

Über 60 Jahre Geophysikalische Dienste in Leipzig

Geophysik GGD



Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste mbH

Telefon (0341) 5 83 13 0

Telefax (0341) 5 83 13 33

info@geophysik-ggd.com

www.geophysik-ggd.com

Ehrensteinstraße 33 • 04105 Leipzig



Ergebnisbericht

**Pumpspeicherwerk Happurg,
Sanierung Oberbecken**

Geophysikalische Erkundung

**Nachtrag
2. Erkundungsphase**

**Geoelektrik (Ergänzung)
Gravimetrie**



Ergebnisbericht

Messgebiet: Pumpspeicherwerk Happurg, Oberbecken

Auftragsnummer: 31016

Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH
Luitpoldstraße 27
84034 Landshut

Methodik: 2D-Geoelektrik und Gravimetrie

Feldarbeiten: Geoelektrik: 13.10. – 20.10. & 24.10. - 28.10.2011
Gravimetrie: 02.11. – 19.11. & 28.11.2011

Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Tel.: 0341 58313-42

Dipl.-Geophys. D. Wein
Tel.: 0341 58313-12

Editor: Dipl.-Geophys. Dr. R. Scheibe
Tel.: 0341 58313-15

Anlagen: Anlagen 7 - 12 mit fortlaufender Nummerierung des ersten Berichtes (19 Blatt)

Ort und Datum: Leipzig, den 22.12.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung.....	6
2	Geoelektrik	7
2.1	Feldarbeiten.....	7
2.2	Datenbearbeitung und Darstellung der Messergebnisse.....	9
2.3	Interpretation Geoelektrik.....	9
2.4	Komplexinterpretation (Vertikalschnitte, Felsrelief, Faktenkarte).....	10
3	Gravimetrie	11
3.1	Messkonzept	11
3.2	Anlage und Durchführung der gravimetrischen Messungen.....	13
3.3	Bearbeitung und Darstellung.....	13
3.4	Interpretation Gravimetrie	19
4	Gemeinsame Interpretation von Gravimetrie und Geoelektrik und Schlussfolgerungen	20
5	Zusammenfassung	22

Anlagenverzeichnis

Anlage 7	Lageplan der geophysikalischen Messprofile und der gravimetrischen Messflächen mit Bohransatzpunkten	1 : 1 000
Anlage 8.1.1	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E204 bis E208	1 : 1 000
Anlage 8.1.2	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E209 bis E213	1 : 1 000
Anlage 8.1.3	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E214 bis E216	1 : 1 000
Anlage 8.1.4	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E301 bis E303	1 : 1 000
Anlage 8.2.1	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 – E25, E204 - E216, E301 -E303, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 560.5 – 557.3 m ü. NN	1 : 5 000
Anlage 8.2.2	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 – E25, E204 - E216, E301 -E303, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 556.0 – 551.5 m ü. NN	1 : 5 000
Anlage 8.2.3	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 – E25, E204 - E216, E301 -E303, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 549.5 – 543.0 m ü. NN	1 : 5 000
Anlage 8.2.4	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 – E25, E204 - E216, E301 -E303, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 540.0 – 531.0 m ü. NN	1 : 5 000
Anlage 9.1	Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E204 bis E208	1 : 1 000
Anlage 9.2	Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E209 bis E213	1 : 1 000
Anlage 9.3	Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E214 bis E216	1 : 1 000
Anlage 9.4	Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E301 bis E303	1 : 1 000
Anlage 10	Karte der Felsoberfläche nach Komplexinterpretation	1 : 1 000
Anlage 11.1	Karte der BOUGUER - Schwerestörung	1 : 1 000
Anlage 11.2	Karte der Lokalen Schwerestörung GRIFFIN 8s (s= 2.5m)	1 : 1 000
Anlage 11.3	Karte der Lokalen Schwerestörung GRIFFIN 16s (s= 2.5m)	1 : 1 000

Anlage 11.4	Karte der Lokalen Schwerestörung GRIFFIN 32s (s= 2.5m)	1 : 1 000
Anlage 12	Geophysikalische Faktenkarte	1 : 1 000

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Zur Erkundung der räumlichen Ausdehnung einer Störzone im Oberbecken des PSW Happurg wurden im April/Mai 2011 seismische Messungen in Form von Refraktionstomographie gemeinsam mit geoelektrischen Messungen in Form von 2D-Geoelektrik durchgeführt. Aufgabe dieser Untersuchungen war insbesondere die Erfassung der Geometrie der Störzone (Grenze Locker-/ Festgestein).

Auf Grund des komplizierten Aufbaus der Füllung der Störzone sowie der zu erwartenden unregelmäßigen Gestaltung mit teilweiser starker Flankensteilheit erfolgte auf nahezu allen Profilen eine Kombination aus Seismik und Geoelektrik. Durch die Erfassung von zwei unterschiedlichen physikalischen Parametern (Schallgeschwindigkeit und spezifischer Widerstand) konnte die Aussagesicherheit hinsichtlich der Geometrie der Störungszone sowie ihrer stofflichen Zusammensetzung deutlich verbessert werden. Nach Vorlage der geophysikalischen Ergebnisse wurden etwa 50 Kernbohrungen im Bereich des Beckens und des Dammes niedergebracht. Unter Einbeziehung dieser Bohrergebnisse erfolgte im August/September 2011 eine integrierende Interpretation aller Ergebnisse. Bei der Vorlage und Diskussion dieser Ergebnisse mit dem Auftraggeber und den mit der Sanierung beauftragten Ingenieurbüros am 08.09.2011 in Happurg wurde eine kurzfristige Ergänzung der geophysikalischen Untersuchungen vorgeschlagen. Diese Ergänzung sollte nach der vollständigen Beseitigung der Schlammschicht auf der Beckensohle erfolgen und betrifft

- Eine Ergänzung der geoelektrischen Messungen im bisher nicht oder nicht mit ausreichender Erkundungstiefe untersuchten Ostteil des Beckens sowie an einigen Stellen mit unsicherer Abgrenzung der Störungszone.
- Mikrogravimetrische Messungen in den Bereichen mit anstehendem Kalkstein, um auszuschließen, dass in diesem Bereich größere Hohlräume und alte Einsturztrichter (Dolinen) auftreten.

Nach Durchsicht des Vorschlages für die Ergänzungsmessungen empfahl Prof. Dr.-Ing. habil. Moormann vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart die E-W verlaufenden Verdichtungsprofile der Geoelektrik zur Erweiterung des Kenntnisstandes über den Aufbau der Störungszone nach Möglichkeit nach W bis über den Rand der Störungszone hinaus zu verlängern.

Der vorliegende Bericht ist als Ergänzung zum Ergebnisbericht vom 21.09.2011 konzipiert und behandelt vordergründig die Arbeiten und Ergebnisse der als Nachtrag erfolgten 2. Erkundungsphase. Für methodische Grundlagen, Hintergründe und generelle Einschätzungen wird daher auf den Ergebnisbericht der ersten Erkundungsphase verwiesen. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird bei der Anlagenbezeichnung die ursprüngliche Nummerierung fortgeführt.

2 Geoelektrik

2.1 Feldarbeiten

Die geoelektrischen Profilmessungen wurden in Ergänzung zu den bisherigen W-E-Profilen auf der Beckensohle durchgeführt und sollten den in der ersten Erkundungsetappe unzureichend berücksichtigten Ostteil des Beckens, vorwiegend außerhalb der bisher bekannten Störzone, erfassen. Dies betrifft den Profilbereich E04 bis E16, welcher wegen der Beckenbreite seinerzeit nicht bis zum östlichen Beckenrand gemessen wurde. Um den Erkenntnisgewinn durch die zusätzlichen Profile zu maximieren, wurden die Ergänzungsprofile E204 bis E216 zwischen die früheren Profile gelegt und entsprechend den örtlichen Bedingungen über die gesamte Beckenbreite gemessen. Im Bereich der (Störzone) wird damit zusammen mit den bisherigen Profilen ein mittlerer Profilabstand von 10 m erreicht. Auf Grund örtlicher Bautätigkeit im vom Sediment weitgehend beräumten Becken konnte die Vorgabe in Lage und Länge an einigen wenigen Stellen nicht erfüllt werden.

Zur Unterscheidung der Profile der beiden Messetappen wurde den neuen Profilen eine „2“ vorangestellt und die letzten beiden Stellen des jeweils 10 m nördlich liegenden Profils der Messetappe 1 hinzugefügt. So liegt z.B. Profil E204 ca. 10 m südlich von Profil E04 und damit zwischen E04 und E05.

Zusätzlich zu den parallelen Profilen wurden 3 S-N-verlaufende Profile (E301-E303) gemessen, wobei mit dieser Richtung bevorzugt die in E-W-Richtung verlaufenden Teile der Störzonenbegrenzung besser abgebildet werden sollten. Das Profil E301 östlich der Störzone verläuft über die Bohrungen BK30/2011 sowie die durch die Bohrung BK33/2011 nachgewiesene Fehlstelle im Kalkstein. Die Profilanlage der geoelektrischen Messungen ist in Anlage 7 dargestellt.

Die geoelektrischen Messungen wurden generell mit einer maximalen Erkundungstiefe von 30 m durchgeführt, soweit die Profillänge dies zuließ. Da die geoelektrischen Messungen auf der mit Restsedimenten belegten Beckensohle erfolgten, sind die Ankopplungsbedingungen als gut anzusehen (niedrige Erdungswiderstände). Angesichts dieser Bedingungen und der fast ausschließlich trockenen Witterung ist eine witterungsbedingte Beeinflussung der Messergebnisse innerhalb der Messetappe nicht zu erwarten. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es durch fortschreitende Austrocknung im über Monate wasserungefüllten Becken zu einer tendenziellen Erhöhung der Widerstände im Bereich der Lockermaterialien gegenüber den Messungen der ersten Etappe (April 2011) gekommen ist.

In der folgenden Tabelle 1 sind die Längen und realisierten Erkundungstiefen der geoelektrischen Profile zusammengefasst.

Tabelle 1: Länge der geoelektrischen Profile (Phase 2)

Profil E	Elektroden	Länge entlang Erdoberfläche (m)	Erkundungstiefe Z_{\max} (m)
204	116	230	30
205	125	248	30
206	141	280	30
207	113	298	30
208	174	346	30
209	175	348	30

210	175	348	30
211	191	380	30
212	175	348	30
213	191	380	30
214	187	372	30
215	175	348	30
216	175	348	30
301	225	448	30
302	250	498	30
303	87	172	28
Summe Phase 2		5392	

Die Messparameter sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt:

- Messparameter Geoelektrik

Messgerät: Multielektrodenapparatur GMS150
Fa. GeoSys GmbH, Leipzig

Messkonfiguration: WENNER

Elektrodenabstand: $a = 2 \text{ m}$

Aufstellungsweite: 15 Profile: $a = 2 \text{ m}$ bis $a = 60 \text{ m}$ (20 Wirkungstiefen)
 1 Profil: $a = 2 \text{ m}$ bis max. $a = 56 \text{ m}$ (19 Wirkungstiefen)

- verwendete Software zur Datenbearbeitung und Auswertung der Geoelektrik

Primärbearbeitung: Programm ELCONPSW
Geophysik GGD, Leipzig

Inversion: Programm RES2DINV
Geotomo, Malaysia

Darstellung: SURFER 9
Golden Software Inc., Colorado, USA

Profile Analyst PA 7
Encom Software, Australien

2.2 Datenbearbeitung und Darstellung der Messergebnisse

Die Datenbearbeitung der geoelektrischen Daten erfolgte analog der ersten Messetappe unter Verwendung gleicher Inversionsparameter.

Die Darstellung der durch die Inversionsrechnung erhaltenen Widerstandsschnitte für die Parallelprofile im Becken (E204 bis E216) erfolgt in den Anlagen 8.1.1 bis 8.1.3. Die drei N-S-verlaufenden Querprofile E301 bis 303 sind in der Anlage 8.1.4 dargestellt.

Art und Weise der Darstellung sind identisch mit den Darstellungen der ersten Messetappe (Anlagen 2.1 des ersten Ergebnisberichtes). Gleiches gilt für die Darstellung der Horizontalschnitte, welche aus sämtlichen Geoelektrikdaten beider Etappen unter Verwendung des Minimum-Curvature-Verfahrens berechnet wurden (Anlagen 8.2.1 bis 8.2.4 analog Anlagen 2.2.1 bis 2.2.4). Da auch nach dem neuen Erkundungsstand größere Bereiche Profilabstände von ca. 20 m aufweisen, wurde dabei wieder ein Einzugsradius von 15 m zum Schließen der Datenlücken verwendet.

2.3 Interpretation Geoelektrik

Die Ergebnisse der neuerlichen geoelektrischen Messungen zeigen im Bereich der Störzone eine den bisherigen Ergebnissen vergleichbare Struktur und fügen sich damit im Überlappungsbereich in die bisherigen Daten problemlos ein. Durch den hier nunmehr entstehenden engeren Profilabstand lassen sich die Ränder der Störzone lagemäßig präzisieren.

Generell behalten die bei der ersten Messetappe getroffenen Einschätzungen bezüglich Struktur und Aussagegehalt (Kapitel 5.1 & 5.2 des Ergebnisberichtes) ihre Gültigkeit. Die neuen Ergebnisse bestätigen einmal mehr den Trend zur Kleinräumigkeit der Strukturen und zu scharfen Wechseln der Untergrundbeschaffenheit auf kurzen Distanzen. Die strukturellen Unterschiede von Profil zu Profil sind im Detail nach wie vor vorhanden, auf Grund der dichteren Belegung fügen sich diese aber in den Horizontalschnitten (Anlagen 8.2.1 bis 8.2.4) nun besser zusammen, insbesondere bei diagonal zum Messraster verlaufenden Strukturen.

In der vordringlich zu erkundende Fläche östlich der bisher bekannten Störzone liegen generell hohe Widerstände unter einer variablen niederohmigen Bedeckung vor, welche überwiegend kompakten Kalkstein bedeuten. Es sind allerdings auch hier Anomalien vorhanden, welche eine lokale Unterbrechung des angenommenen durchgehenden Kalksteinkörpers erwarten lassen.

So ist z.B. auf Profil E215 (Anlage 8.1.3) bei Profilmeter 269 ein ausgeprägtes vertikales Widerstandsminimum (blau) vorhanden, welches den hochohmigen Festgesteinskörper markant unterbricht. Vergleichbare Elemente finden sich auch am Profilende (Profilmeter 333) sowie auf den Profilen E208 (Profilmeter 307, Anlage 8.1.1) und E211 (Profilmeter 346, Anlage 8.1.2). Inwieweit die Form dieser Widerstandsminima die wahre Breite der ursächlichen Strukturen beschreibt, kann dabei nicht abschließend entschieden werden. In jedem Fall ist mit einer bindig verfüllten Fehlstelle im Felskörper zu rechnen, wenngleich es sich dabei prinzipiell auch um eine Kluft handeln kann, welche schmaler als ihr Widerstandsabbild ist.

Neben den genannten Anomalien, die sich von der Oberfläche aus erstrecken, treten verbreitet auch Widerstandsminima unterhalb hochohmiger Zonen, welche Kalkstein bedeuten, auf. Diese können prinzipiell mit einem Materialwechsel im Fels (mehr bindige Anteile), einer Verwitterung bzw. Entfestigung desselben oder aber mit dem Auftreten von Lockermaterial unter einer Felsdecke erklärt werden. Diese niederohmigen Bereiche reichen lokal bis nahe an das Niveau der Felsoberfläche hinauf (z.B. E212, Profilmeter 235, Anlage 8.1.2). Derartige Elemente liegen in der Fläche auf Achsen, auf denen teilweise auch die genannten Anomalien der Felsoberfläche liegen, so dass ein struktureller Zusammenhang erwartet werden kann. Die

räumliche Verbindung der lokalen Minima kann sehr gut in den Horizontalschnitten der Tiefenniveaus ca. 11.5 m bis 18 m unter Beckensohle (Anlagen 8.2.2 und 8.2.3) nachvollzogen werden. Eine markante Verbindung lässt sich dabei insbesondere von der Fehlstelle bei BK33/2011 nach Norden, westlich vorbei an Bohrung BK30/2011 bis zum Übergang in die Störzone südöstlich der Bohrung BK31/2011 feststellen. Das über diese Zone verlaufende N-S-Profil E301 (Anlage 8.1.4) gibt diese Situation ebenfalls wieder. Hier sind über weite Strecken korrespondierende Widerstandsminima unterhalb der hochohmigen Felsoberfläche vorhanden; erst nördlich von Profilmeter 310 sind ausgeprägt hohe Widerstände im Niveau des erwarteten Festgesteins vorhanden.

Eine Deutung der Widerstandsabnahme in der Tiefe in der östlichen Beckenhälfte ist nach wie vor schwierig, da entsprechende Aufschlüsse fehlen. Die Bohrung BK30/2011 ist hierbei nicht hilfreich, da diese in einem Bereich mit ausschließlich hohen Widerständen liegt.

2.4 Komplexinterpretation (Vertikalschnitte, Felsrelief, Faktenkarte)

Vertikalschnitte

Die Vertikalschnitte der bildgebenden Verfahren Geoelektrik und Refraktionsseismik wurden im Rahmen der ersten Erkundungsphase gemeinsam in Zusammenhang mit den Bohrergebnissen quantitativ interpretiert, um Informationen über die Tiefenlage der Felsoberkante (Felslinie) abzuleiten (Kapitel 5.4 des Ergebnisberichtes). Diese Interpretation wurde mit den Ergebnissen der ergänzenden Geoelektrikmessungen ebenfalls vollzogen, wobei die Festlegung der Felslinie in Ermangelung neuerer seismischer Ergebnisse nur anhand der Widerstandsbilder erfolgte.

Die Darstellung der Komplexinterpretation auf den neuen Schnitten erfolgt in den Anlagen 9.1 bis 9.4 (analog Anlage 4 des ersten Berichtes).

Die Schnitte enthalten erneut die drei ausgehaltenen Strukturelemente „Felslinie“, „Scholle“ (rot) und „Entfestigung unter Felslinie“ (blau), wobei eine Zuordnung nach wie vor nicht in jedem Fall eindeutig zu treffen ist, da die Felslinie bei größeren Schollen auch an dessen Oberkante interpretiert werden könnte, mit einer Entfestigungszone (blau) darunter. Es wurde hierbei versucht, die Felslinie als repräsentative Basis einer zusammenhängenden Störzone auszuhalten, damit diese im Ergebnis als zusammenhängender Problembereich nicht zu stark zergliedert wird.

Auf den geoelektrischen Schnitten der Profile E210, E213, E215 und E216 reichen die niedrigen Widerstandswerte in der Störzone bis an die Basis der Schnitte (Erkundungstiefe ca. 30 m), wobei sich mitunter kein Widerstandsanstieg abzeichnet. Hier ist mit einer entsprechend tiefen Ausbildung der Störzone zu rechnen, wobei einzelne isolierte Felskörper dennoch oberhalb vorhanden sein können. Eine ähnliche Situation ist nach Auskunft von Prof. Dr. Moormann bei einer aktuellen Bohrung im Umfeld der Bohrung BK5/2011 vorgefunden worden, bei welcher unterhalb eines wenige Meter mächtigen Kalksteinkörpers in ca. 24 m Tiefe erneut Lockermaterial bis über 38 m Tiefe angetroffen wurde.

Felsrelief

Auf Basis der auf den Schnitten interpretierten und digitalisierten Felslinie ist durch flächenhafte Interpolation ein neues Höhenmodell der Felslinie erstellt worden, welches nach dem aktuellen Erkundungsstand nun auch die Fläche östlich der Störzone berücksichtigt (Anlage 10 analog Anlage 6).

Im Ergebnis zeichnen sich auch in den Bereichen außerhalb der Störzone Undulationen der Felsoberfläche ab. Es ist jedoch anzumerken, dass an jenen Stellen, die im geoelektrischen

Bild eine kleinräumige Unterbrechung des Felskörpers zeigen, eine Tiefenfestlegung der Felsoberfläche nicht immer sinnvoll möglich erscheint. So zeigt sich z.B. die Fehlstelle auf Profile E215, ca. Profilmeter 270, als lokale Tieflage der Felsoberfläche, wobei die Tiefenangabe im Zentrum der Anomalie nicht der wahren Tiefe entsprechen dürfte. Der Anomaliecharakter wird in der Reliefkarte auf diese Weise aber dennoch deutlich.

In der Karte des Felsreliefs sind Anomaliebereiche der Gravimetrie im Sinne einer Zusammenschau ebenfalls eingetragen. Eine entsprechende Bewertung erfolgt im Rahmen der gemeinsamen Betrachtung von Gravimetrie und Geoelektrik in Kapitel 4.

Faktenkarte

Die nach der Komplexinterpretation der ersten Erkundungsphase erhaltene flächenhafte Darstellung (Faktenkarte Anlage 5 des ersten Berichtes) wurde unter Einbeziehung der neuen geoelektrischen Ergebnisse entsprechend ergänzt (Anlage 12).

Auf Basis der neuen Ergebnisse ergeben sich im Bereich der Störzone einige kleinere Änderungen insbesondere im Nordteil, wo wesentliche Flanken in der Hauptprofilrichtung (E-W) verlaufen. Innerhalb der Störzone (blau) konnte die potentielle Lage von größeren, isolierten Felskörpern (Schollen, pink) durch das dichtere Profilvernetz präzisiert werden.

In der östlichen Beckenhälfte ist das in Kapitel 2.3 genannte System von Widerstandsminima unterhalb der Felslinie ergänzt worden (hellgrün), welche auf potentielle Schwächezonen (Verwitterung, Lockermaterial) unterhalb der Felslinie hindeuten. Jene Stellen, an denen diese Zone nach den geoelektrischen Befund bis nahe an die Felsoberfläche reicht, bzw. diese sogar durchbricht, sind mit einer weiteren Signatur („Verdacht auf verminderte lokal stark verminderte Kalksteinmächtigkeit“, hellblau mit blauem Umriss) gekennzeichnet. Diese Anomalien konzentrieren sich vorwiegend auf einer S-N-verlaufenden Achse zwischen der Bohrung BK33/2011 im Süden, dem Umfeld der Bohrung BK30/2011, und dem Übergang in die Störzone im Norden, südöstlich von BK31/2011. Weitere Indikationen treten allerdings auch am östlichen Beckenrand auf, insbesondere am Dammfuß (Profildende von E215).

Diese bislang genannten Strukturelemente sind auf Basis der beiden bildgebenden Verfahren Geoelektrik und Seismik kartiert und in die Faktenkarte übernommen worden. Die Ergebnisse der gravimetrischen Messungen sind in der Faktenkarte ebenfalls schematisch integriert, wobei diese jedoch keine direkte Tiefenzuordnung erlauben. Eine zusammenfassende Interpretation unter Einbeziehung der Schweredaten erfolgt in Kapitel 4.

3 Gravimetrie

3.1 Messkonzept

Ergänzende Mikrogravimetrische Messungen wurden in den Bereichen mit anstehendem Kalkstein durchgeführt, um in diesen Abschnitten das Auftreten größerer Hohlräume und alter Einsturztrichter (Dolinen) auszuschließen. Die Messungen wurden in einem Messpunktraster von $s = 5$ m durchgeführt, womit in erster Linie Strukturen abgebildet werden sollen, welche durch das Profilvernetz der geoelektrischen Messungen (20 m) fallen könnten.

Die Lage der gravimetrisch untersuchten Messflächen ist übersichtsmäßig der folgenden Abb. 1 zu entnehmen. Eine Darstellung der Messflächen erfolgt weiterhin in Anlage 7.

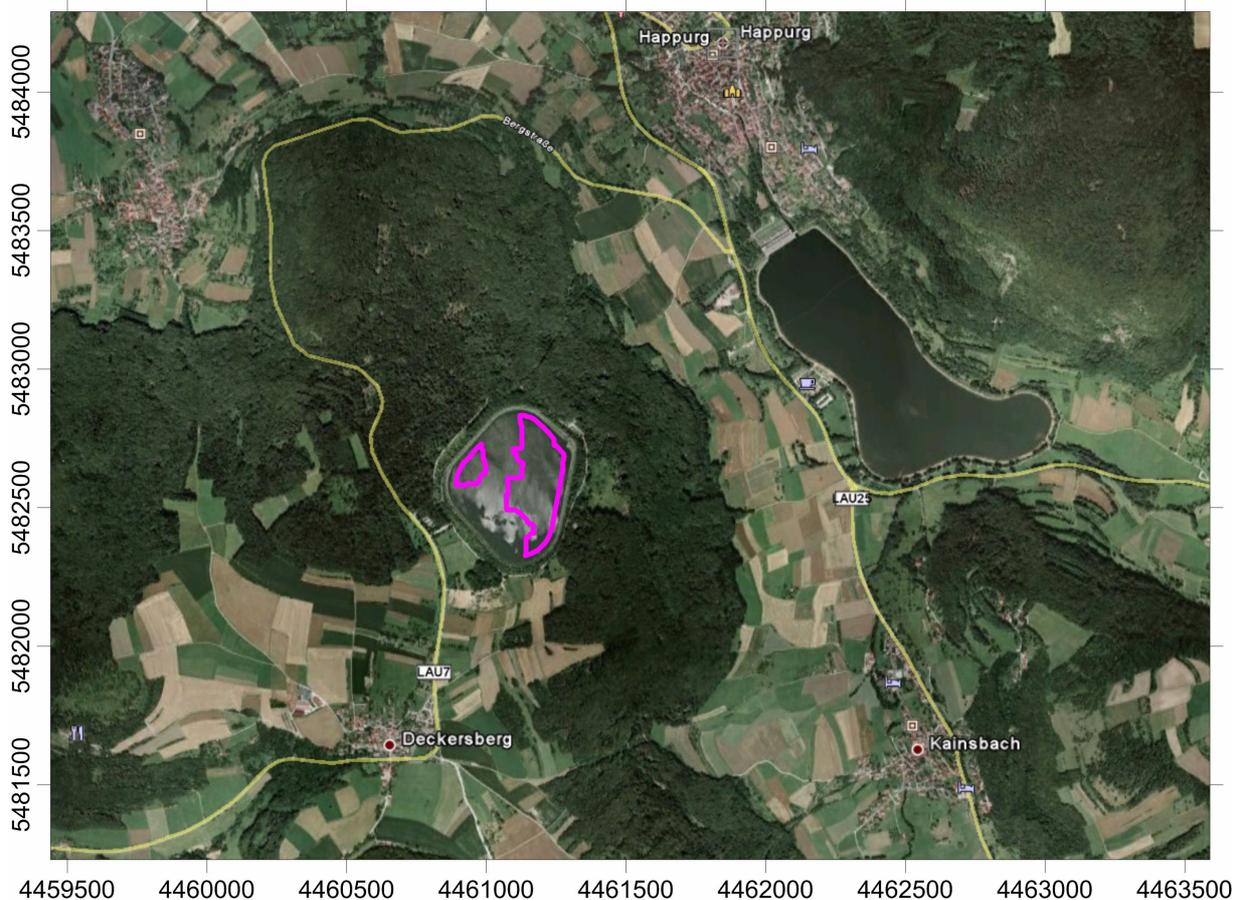


Abb. 1: Lage der gravimetrischen Untersuchungsgebiete (Quelle: Google Earth)

Das geophysikalische Messverfahren der Gravimetrie dient der Erfassung der Störung Δg (Delta-g) der global wirkenden Schwerebeschleunigung. Δg wird in mGal angegeben ($1 \text{ mGal} = 10 \mu\text{m/s}^2$). Schwerstörungen werden durch geologisch oder -in allgemein geringerem Maße- anthropogen bedingte Dichtedifferenzen im Untergrund verursacht. Die Größe der Schwerstörungen richtet sich nach der Dichtedifferenz unterschiedlicher geologischer Einheiten und deren geometrischer Ausdehnung.

Das generelle Schwerebild (regionale Anomalien) wird bestimmt durch den gesamten Gesteinsaufbau unterhalb des jeweiligen Messpunktes.

Im der vorliegenden geologischen Situation kommen als Ursachen von lokalen Schwerstörungen vor allem in Betracht:

- für Schwereminima, Bereiche mit geringerer Dichte als der Mittleren (hier: erwarteter Fels, $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$)
 - Auflockerungszonen / Dichten von $\rho < 2.5 \text{ g/cm}^3$
 - Lockersedimente / Dichten von $\rho \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$
 - Hohlräume / Dichte um $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ (wassergefüllt)
 - / Dichte $\rho = 0.0 \text{ g/cm}^3$ (luftgefüllt)

Dabei spielen solche geometrischen Faktoren wie

- Tiefenlage und
- Ausdehnung

eine wesentliche Rolle.

- für *Schweremaxima*, Festgestein mit höherer Dichte als der Mittleren ($\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$)

Dabei spielen solche geometrischen Faktoren eine wesentliche Rolle, wie

- dessen generelle Verbreitung und Mächtigkeit und das
- Relief der Festgesteinsoberfläche

3.2 Anlage und Durchführung der gravimetrischen Messungen

Die gravimetrischen Messungen wurden mit einem mittleren Messpunktabstand von 5 m ausgeführt. Es erfolgte kein Anschluss an das staatliche Netz (Relativmessungen mit willkürlichem Niveau).

Für die mikrogravimetrischen Messungen wurden automatische Gravimeter vom Typ Scintrex CG-5 AutoGrav der Fa. Scintrex (Kanada) mit einer Messgenauigkeit von 5 μGal verwendet. Die Messungen erfolgten ca. 60 cm über der Geländeoberfläche auf einem Stativ. Zur Erfassung des Geräteganges wurden in einem Intervall von ca. 60 bis 90 Minuten Driftmessungen an einem Bezugspunkt (Basispunkt) vorgenommen. Das Messgerät führt während eines Messvorgangs an einem Messpunkt 30 oder mehr Einzelmessungen durch, deren Mittelwert als Messwert ausgegeben wird. Zusätzlich wird die Standardabweichung der Messwerte mit aufgezeichnet, was eine Bewertung der Datenqualität noch während der Messung erlaubt.

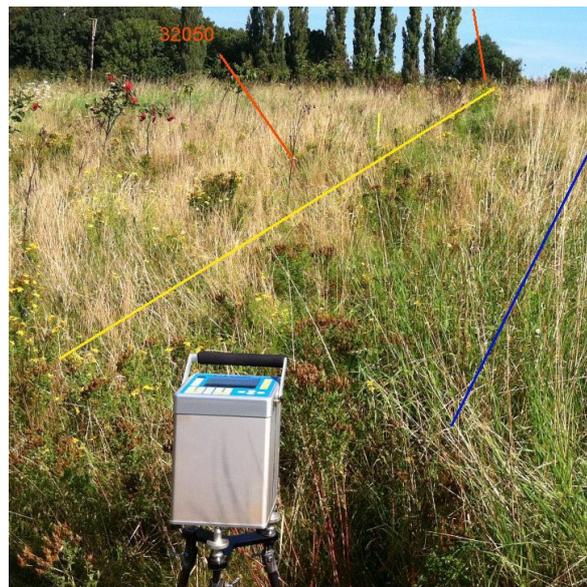


Abb. 2: Quarzfedergravimeter SCINTREX CG-5

Für die Freiluft- und BOUGUER-Reduktion ist eine Höhenbestimmung der Messpunkte mit einer Genauigkeit von $< \pm 0,02 \text{ m}$ erforderlich. Da die Messfläche in allen Teilen frei zugänglich war und keine Sichtbehinderungen bestanden, erfolgte die Einmessung mit einem elektrooptischen Tachymeter (Trimble Robotic, System 5605). Der Anschluss zur Lage erfolgte in Gauß-Krüger Koordinaten (3° Streifen, 4. Streifen) über Lagefestpunkte des Bauvorhabens.

3.3 Bearbeitung und Darstellung

Um die Schwerestörung Δg darzustellen, ist es notwendig, die Messwerte rechentechnisch in mehreren Schritten zu bearbeiten. Die zuerst vorzunehmende Korrektur ist die Gang- und Gezeitenkorrektur, um den Einfluss von geräteinterner Drift und den Einfluss der Gezeiten aus den Daten zu beseitigen. Hierfür werden die Messwerte anhand der Gangkurve, wie sie sich durch die Wiederholungsmessungen an den Basispunkten darstellt, mit der Software GRAVPRIM (Geophysik GGD) korrigiert. Die Gezeiten werden im Gravimeter automatisch erfasst.

Der nächste Schritt ist die Freiluftreduktion. Mit wachsender Entfernung vom Erdmittelpunkt nimmt die Schwerkraft ab. Um diesen Effekt der Messpunkthöhe zu eliminieren, wird die Höhe H (in m) jedes Messpunktes relativ zu einem (willkürlichen) Bezugsniveau bestimmt. Im vorliegenden Fall sind alle Reduktionen auf 500 m ü. NN bezogen. Die Berechnung der Reduktionen wurde mit der Software GRAVPRIM durchgeführt.

Die Normalfeldkorrektur dient der Berücksichtigung der Schwereänderung in Abhängigkeit vom Breitengrad, auf dem gemessen wird. Durch die Rotation der Erde verringert sich die Schwerebeschleunigung mit Annäherung an den Äquator. Diese Korrektur erfolgte unter der Verwendung der Normalschwere nach HELMERT, 1901, mit der Software GRAVPRIM.

Als nächste Korrektur wird die sogenannte BOUGUER-Reduktion angebracht. Sie dient der Reduktion des Einflusses der zwischen Mess- und Reduktionsniveau gelegenen Gesteinsmassen auf die Messwerte. Im vorliegenden Fall ist für die BOUGUER-Reduktion eine für den natürlichen Untergrund in dieser Region übliche mittlere Dichte von 2.5 g/cm^3 verwendet worden.

Als letzte Korrektur wird die Geländekorrektur angebracht. Sie dient der Reduktion von Masseneinflüssen, die durch das umliegende Geländere relief an jedem Messpunkt verursacht werden. Die seitlich des Messpunktes gelegenen Massen (Berg = Masseplus / Tal = Masseminus) verursachen in jedem Falle eine Verminderung des Schwerewertes am betreffenden Messpunkt. Die Geländekorrektur ist deshalb immer positiv. Die Geländekorrektur wurde mit dem Programm GK (Geophysik GGD) für jeden Messpunkt individuell berechnet. Die Grundlage für die Berechnung bildet eine Höhenmatrix, die das Geländere relief möglichst genau wiedergeben soll.

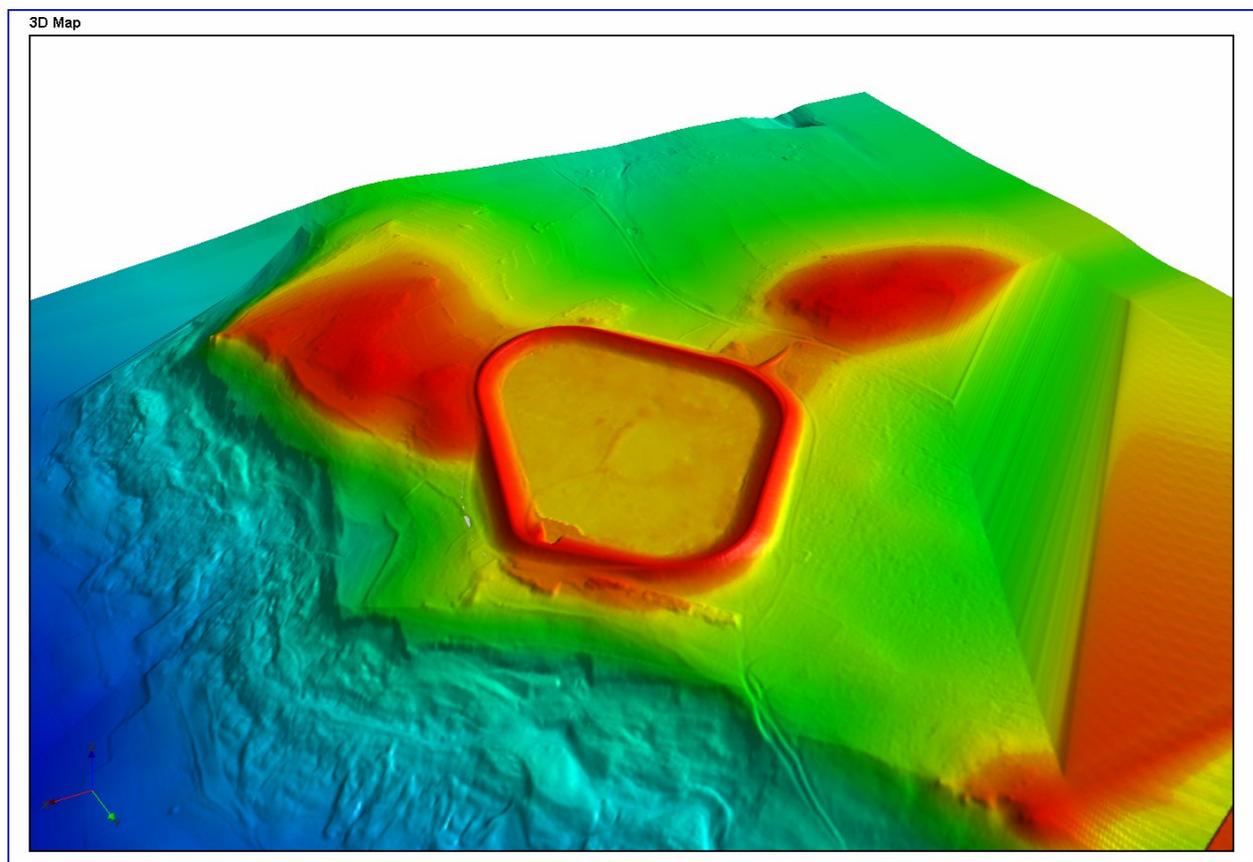


Abb. 4: Kombiniertes Höhenmodell für die Geländekorrektur (perspektivische Ansicht)

Das für große Teile der Umgebung des Messgebietes verfügbare DGM (vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt, Gitterabstand 1 m, resampled auf 2 m) wurde für den Bereich außerhalb des Beckens einschließlich des Ringdammes verwendet. Innerhalb der Messfläche wurden alle Messpunkthöhen von Geoelektrik und Gravimetrie ergänzt, da sie die aktuellen Geländehöhen im Becken beschreiben. Die Abbildung 4 zeigt das schlussendlich für die Geländekorrektur verwendete Höhenmodell.

Die Geländewirkung wurde mit einem Einzugsradius von 500 m, bei einem Gitterpunktabstand der Höhenmatrix von 2 m, mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ berechnet. Die Zuordnung erfolgt über die Koordinaten des jeweiligen Messpunktes. Als maximaler Korrekturbetrag wurden $0,535 \text{ mGal}$ im Bereich des östlichen Hanges nahe des Auslaufbauwerkes (Messpunkt Nr. 95685) bestimmt. Eine Übersicht der Beträge der topografischen Korrektur gibt die Abbildung 5.

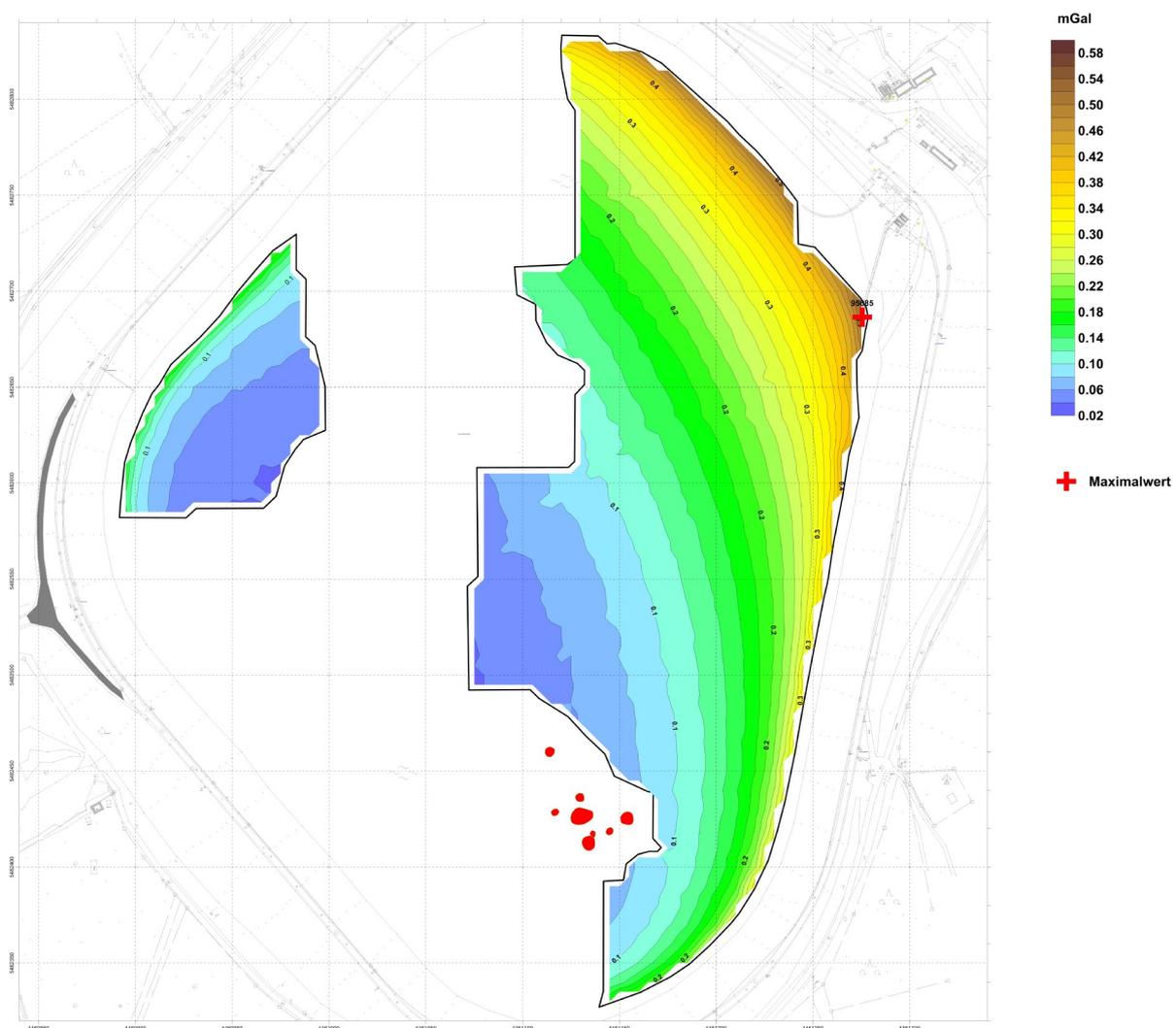


Abb. 5: Korrekturbeträge der Geländekorrektur

Die so korrigierten und mit einer vorgegebenen mittleren Dichte BOUGUER-reduzierten Daten werden als BOUGUER-Schwerestörung des Erdschwerefeldes bezeichnet. In der BOUGUER-Schwerestörung sind integrativ alle Informationen über Dichteinhomogenitäten im Untergrund des Messgebiets enthalten.

Die korrigierten und reduzierten Daten werden für die Darstellung und die weitere Datenbearbeitung auf ein Gitter (kurz: Grid) mit einem regelmäßigen Gitterpunktabstand $s = 2.5$ m interpoliert. Die Anlage 11.1 zeigt die so gewonnene Karte der BOUGUER-Schwerestörung als Isolinienplan im Maßstab 1 : 1 000.

Um den Einfluss der tief liegenden, geologisch bedingten Dichteänderungen aus den Daten zu eliminieren, wurden auf Grundlage der BOUGUER-Schwerematrix versucht, diese regionalen und die interessierenden lokalen Feldanteile voneinander zu trennen. Zu diesem Zweck kamen Feldtransformationen in Form der Lokalfeldberechnung nach GRIFFIN zum Einsatz.

Die Berechnung der Feldtransformationen erfolgten mit dem Programm Griffin (Geophysik GGD). Vereinfacht dargestellt, wird für den jeweilig betrachteten Punkt ein gewichteter Schwerewert aus den auf umliegenden Radien liegenden Punkten berechnet. Aus der Differenz zwischen dem Wert am Punkt und dem berechneten Mittelwert aus der Umgebung ergibt sich der Wert der lokalen Schwerestörung. Je nach gewählten Einzugsradien und Wichtung lassen sich diverse Lokalfelder berechnen. Im vorliegenden Fall wurden die 3 folgenden Lokalfelder nach GRIFFIN berechnet:

GRIFFIN 8s (Anlage 11.2)

GRIFFIN 16s (Anlage 11.3)

GRIFFIN 32s (Anlage 11.4)

In der Bezeichnung der GRIFFIN-Filter ist der Einzugsradius typischerweise in Gitterabständen (s) angegeben, d.h. 8s bedeutet einen Einzugsradius von 8 mal s, wobei s in diesem Fall 2.5 m beträgt.

Die Anlagen 11.2 bis 11.4 stellen betont die Einflüsse der oberflächennah gelegenen Dichteunterschiede dar. Mit zunehmendem Einzugsradius wird eine größere Tiefenreichweite der abgebildeten Dichteverteilung angestrebt. Als Orientierung für den bevorzugt dargestellten Teufenbereich kann auf der Grundlage der gewählten Berechnungsparameter für Anlage 11.2 ca. 0 - 15 m, Anlage 11.3 ca. 0 - 30 m und Anlage 11.4 ca. 0 - 40 m angegeben werden. Diese Zuordnung beruht auf den Wellenlängen der Anomalien, welche idealisierte Einzelkörper in einem homogenen Umfeld typischerweise erzeugen. Es ist jedoch zu beachten, dass z.B. weiträumige Körper in Oberflächennähe ebenfalls entsprechend langwellige Schwereanteile erzeugen, so dass die Lokalfeldberechnung mit verschiedenen Wellenlängen in erster Linie allgemein der Betonung lokaler struktureller Änderungen auf verschiedenen Skalen dient.

In allen Anlagen sind die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte Topographie, die Lage der Bohrungen sowie die gravimetrischen Messpunkte hinterlegt. Im Rahmen der geodätischen Vermessung der Gravimetermesspunkte wurden auch Besonderheiten der Oberflächenbeschaffenheit (Fels, Lockerbedeckung, Wasserflächen, Wege) kartiert, da diese einen Einfluss auf das beobachtete Schwerfeld haben können. In Anlage 11.2 sind derartige Auffälligkeiten, welche auf Grund eines Dichtedefizits schwererelevant sein können, ebenfalls mit eingetragen. Hierbei wurden nur jene berücksichtigt, die augenscheinlich mit Minima im Schwerfeld korrelieren.

Zusammenfassung der technischen Parameter

Feldarbeiten: 03.11.-19.11.2011 und 28.11.2011

Basisnetz

Anschlusspunkt: BP -10001 $\Delta g = 100,000$ mGal (Teilfläche 1)

Anzahl der Basispunkte (BP): 5
 -10002 $\Delta g = 99,519$ mGal (Teilfläche 1)
 -10003 $\Delta g = 99,721$ mGal (Teilfläche 1)
 -10004 $\Delta g = 100,039$ mGal (Teilfläche 1)
 -10005 $\Delta g = 100,200$ mGal (Teilfläche 2)

Messgerät: Gravimeter CG-5M AutoGrav Nr. 479, Nr. 503
 Fa. Scintrex Ltd. (Kanada)
 Messgenauigkeit ± 0.005 mGal

Messmethode: Zweischleifenmethode

Aufnahmenetz

Methode: Einschleifenmessung
 Gangbestimmung nach ca. 45 - 60 min.

Messgeräte: Quarzgravimeter CG-5M AutoGrav Nr. 479 und Nr. 503
 Fa. Scintrex Ltd. (Kanada)

Mittlerer Punktabstand: 5 m

	Teilfläche 1	Teilfläche 2
Anzahl der Messpunkte	2383	356
Anzahl der Wiederholungspunkte	211	17
Fehler: $m_{\Delta gB}$: [mGal]	± 0.007	± 0.005

mit:

$$m_{\Delta gB} = \pm \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

d = Differenz der Wiederholungsmessungen
 n = Zahl der Wiederholungsmessungen

Lage- und Höhenbestimmung

System: Gauß-Krüger RD 83, 3° Streifen, 4. Streifen

Methode: Polygonales Grundnetz über GPS,
 Messnetz über geometrisches und trigonometrisches
 Nivellement und elektrooptische Längenmessung

Geräte: Elektrooptisches Tachymeter System Trimble
 Robotic 5605
 Trimble Navigation Ltd., USA,
 Nivelliergerät Ni 025, Präzisionsgeräte Freiberg

Vermarkung: Pflöcke, Nägel, Farbe

Höhenfehler $m_{\Delta_{gH}}$: $\pm 0,026 \text{ m} = \pm 0,005 \text{ mGal}$

Lagefehler $m_{\Delta_{gL}}$: maximal $\pm 0,090 \text{ m} = <\pm 0,001 \text{ mGal}$

Geländereduktion

Bereich: RW 4460000 – 4462100
 HW 5481600 – 5483600

Grundlage:

Höhen aus
Messpunkthöhen Geol./Seismik 2011
Gravimetrie 2011
DGM2 (s=2 m)

Gesamtzahl der Höhenpunkte: ca. 703 880

Gitterabstand: s = 2 m

Einzugsradius: s = 500 m

Fehler der Geländereduktion $m_{\Delta_{gtop}}$: Der Fehler der Geländereduktion kann nur abgeschätzt werden und bleibt deshalb bei der Gesamtfehlerbetrachtung unberücksichtigt.

Fehlerbetrachtung

Gesamtfehler: $m_{\Delta_{g0}} = \pm \left(m_{\Delta_{gB}}^2 + m_{\Delta_{gA}}^2 + m_{\Delta_{gH}}^2 + m_{\Delta_{gL}}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$

$m_{\Delta_{g0}} = \pm 0,008 \text{ mGal}$

Reduktionen

Reduktionsniveau: 500 m NN

Normalfeld: HELMERT, 1901

Freiluftreduktion: $0,3086 \cdot H$, in mGal

BOUGUER-Reduktion: $0,04193 \cdot \rho \cdot H$, in mGal; Dichte $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$

Programme

Primärbearbeitung: Programm GRAVPRIM, Geophysik GGD

Geländekorrektur: Programm GK, Geophysik GGD

Sekundärbearbeitung: Programm SURFER 9, Golden Software Inc., USA

Feldtransformationen: Programm GRIFFIN, Geophysik GGD

Darstellung: Programm SURFER 9, Golden Software Inc., USA

3.4 Interpretation Gravimetrie

Die Karte der BOGUER-Schwerestörung (Anlage 11.1) stellt das integrative Schwerfeld aller unterhalb der Messebene (Geländeoberfläche) befindlichen Dichteinhomogenitäten dar. Im vorliegenden Falle ist ein regionaler Schwereanstieg von NE nach SW um etwa 0.6 mGal festzustellen. Die höchsten Schwerewerte finden sich im Süden der Teilfläche 1 und im SW der Teilfläche 2. Die niedrigsten BOUGUER-Schwerewerte treten im NW und NE der Teilfläche 1, und im NE der Teilfläche 2 auf. Der Schwereabfall bei Teilfläche 1 nach W und bei Teilfläche 2 nach E korrespondiert mit dem Rand der bekannten geologischen Störungszone, die das Speicherbecken von N nach S durchzieht.

Eine weitere Untergliederung des Schwerebildes liefern die Karten des lokalen Schwerfeldes (Anlagen 11.2 bis 11.4). Dabei wird davon ausgegangen, dass entsprechend der aufsteigenden Anlagenbezeichnung (vergleiche allgemeine Aussagen zu den Lokalfeldkarten in Kapitel 3.3) auch entsprechend größere Tiefenbereiche unter dem Betrachtungsniveau dargestellt werden. Um einen Eindruck vom Erfolg der angestrebten Feldertrennung zu erhalten, wurden in den Lokalfeldkarten die verbleibenden Anteile des Regionalfeldes mit dargestellt (in den Anlagen jeweils links unten). Dabei ist voraussetzungsgemäß festzustellen, dass die Regionalfeldanteile in der Karte des Lokalfeldes GRIFFIN 32 s (Anlage 11.4) am vollständigsten abgetrennt werden konnten (ausgeglicher Verlauf des regionalen Schwerfeldes).

In Anlage 11.2 sollten die Schwerewirkungen, die auf Dichteinhomogenitäten nächstens der Oberfläche liegen, am besten wiedergegeben werden. Es ist die Einlagerung einer Vielzahl lokaler Minima zu beobachten. Betragsmäßig und optisch deutlich hebt sich das lokale Schwereminimum in Umgebung der Bohrung BK33/2011 heraus, welches von der hier erbohrten Fehlstelle im Kalkstein (Lockersediment bis 28,7 m Teufe) verursacht wird. Ein vergleichbarer Störbetrag ist in dem nahezu N-S verlaufenden Minimum am nordwestlichen Rand der Teilfläche 1 zu beobachten, welcher den Übergang zur Störungszone markiert. Ansonsten ist das lokale Schwerebild (Anlage 11.2) von einer kaum geregelten Verteilung der Anomalien gekennzeichnet. Zum Vergleich wurden in dieser Anlage die im Zuge der gravimetrischen Messungen kartierten Oberflächenbesonderheiten - Lockermaterialbedeckung, Lockermaterial über Fels und Wasserbedeckung über Festgestein - mit ausgewertet. Die Korrespondenz der Lage von Lockermaterialbedeckung mit lokalen Schwereanomalien ist in einigen Fällen so deutlich, dass die entsprechenden Bereiche in der Anlage besonders gekennzeichnet wurden. Hierbei ist es wahrscheinlich, dass die auftretenden Schweredefizite zumindest teilweise von der variablen Lockerbedeckung verursacht werden. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass sich in diesen Teilbereichen auch rezente Aktivitäten einer tieferen Karstbildung in Form von Geländedepressionen widerspiegeln.

Über Anlage 11.3 zu 11.4 bilden sich klarer werdende Strukturen im Anomalienbild heraus. Dabei stellen die Bereiche positiver lokaler Schwerestörungen (gelb bis rot gefärbt) die Gebiete mit Hochlagen bzw. weniger beanspruchte Bereiche des Festgesteins dar. Insbesondere das Schweremaximum im Nordteil der Teilfläche 1 korrespondiert mit dem Befund der Geoelektrik, der wegen den durchweg hohen Widerständen in diesem Bereich vorwiegend kompakten Fels erwarten lässt.

In den Teilgebieten der lokalen Schwereminima (grün gefärbt) ist mit einer Tieflage der Festgesteinsoberfläche bzw. einem verstärkten Zersatz des Festgesteins durch karstbedingte Vorgänge zu rechnen. Mehr oder minder großflächig ist mit solchen gestörten Verhältnissen im mittleren und östlichen Teil der Teilfläche 1 zu rechnen. Entsprechende Störungen sind ebenfalls im Übergangsbereich am Rand der Teilflächen 1 und 2 zur bekannten N-S verlaufenden Schwächezone zu erwarten.

Im gesamten übrigen Abschnitt der Teilfläche 2 ist demnach mit keinen schwerwiegenden Beeinflussungen des Festgesteins zu rechnen (ausgenommen die Fläche des eingelagerten lokalen Schwereminimums) . Im südlichen Abschnitt der Teilfläche 1 treten die markantesten lokalen Schwereminima auf. Hier muss nach dem gravimetrischen Bild von lokal tiefgreifenden Störungen im Festgestein ausgegangen werden.

4 Gemeinsame Interpretation von Gravimetrie und Geoelektrik und Schlussfolgerungen

Die im Bereich der mutmaßlichen Felsflächen in der östlichen Beckenhälfte sowie westlich der Störzone erhaltenen geophysikalischen Messergebnisse von Geoelektrik und Gravimetrie sollen abschließend noch einmal in Zusammenhang diskutiert werden.

Angesichts der durch die gravimetrischen Messungen erhaltenen Schwerfelder drängt sich zunächst ein Zusammenhang der Dichteverteilung mit den in der Geoelektrik auffälligen niederohmigen Zonen auf, für welche Materialwechsel bzw. Auflockerungen als Ursache vermutet wird. Dieser Eindruck ergibt sich bereits zwanglos durch den visuellen Vergleich der beiden langwelligigen Lokalfelder (16s und 32s, Anlagen 11.3 und 11.4) mit den hellgrünen Flächen der Faktenkarte (Anlage 12). Durch die Zusammenschau der Interpretationsergebnisse der bildgebenden Verfahren (Felsrelief, Anlage 10 und Faktenkarte, Anlage 12) mit dem gravimetrischen Befund wird dieses Bild im Detail bestätigt. Zur Verdeutlichung wurden die Minimumbereiche (Werte kleiner -0.01 mGal) des kurzwelligen Lokalfeldes (Griffin 8s) in die Anlagen 10 und 12 integriert (rote Kolorierung).

Die Lage der Schwereminima zeigt eine auffällige Korrelation mit der Verteilung der Lockermaterialien nach der Geoelektrik insbesondere an jenen Stellen, an denen nach der Geoelektrik eine sehr geringe Tiefenlage von Auflockerungen bzw. Fehlstellen erwartet werden (Anlage 12).

Ein ähnlicher Zusammenhang lässt sich bei Betrachtung des Felsreliefs (Anlage 10) feststellen. Lokale Tiefenlagen der Felsoberfläche bedeuten eine lokal mächtigere Lockerbedeckung und erzeugen damit negative Schwereanomalien. Angesichts der teilweise gleichzeitigen Korrelation mit elektrischen Widerstandsminima in der Tiefe sollte auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass beide Erscheinungen (Tiefenlage der Felslinie und potentielle Auflockerung in der Tiefe) in einem ursächlichen Zusammenhang stehen.

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 einhergehen.

Inwieweit diese Strukturen geotechnische Relevanz bei der Sanierung des Beckens besitzen, kann aus geophysikalischer Sicht allein nicht bewertet werden. Im Sinne der Sicherheit des Beckens scheint eine Abklärung der ursächlichen Strukturen zumindest an jenen Stellen empfehlenswert, an denen eine signifikante Übereinstimmung beider Methoden Fehlstellen im Fels erwarten lassen bzw. im Schwerfeld Anomalien auftreten, die sich nicht anderweitig zuordnen lassen.

In der folgenden Tabelle 2 werden entsprechende Lokationen genannt, an welchen prioritär eine Überprüfung durch direkte Aufschlüsse empfohlen werden. Die in der Tabelle genannten Punkte sind in der Faktenkarte (Anlage 12) ebenfalls eingetragen.

Tabelle 2: Empfohlene Aufschlusspunkte in Anomaliebereichen, geordnet nach Priorität

Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert	Bemerkung
A1	4461178,9	5482538,6	deutliche, tiefgründige Unterbrechung des Fels im Widerstandsbild, Schwereminimum
A2	4461245,0	5482537,6	deutliche Unterbrechung des Fels im Widerstandsbild, Schwereminimum
A3	4461238,3	5482676,6	deutliche Unterbrechung des Fels bis ca. 10 m u. GOK im Widerstandsbild, Schwereminimum
A4	4461241,6	5482624,8	Unterbrechung Fels im Widerstandsbild, Schwereminimum
A5	4461200,9	5482373,7	Unterbrechung Fels im Widerstandsbild, Schwereminimum, Dammfuß
A6	4461220,1	5482750,8	lokales Schwereminimum ohne Entsprechung in der Geoelektrik, ggf. Hohlraum
A7	4461166,9	5482622,4	Widerstandsminimum flach unter erwarteter Felsdecke, Schwereminimum
A8	4461236,9	5482447,0	oberflächliches Widerstandsminimum (Tieflage der Felslinie), Schwereminimum, Dammfuß
A9	4461149,2	5482717,3	Widerstandsminimum flach unter erwarteter Felsdecke, Schwereminimum, Übergangsbereich zur Störzone
A10	4460960,3	5482652,1	Widerstandsminimum flach unter erwarteter Felsdecke, Schwereminimum (Teilfläche 2)

Bei der Zusammenstellung der Anomalien wurde versucht, diese nach Verdachtsintensität und Relevanz zu ordnen.

Die ersten vier Anomalien (A1 - A4) bezeichnen jene Stellen, die geoelektrisch eine Unterbrechung der Felsoberfläche erwarten lassen (vgl. auch Kapitel 2.3).

Bei Anomalie A5 war bereits in der ersten Erkundungsphase der Verdacht einer isolierten Struktur außerhalb der bekannten Störzone ausgesprochen worden, welcher sich nun durch ein zugehöriges, auffallend lagegleiches Schwereminimum bestätigt. Die Lage unmittelbar am Dammfuß bedeutet dabei eine besondere Brisanz. Gleiches gilt für Anomalie A8, welche aber nach dem Widerstandsbild auf dem inneren Ringprofil in erster Linie von einer lokalen Tieflage der Felsoberfläche verursacht sein dürfte.

Anomalie A6 beschreibt ein lokales Schwereminimum, welches nicht mit den Ergebnissen der anderen Messmethoden strukturell in Verbindung gebracht werden kann. Insbesondere sind keine signifikanten Widerstandsabnahmen zu verzeichnen. In diesem Fall ist ein luftgefüllter Hohlraum als Ursache nicht unwahrscheinlich.

Die Anomalien A8 und A9 bezeichnen beispielhaft Lokationen, an denen die verbreiteten Widerstandsminima unterhalb hochohmiger Bedeckung (Fels) sehr nah an die mutmaßliche Felslinie heraufreichen (Kapitel 2.3). Ein ähnliches Element in der westlichen Beckenseite bezeichnet Anomalie A10, wobei hier eine lokale Tieflage der Felsoberfläche einen Teil der gravimetrischen Anomalie verursachen dürfte.

In Abhängigkeit von den an den genannten Anomalien vorgefundenen Situationen sollte über die Relevanz der verbleibenden, untergeordneten Verdachtsflächen in der Faktenkarte entschieden werden.

5 Zusammenfassung

Zur Erkundung der räumlichen Ausdehnung einer Störzone im Oberbecken des PSW Happurg wurden im April/Mai 2011 seismische Messungen in Form von Refraktionstomographie gemeinsam mit geoelektrischen Messungen in Form von 2D-Geoelektrik durchgeführt. Aufgabe dieser Untersuchungen war insbesondere die Erfassung der Geometrie der Störzone (Grenze Locker-/ Festgestein).

Nach der Vorlage der Ergebnisse der abschließenden Interpretation unter Einbeziehung von ca. 50 Bohrungen im September wurde eine kurzfristige Ergänzung der geophysikalischen Untersuchungen nach der vollständigen Beseitigung der Schlammschicht auf der Beckensohle beauftragt. Diese umfassten

- Eine Ergänzung der geoelektrischen Messungen im bisher nicht oder nicht mit ausreichender Erkundungstiefe untersuchten Ostteil des Beckens sowie an einigen Stellen mit unsicherer Abgrenzung der Störungszone
- Mikrogravimetrische Messungen in den Bereichen mit anstehendem Kalkstein, um auszuschließen, dass in diesem Bereich größere Hohlräume und alte Einsturztrichter (Dolinen) auftreten

Diese Arbeiten wurden als Nachtrag zum ursprünglichen Erkundungsauftrag ausgeführt und in einer entsprechenden Ergänzung zum Ergebnisbericht dokumentiert.

Die geoelektrischen Widerstandsmessungen im Zentralteil des Beckens wurden auf 13 zusätzlichen West-Ost-Profilen über die gesamte Beckenbreite gemessen, wobei diese räumlich zwischen die bisherigen Profile gelegt wurden, so dass im Überlappungsbereich eine dichtere Profilbelegung von 10 m Abstand (gegenüber vormals 20 m) erreicht wird. Zusätzlich wurden 3 kreuzende Nord-Süd-Profile gemessen.

Die Aufbereitung der geoelektrischen Messdaten erfolgte in gleicher Weise wie bei der ersten Erkundungsphase durch Darstellung der Vertikalschnitte, profilhafte Interpretation unter Einbeziehung von Bohrungen und der Berechnung von flächenhaften Horizontalschnitten aus den Daten von beiden Messetappen. Aus den Interpretationsergebnissen wurden aktualisierte Fassungen der Karte der Felsoberfläche sowie der geophysikalischen Faktenkarte erstellt.

Die gravimetrischen Messungen wurden in den beiden erwarteten Kalksteinflächen östlich und westlich der bekannten Störzone mit einem Punktabstands von 5 m durchgeführt. Die Messdaten wurden mit den notwendigen Korrekturen, einschließlich einer aufwändigen Geländekorrektur, versehen und als Karte der Bouguer-Schwerestörung dargestellt. Aus dieser wurden verschiedene Lokalfelder nach GRIFFIN berechnet, um regionale Anteile zu entfernen und lokale Strukturen zu betonen.

Aus den Ergebnissen der Geoelektrik kann abgeleitet werden, dass im Ostteil des Beckens über weite Strecken Fels unter der Beckensohle vorhanden ist. Es ist allerdings ein System von niedrigen Widerständen unterhalb der hochohmig abgebildeten Felsoberfläche vorhanden, welche prinzipiell mit einer veränderten Beschaffenheit des Untergrundes (Entfestigung, Durchfeuchtung, Lockermaterial) assoziiert sind. Diese Widerstandsminima treten lokal im Niveau der Felsoberfläche auf, so dass mit Unterbrechungen des Felskörpers zu rechnen ist.

Die gravimetrischen Ergebnisse (Schwerekarten) zeigen eine auffällige Korrelation mit der vermuteten Verteilung der Lockermaterialien nach der Geoelektrik. Insbesondere jene 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 einhergehen.

In der Zusammenschau beider Methoden sind in den neuerlich erkundeten Felsbereichen zumindest keine Anomalien angetroffen worden, welche bzgl. Intensität und Dimension der an der Bohrung BK33/2011 angetroffenen Struktur (isolierte tiefgründige Fehlstelle im Kalkstein) vergleichbar sind.

Es treten jedoch schwächere Anomalien auf, deren Relevanz ohne weitere Aufschlüsse nicht eingeschätzt werden kann. Im Sinne der Sicherheit des Beckens scheint eine Abklärung der ursächlichen Strukturen zumindest an jenen Stellen empfehlenswert, an denen eine signifikante Übereinstimmung beider Methoden Fehlstellen im Fels erwarten lassen bzw. im Schwerefeld Anomalien auftreten, die sich nicht anderweitig zuordnen lassen. Hierfür werden Vorschläge für 10 Aufschlusspunkte gegeben, welche aus geophysikalischer Sicht prioritär überprüft werden sollten. Neben Lokationen in der inneren Beckenfläche sind auch 4 Anomalien vertreten, die im sensiblen Randbereich am Dammfuß liegen. In Abhängigkeit der Ergebnisse der laufenden Aufschlussarbeiten sollte über deren Fortgang und gegebenenfalls notwendige weitere Aufschlüsse entschieden werden.

Dipl.-Geophys. Dr. R. Scheibe

Dipl.-Geophys. J. Schwabe