien, hellgrün hinterlegt klüftige Kalksteinpartien und in dunkelgrüner Färbung als weitgehend kompakt erkundeter Kalkstein angelegt sind. Die Darstellung im Schnitt lässt die Ausdehnung der lockergesteinsgefüllten Karststrukturen, die bereichsweise von einer „Kalksteindecke“ überlagert werden, gut erkennen.

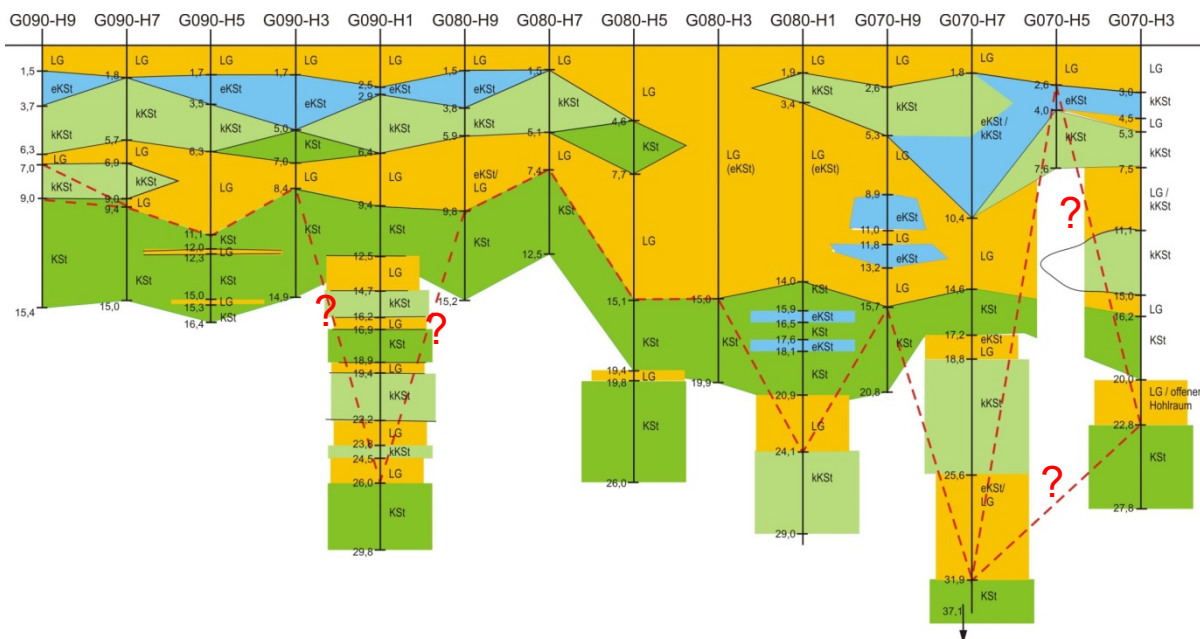


Bild 12 Zeichnerische Darstellung der Auswertung und Bewertung der Ergebnisse der Vollbohrungen in einer Teilfläche (Schnittführung in Bild 11: Schnitt 1-1)

Aus den Ergebnissen der im Februar 2012 ergänzend ausgeführten Kernbohrungen ergeben sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse:

- Gegenüber dem Regelaufbau der Beckensohle [U01], der eine Regelmächtigkeit von rund 1,50 m hat, werden verbreitet mächtigere Lockergesteinsmächtigkeiten unter der Oberfläche Beckensohle (Bohransatzpunkt) erkundet, die häufig zwischen 1,5 m und 2,5 m betragen. Diese größere Lockergesteinsmächtigkeit wird in der Interpretation vorläufig darauf zurückgeführt, dass bei der Herstellung des Beckens geologisch eine profilgerechte Herstellung des Planums im Kalkstein nicht möglich war, vielmehr geologisch bedingter Mehraushub in dem klüftigen Kalkstein angefallen ist, der bei der Herstellung des Planums durch Lockergesteinsauffüllungen ausgeglichen wurde. Es ist daher damit zu rechnen, dass nach dem Rückbau der Beckensohle unter der Dränageschicht in weiten Bereichen nicht unmittelbar die Kalksteinoberfläche angetroffen wird, vielmehr zur Freilegung und Kartierung der Kalksteinoberfläche weiter Lockergesteinsüberdeckungen entfernt werden müssen.
- Unter der Beckensohle und - wie vor beschrieben - bereichsweise vorhandenen Ausgleichsschichten ist der anstehenden Kalkstein oft oberflächennah bis in Tiefen von 3 m bis 4 m unter Beckensohle nach den Ergebnissen der Vollbohrungen stark geklüftet und bereichsweise entfestigt.
- Im Kalkstein wurden in den untersuchten Verdachtsflächen verbreitet Karststrukturen angetroffen, deren Mächtigkeit und räumliche Ausdehnung auch kleinräumig stark variiert. Dabei handelt es sich gleichermaßen um wenige Dezimeter mächtige, durch Verkarstung aufgeweitete Kluffstrukturen wie um mehrere Meter mächtige, höhlenartige Karststrukturen, die überwiegend mit bräunlichen und bräunlich-roten Lockergesteinen und einzelnen Steinen und Blöcken aus Kalkstein gefüllt sind. Die Ausdehnung solcher Karststrukturen in den untersuchten Verdachtsflächen ist erheblich.
- Die Komplexität und Charakteristik der Karststrukturen erschließt sich in besonders geeigneter Weise durch die Betrachtung von vertikalen Schnitten (Beispiel: Bild 12) Die Auswertung zeigt beispielhaft, dass
 - bereichsweise lockergesteinsgefüllte Karststrukturen über große laterale Erstreckungen von 20 m, 30 m und mehr nachgewiesen werden können;
 - oft aber auch die Bohrerergebnisse zwischen horizontal nur 5 m voneinander entfernt liegenden Bohrungen nicht miteinander korreliert werden können, da ein-

zelne Karststrukturen offenkundig räumlich eng begrenzt auftreten; die laterale Erstreckung von Karststrukturen kann in diesem Fall nur innerhalb des Rasters der Vollbohrungen beurteilt werden, so dass in diesem Fall auf der sicheren Seite liegend von möglichen lateralen Erstreckungen der angetroffenen Karststrukturen von maximal 10 m (bei Raster Vollbohrungen von 5 m) bzw. in größerer Tiefe von maximal 20 m (bei Raster Vollbohrungen von 10 m) auszugehen ist;

- sich mächtige Karststrukturen in einzelnen Bohrungen bis in große Tiefen, in dem in Bild 12 dargestellten Schnitt bis in Tiefen von 30 m und mehr unter Beckensohle erstrecken können;
 - es verbreitet Bereiche in der Beckensohle gibt, in denen - wie durch die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen indiziert - unter einer teils entfestigten und/oder klüftigen, teils weitgehend kompakten Kalksteindecke lockergesteinsgefüllte, lateral aushaltende Karststrukturen anstehen.
- Die Ergebnisse der Vollbohrungen korrelieren weitgehend mit den auf der Basis der geophysikalischen Messungen abgeleiteten Prognosen und Erwartungen. Insbesondere wurden gegenüber der geophysikalischen Faktenkarte von 2011 keine weiteren ausgedehnten Anomalien und Karststrukturen im Kalkstein außerhalb der Versturzzone angetroffen.

Bei dem in der tabellarischen Auswertung in Tabelle 5 angegebenen Sanierungsbedarf handelt es sich um eine Erstbewertung, die im Zuge der Sanierungsplanung zu überprüfen und fortzuschreiben ist. In diesem Zusammenhang ist in Abhängigkeit von den aus dem Betrieb des Oberbeckens abgeleiteten Anforderungen an das Sanierungskonzept im Einzelnen der Umfang und das geeignete Verfahren für eine Sanierung festzulegen.

7 Resümee und Ausblick

Im Rahmen der vorlaufenden Erkundungsphasen war es mit den Mitteln der Geophysik nicht möglich, die durch diese Messungen indizierten Anomalien hinsichtlich ihrer Ausbildung näher zu identifizieren, das heißt zuverlässig zu klären, ob es sich um echte Hohlräume, um verfüllte Karststrukturen oder lediglich um eine erhöhte Klüftigkeit des Kalksteins handelt.

Mit den rasterförmig in der Beckensohle ausgeführten Vollbohrungen konnten die durch die geophysikalischen Messungen indizierten Verdachtsbereiche überprüft und dabei sowohl hinsichtlich ihrer räumlichen Ausdehnung überprüft und eingegrenzt als auch hinsichtlich ihrer Ausbildung und Beschaffenheit konkretisiert werden.

Hierdurch bedingt ergibt sich bereits vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen für die außerhalb der Versturzzone liegenden Bereiche der Beckensohle ein deutlich konkreteres und zuverlässigeres Bild von der Baugrundsituation, insbesondere von der Verbreitung und Ausdehnung von stärker geklüfteten Partien und Verkarstungen des Kalksteins (Malm), so dass die diesbezüglich zuvor auf Basis der bisherigen Erkundungsergebnisse bestehenden Unsicherheiten deutlich reduziert werden konnten.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Indikation der geophysikalischen Komplexinterpretation durch die Ergebnisse der in der Beckensohle in den Verdachtsflächen außerhalb der Versturzzone durchgeführten Vollbohrungen weitgehend bestätigt wurde. Die fachgutachterliche Bewertung der Ergebnisse der Vollbohrungen indiziert, dass die durch - gegebenenfalls auch sanierungsbedürftige - Anomalien im Kalkstein betroffene Gesamtfläche gegenüber der Indikation der vorhergehenden Erkundungsphasen eingegrenzt, das heißt auch, reduziert werden konnte.

Auf der Basis der fachgutachterlichen Bewertung der Ergebnisse der Vollbohrungen (Anlage 5) können Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer räumlichen Erstreckung wie auch hinsichtlich des Verfahrens zielgerichtet geplant werden. Dabei ist besondere Aufmerksamkeit Situationen zu widmen, in denen unter einer begrenzt mächtigen Kalksteindecke lockergesteinsbedingte Hohlraumstrukturen anstehen, so dass es in diesem Fall erforderlich werden kann, die Kalksteindecke zu durchhören, um die darunter folgenden Karststrukturen dauerhaft zu stabilisieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf Grund der unregelmäßigen Klüftung des Kalksteins und den oft mehrere Meter aushaltenden vertikalen Klüften keine zuverlässigen Aussagen zur Tragfähigkeit dieser Kalksteindecken möglich sind, so dass in der Regel Sanierungsmaßnahmen erforderlich werden, wobei neben der Durchhörterung der Kalksteindecken

und Stabilisierung der Lockergesteinsfüllungen der Karststrukturen mit säulenartigen Tragelementen auch eine Verbesserung von lockergesteinsgefüllten Karststrukturen mit Manschettenrohrinjektionen ('Compaction Grouting') grundsätzlich denkbar ist, um mögliche lockere Partien und 'Schläfer', also durch hydraulischen Austrag von Lockergestein bereits entstandene Hohlräume, in ihrer Auswirkung auf die Kalksteindecke und damit die Beckendichtung zu beherrschen.

Es ist gleichwohl zu berücksichtigen, dass es sich bei den ausgeführten Vollbohrungen um 'Tastbohrungen' handelt, die anders als Kernbohrungen kein unmittelbares und damit eindeutiges Abbild der aufgeschlossenen Baugrundsituation liefern. Die Ergebnisse der Kernbohrungen sind daher interpretationsbedürftig und -fähig, so dass Unschärfen in der Beurteilung der Ausbildung von Anomalien systemimmanent nicht nur möglich, sondern unvermeidlich sind. So kann im Einzelfall nicht zuverlässig die Ausprägung der Klüftigkeit des Kalksteins an sich, aber auch in Abgrenzung von lockergesteinsgefüllten Karststrukturen beurteilt werden.

Es erscheint sinnvoll, in Einzelfällen die durch die bisher ausgeführten Vollbohrungen aufgezeigten Anomalien im Zusammenhang mit den Sanierungsarbeiten zunächst ergänzend durch eine Verdichtung des Bohrrasters auf z.B. 2,5 m mal 2,5 m zu untersuchen, um den Sanierungsbedarf weiter eingrenzen zu können oder nicht eindeutig beurteilbare Situation näher zu untersuchen.

Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen, dass auch außerhalb der Versturzzone mit einer außerordentlich komplexen Baugrundsituation zu rechnen ist.

Eine ausführungsbegleitende Überprüfung der Untergrundsituation ist daher zwingend erforderlich, da die bei der Bauausführung gewinnbaren Erkenntnisse, im vorliegenden Fall beispielsweise durch die visuelle Inaugenscheinnahme der vom Dichtungssystem abgedeckten Beckensohle oder der durch den Rückbau des Ringdammes freigelegten Dammaufstandsfläche, mit jeder noch so sehr intensivierten vorlaufenden Erkundung hinsichtlich Erkenntnistiefe, Erkenntnisumfang und Erkenntnisqualität nicht erreicht werden können.

Für die im Zuge der Ausführung im Ergebnis der ausführungsbegleitende Überprüfung der Untergrundsituation gegebenenfalls erforderlichen Sanierungsfälle sind vorab für alle denkbaren Szenarien bauliche Sanierungsmaßnahmen zu planen, die während der Ausführung im Sinne eines vorbereiteten und mit den Genehmigungsbehörden, Prüferingenieur und Baufirma abgestimmten Maßnahmenkatalogs unter

Aufsicht des Geotechnischen Fachgutachters des Auftraggebers zur Anwendung kommen können.

Eine Überprüfung und kontinuierliche Fortschreibung des Baugrundmodells während der baubegleitenden Erkundungs- und Sanierungsarbeiten ist daher zwingend erforderlich. Dabei können identifizierte Karststrukturen auch durch ergänzende Erkundungen, insbesondere Vollbohrungen, in ihrer räumlichen Ausdehnung weiter eingegrenzt und so der Sanierungsbedarf reduziert bzw. verifiziert werden.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann
Direktor des Institutes für Geotechnik der Universität Stuttgart
von der Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart
öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Erdbau, Grundbau, Felsbau sowie Spezialtiefbau

Anlagenverzeichnis

Anlage

Lagepläne

- Lageplan - Geophysikalische Faktenkarte (Phase 2) als Ergebnis der zweiten geophysikalischen Messkampagne (Anlage 12 aus [U03]) 1.1
- Lageplan - Abgrenzung der ergänzenden Erkundungsbereiche auf Basis der geophysikalischen Faktenkarte (2. Phase) 1.2
- Lageplan – Ergänzende Erkundung 2012/2013 (Erkundungsphase 4 und 6) 1.3
- Lageplan - Ergänzende Erkundung 2012/2013 in der Beckensohle (Erkundungsphase 6), Einteilung Bohrraster 1.4

Fotodokumentation

- Fotodokumentation der Ergänzenden Erkundung 2012/2013 (Erkundungsphase 6) in der Beckensohle mittels Vollbohrungen 2

Ergebnisse der Vollbohrungen

- Dokumentation der Fa. Stölben GmbH (10 Aktenordner, Ordner I bis X), separate Ordner 3

Korrigierte Bohrprofile der Vollbohrungen

- Dokumentation der Fa. Stölben GmbH: Änderungen April 2014, 1 separater Ordner 4

Fachgutachterliche Bewertung der Vollbohrungen

- Tabellarische Auswertung, Dokumentation und fachgutachterliche Bewertung der Ergebnisse der Vollbohrungen 5

Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse und fachgutachterlichen Bewertung der Vollbohrungen in Lageplänen

- Beckensohle Nord 6.1
- Beckensohle Ost 6.2

- Beckensohle Süd 6.3
- Beckensohle West 6.4

**Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse und fachgutachterlichen
Bewertung der Vollbohrungen in ausgewählten Schnitten**

- Lageplan Schnitt 1 und 2 7.1.1
- Darstellung der Erkundungsergebnisse für Schnitt 1 7.1.2
- Darstellung der Erkundungsergebnisse für Schnitt 2 7.1.3
- Lageplan Schnitt 3 7.2.1
- Darstellung der Erkundungsergebnisse für Schnitt 3 7.2.2