

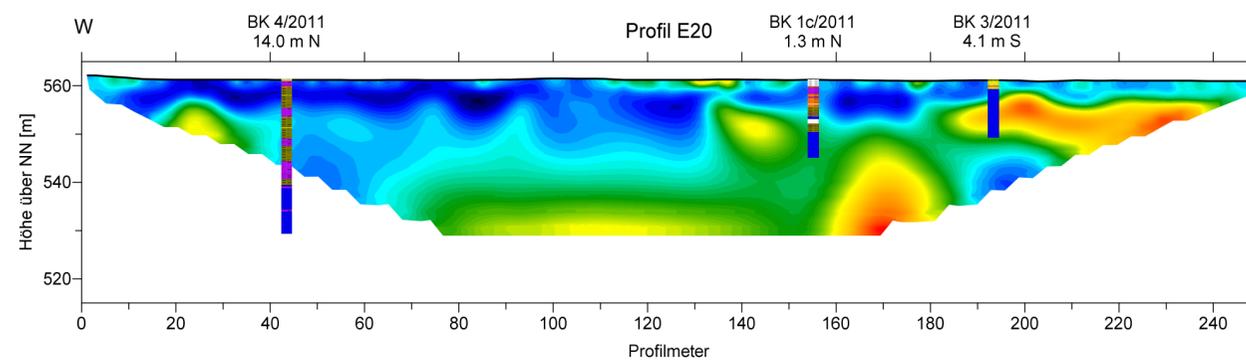
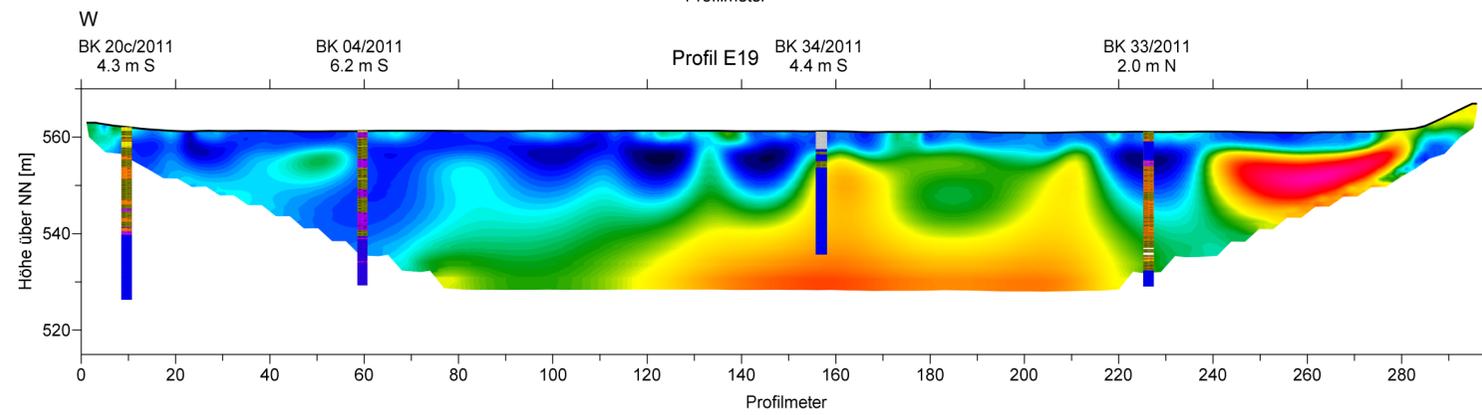
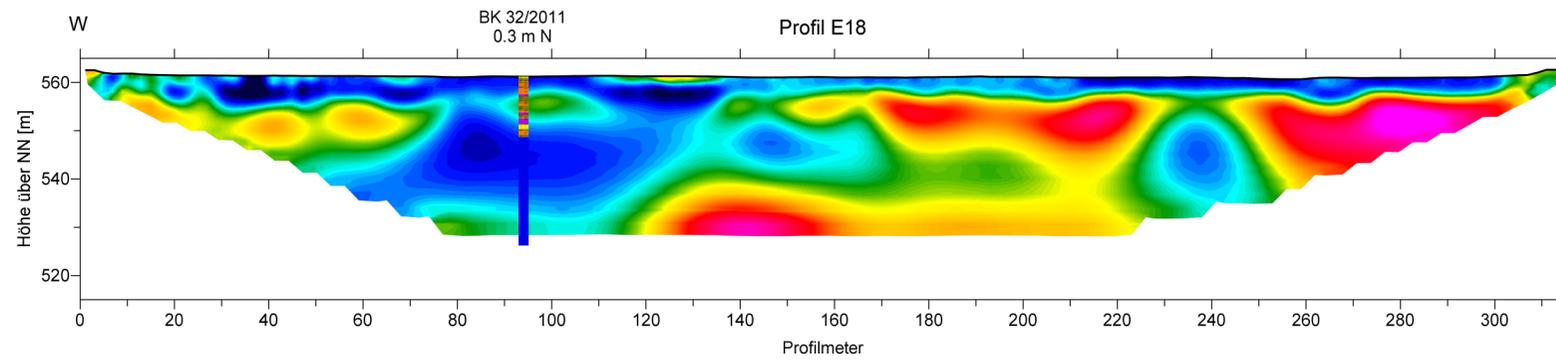
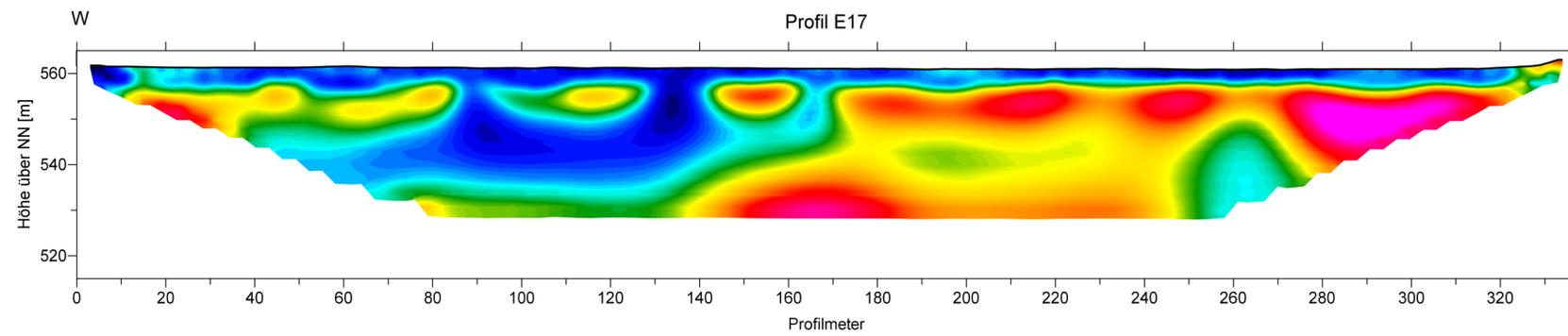
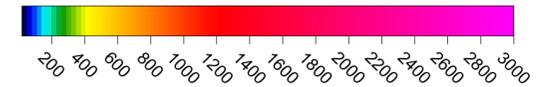
**Legende**

BK 5/2011 Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

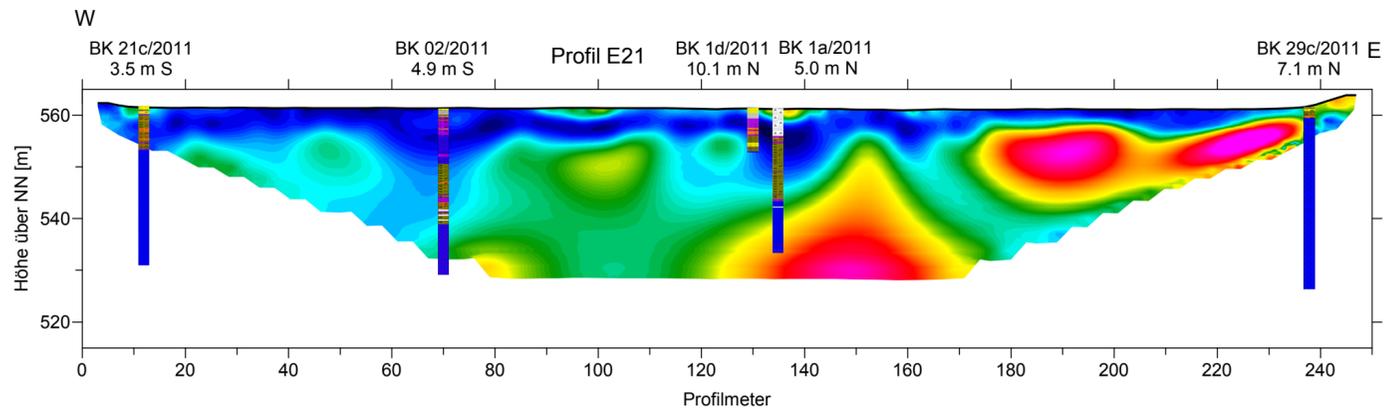
Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt

Kalkstein erbohrt

**Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]



<p><b>Geophysik CGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</p>		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E16 bis E20	Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 2.1.4



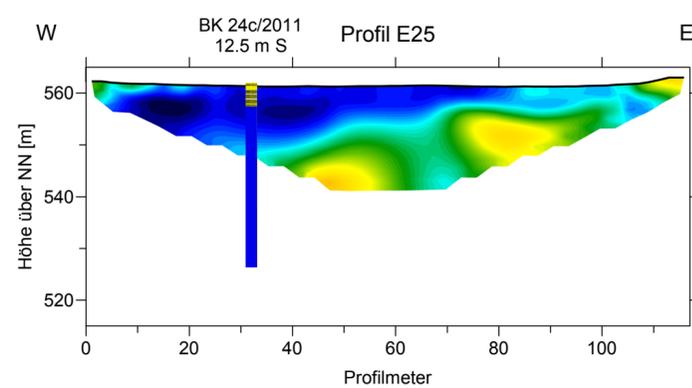
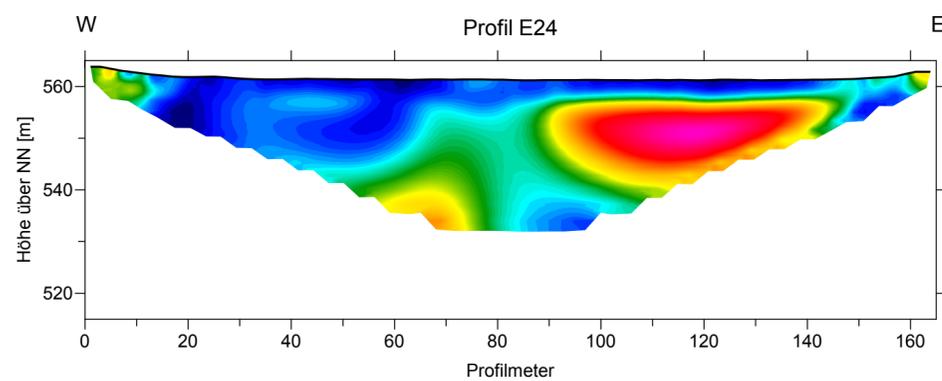
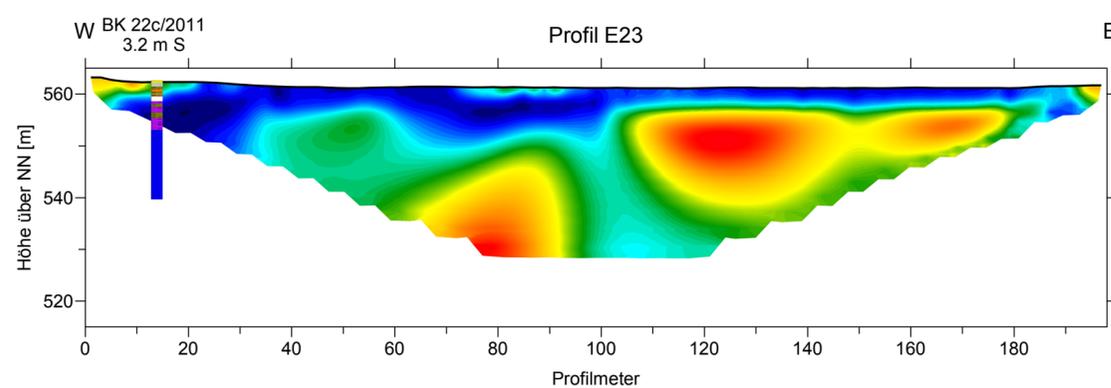
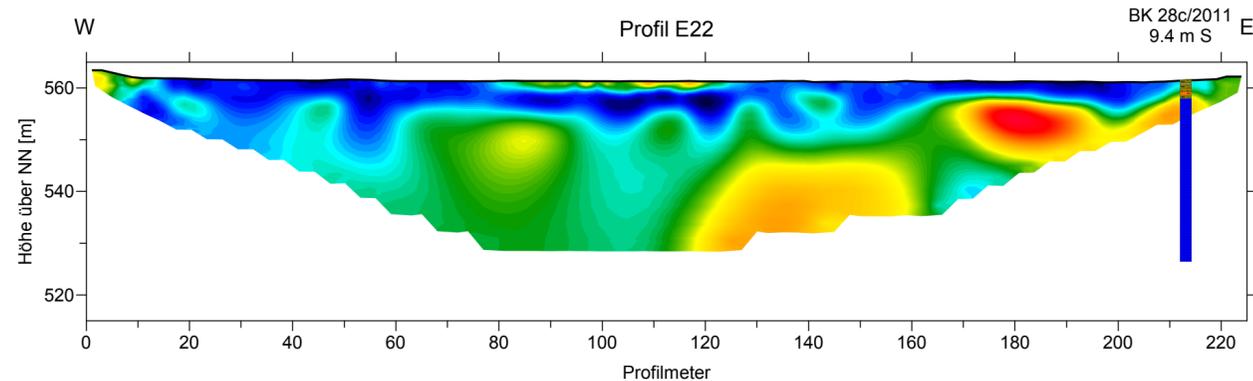
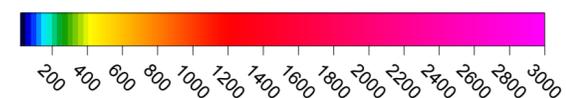
### Legende

BK 21c/2011 Bohrung mit Name,  
3.5 m S Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

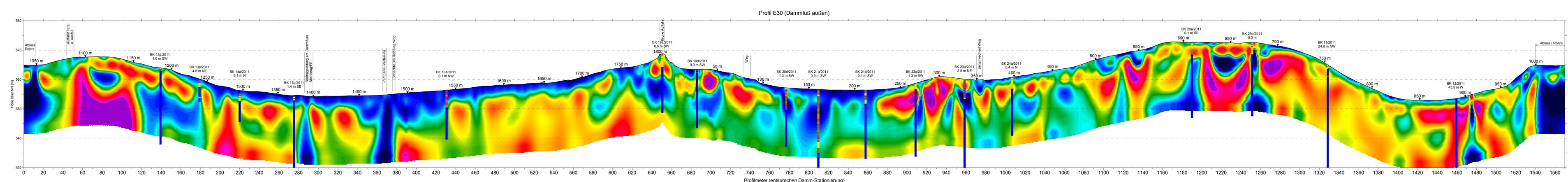
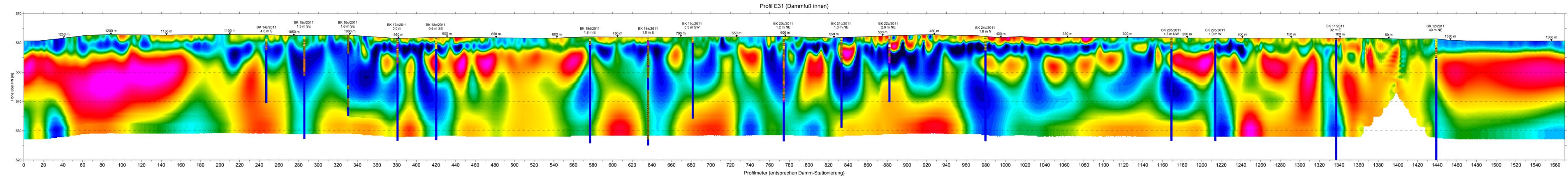
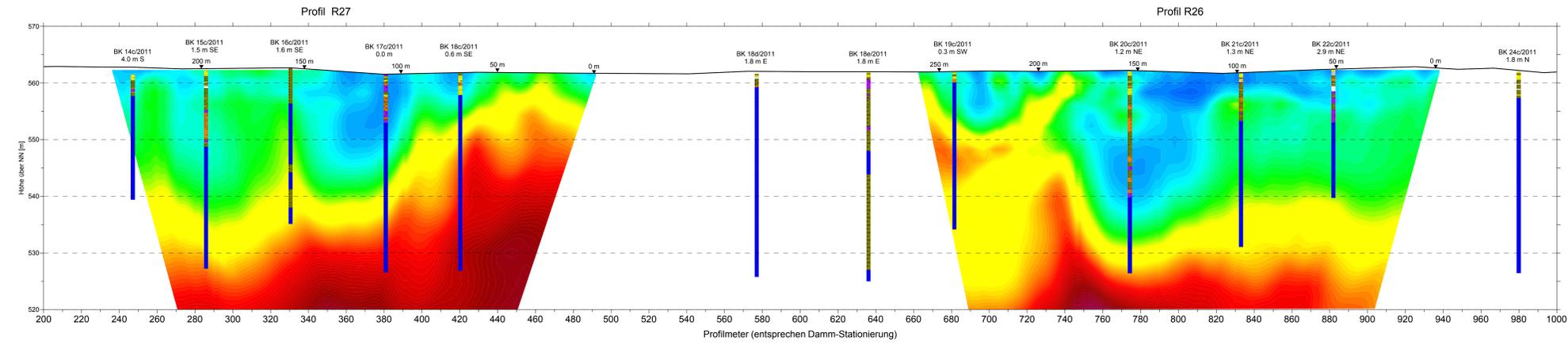
 Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

 Kalkstein erbohrt

Spezifischer elektr. Widerstand  
 $\rho_s$  in [ $\Omega\text{m}$ ]



 <b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D.04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E21 bis E25		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 01.09.2011	<b>Anlage:</b> 2.1.5



**Legende**

BK 14c/2011 4.0 m S Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

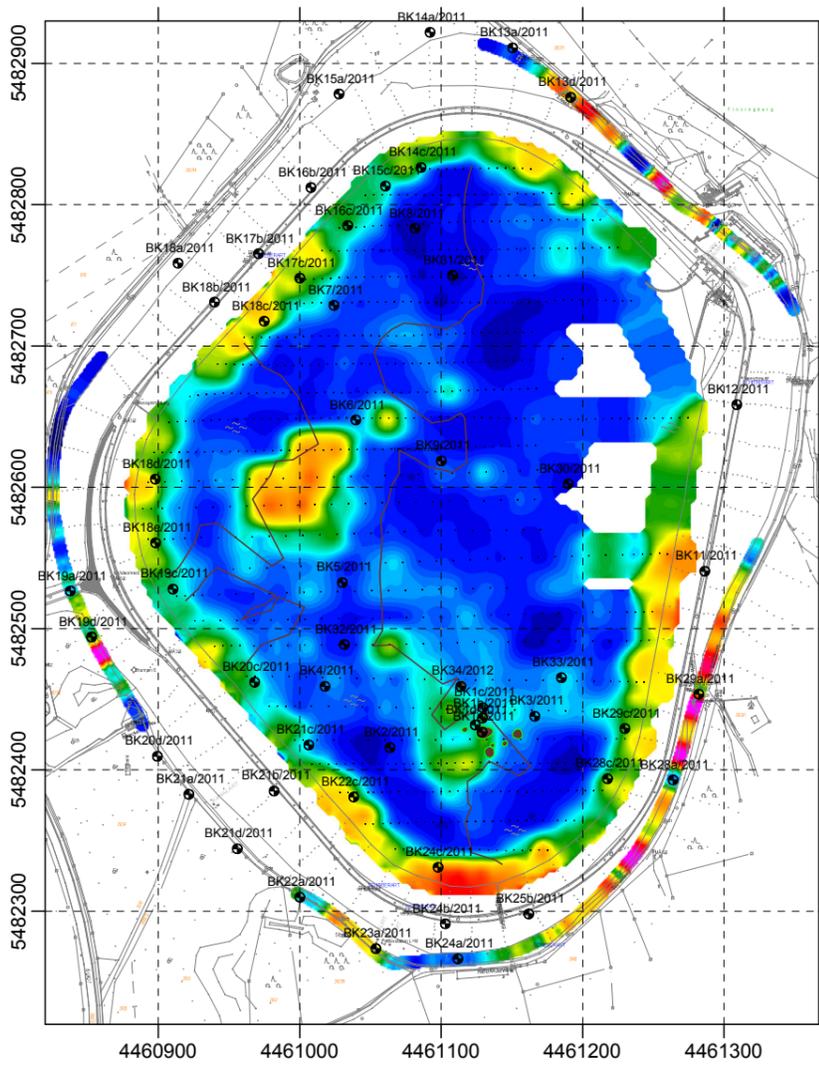
Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt

Kalkstein erbohrt

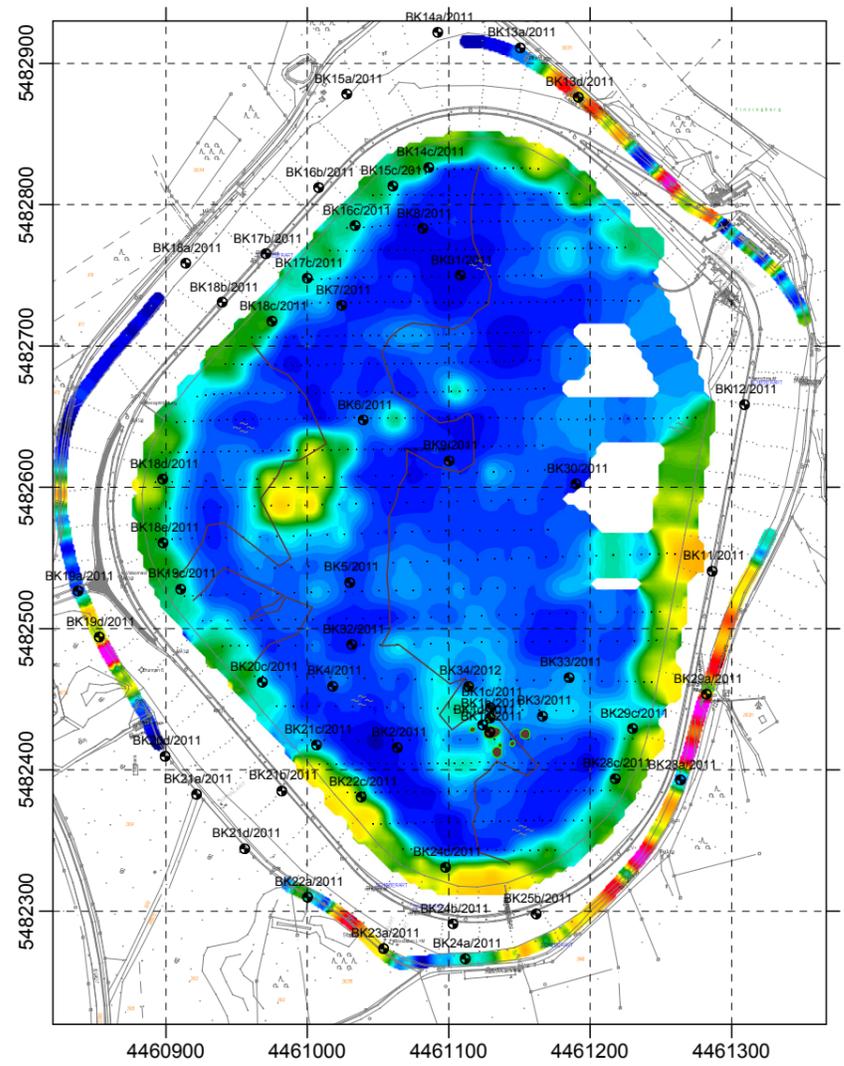
750 m Profilmeter entlang der Erdoberfläche entsprechen den Profilmeter der Messung im Gelände (s. Anl. 1)

Die Profilmeter der X-Achsen entsprechen einer abschnittswisen senkrechten Projektion der Dammstationierung auf die geophysikalischen Profile am Dammfuß innen und außen.

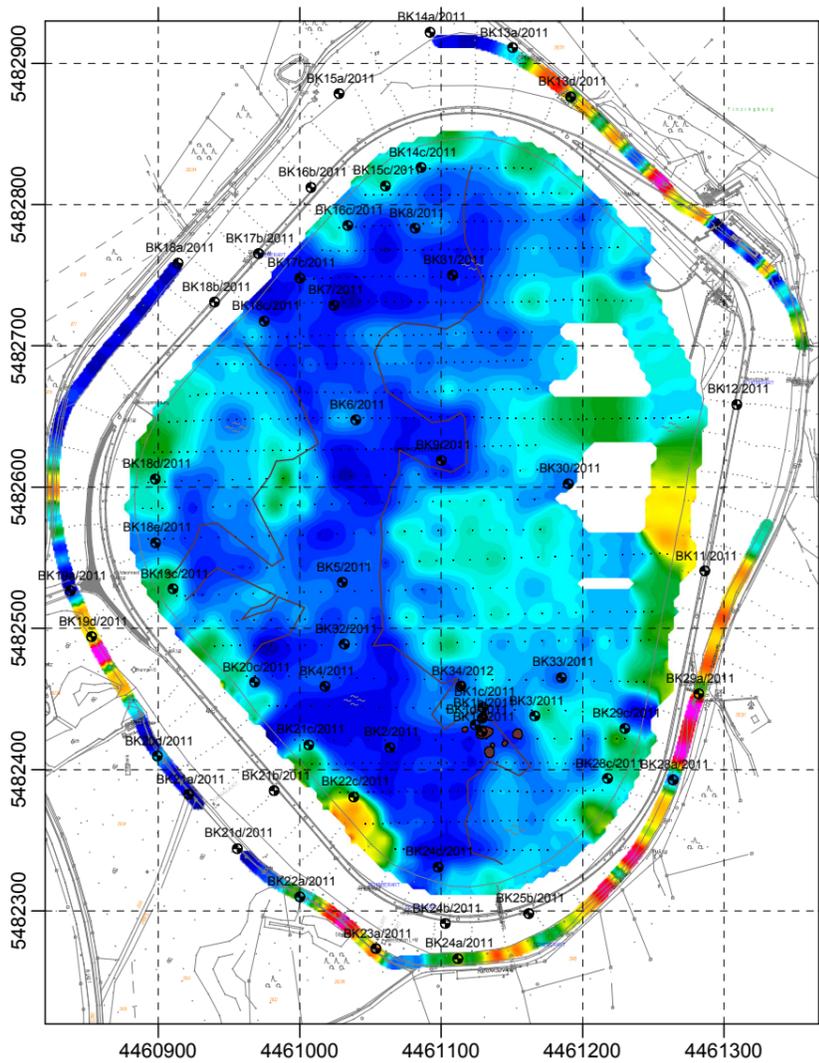
Horizontalschnitt bei ca. 560.5 m NN (Tiefe ca. 0.5 m u. Beckensohle)



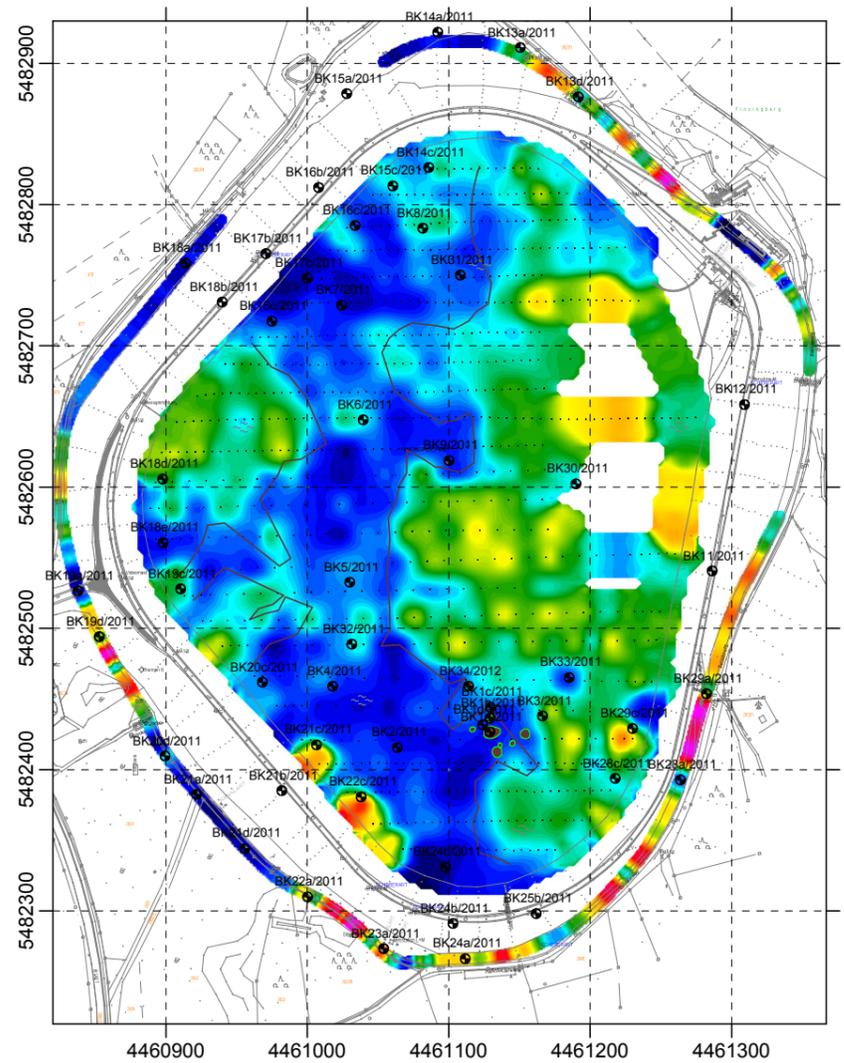
Horizontalschnitt bei ca. 559.5 m NN (Tiefe ca. 1.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 558.5 m NN (Tiefe ca. 2.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 557.3 m NN (Tiefe ca. 3.7 m u. Beckensohle)



**Legende**

- Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert
  - BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung
  - Erdfall
- Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]
- 

Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

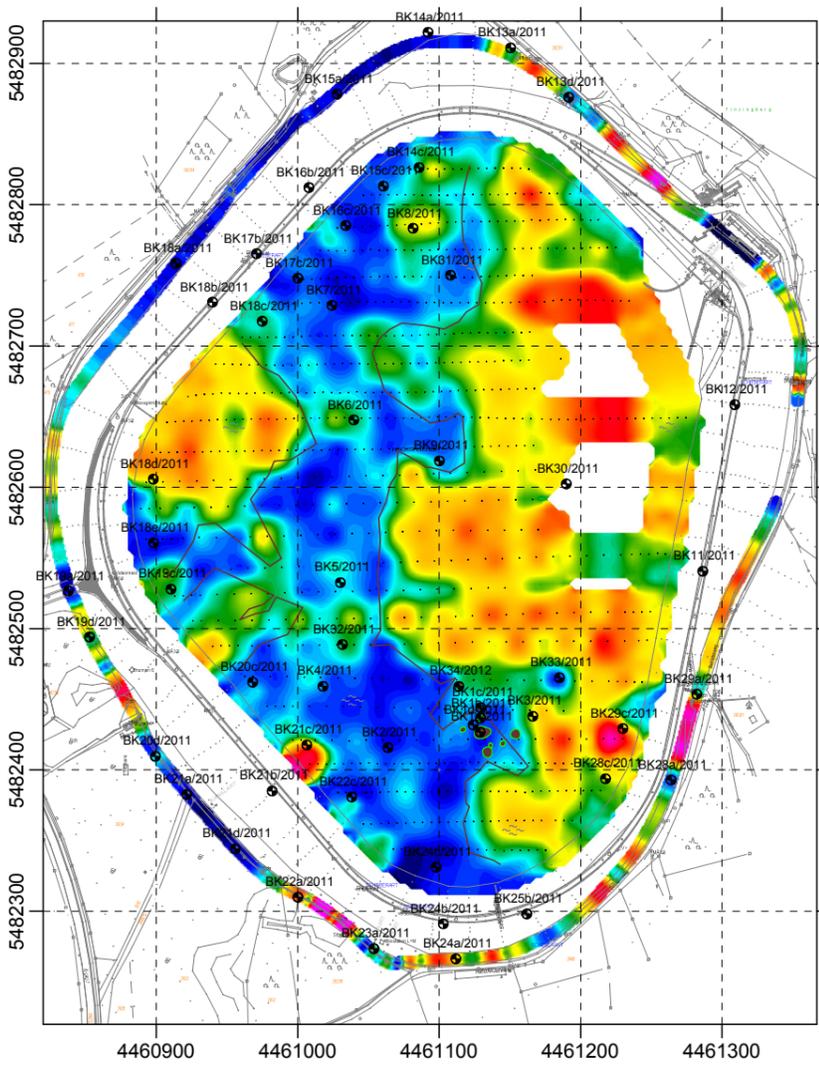


**Geophysik GGD**

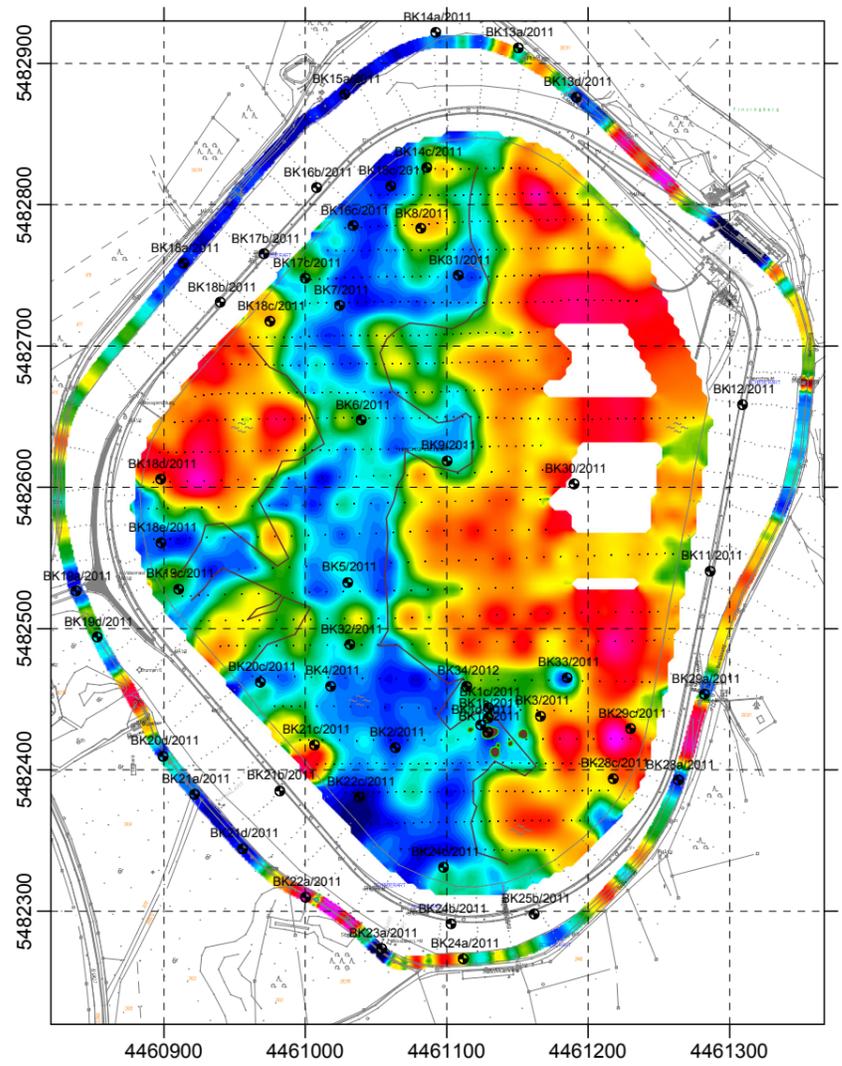
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Maßstab: 1 : 5000
Titel: Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 - E25, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 560.5 m - 557.3 m ü. NN		Anlage: 2.2.1
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	

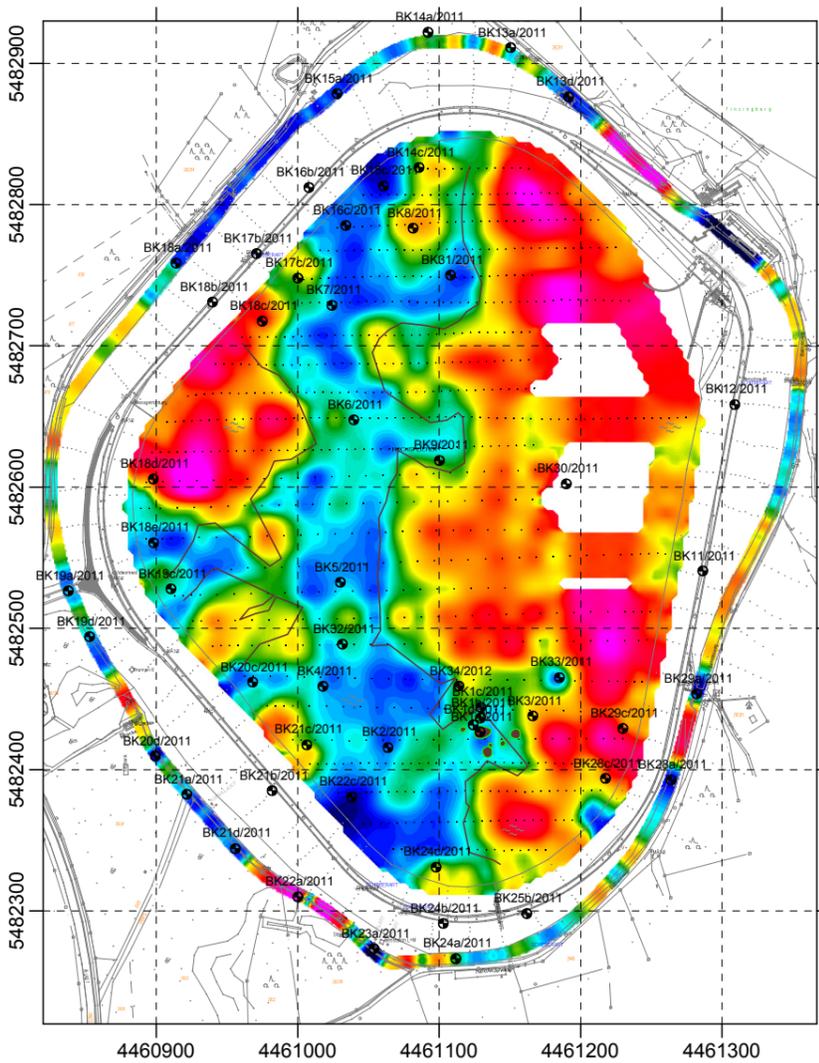
Horizontalschnitt bei ca. 556.0 m NN (Tiefe ca. 5.0 m u. Beckensohle)



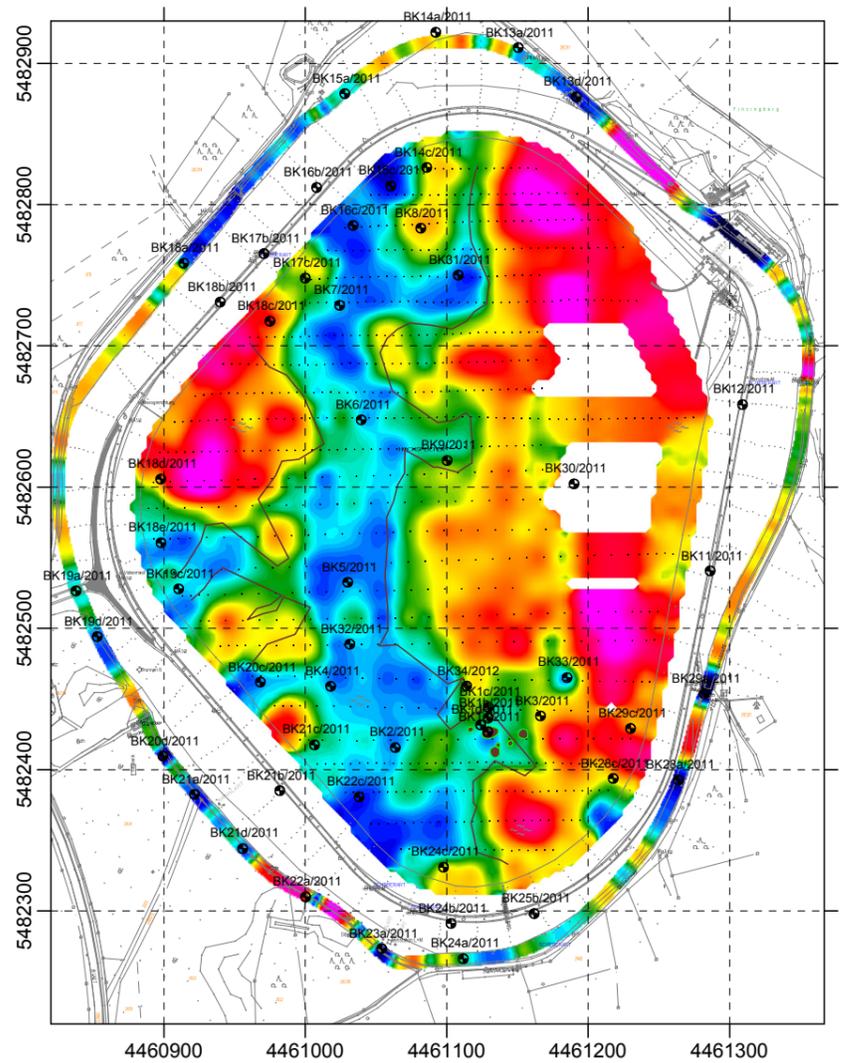
Horizontalschnitt bei ca. 554.6 m NN (Tiefe ca. 6.4 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 553.0 m NN (Tiefe ca. 8.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 551.5 m NN (Tiefe ca. 9.5 m u. Beckensohle)



### Legende

- Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert
  - Kernbohrung mit Bezeichnung
  - Erdfall
- Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in  $[\Omega m]$
- 

Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

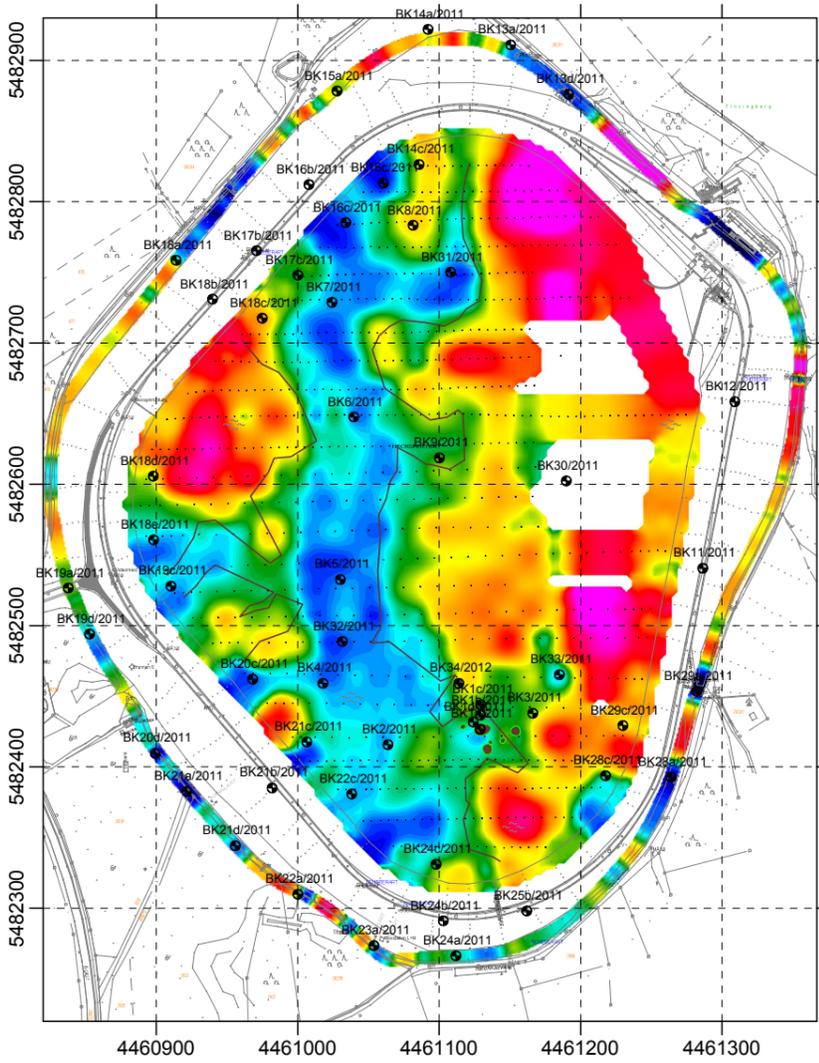


**Geophysik GGD**

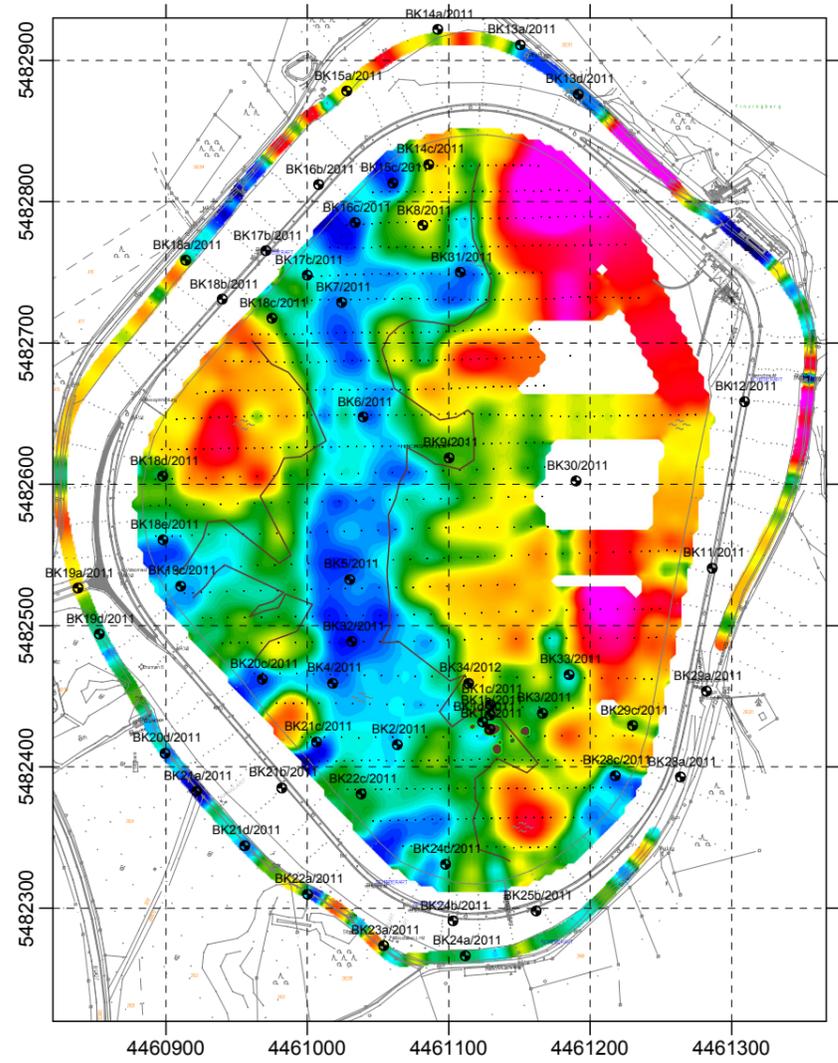
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.B.H.  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierkartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 - E25, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 556.0 m - 551.5 m ü. NN	Maßstab: 1 : 5000
angef.: Schw.	Datum: 05.09.2011	Anlage: 2.2.2

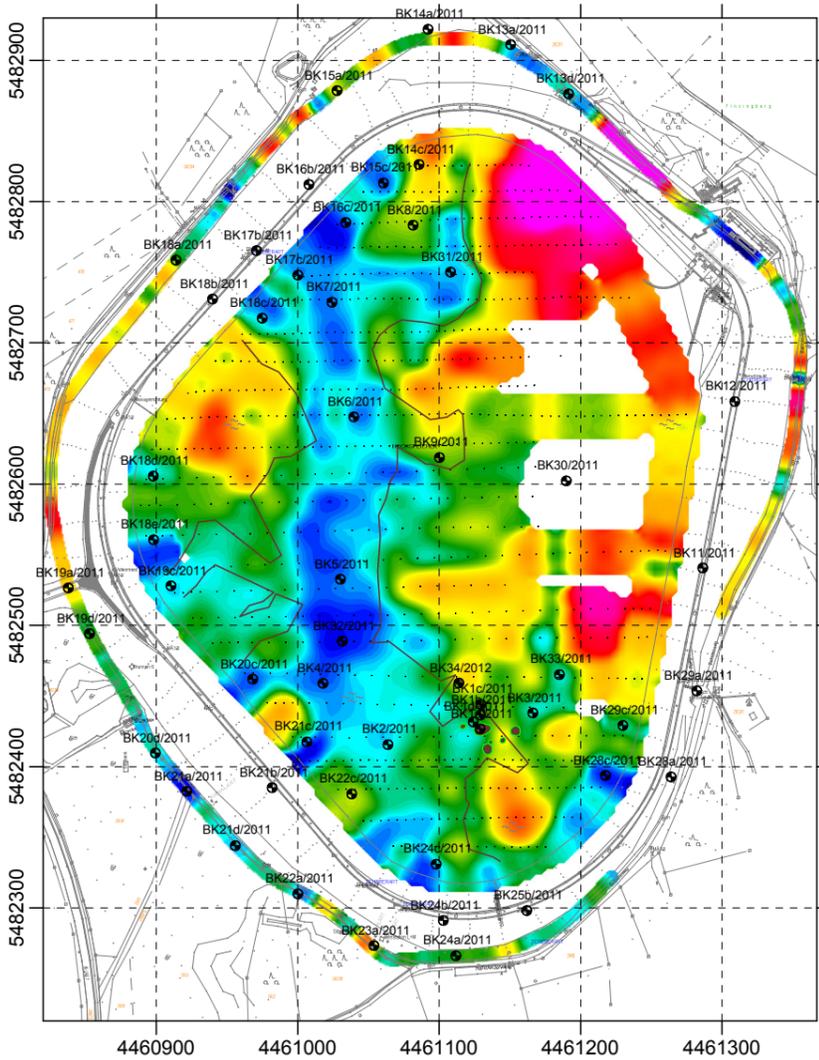
Horizontalschnitt bei ca. 549.5 m NN (Tiefe ca. 11.5 m u. Beckensohle)



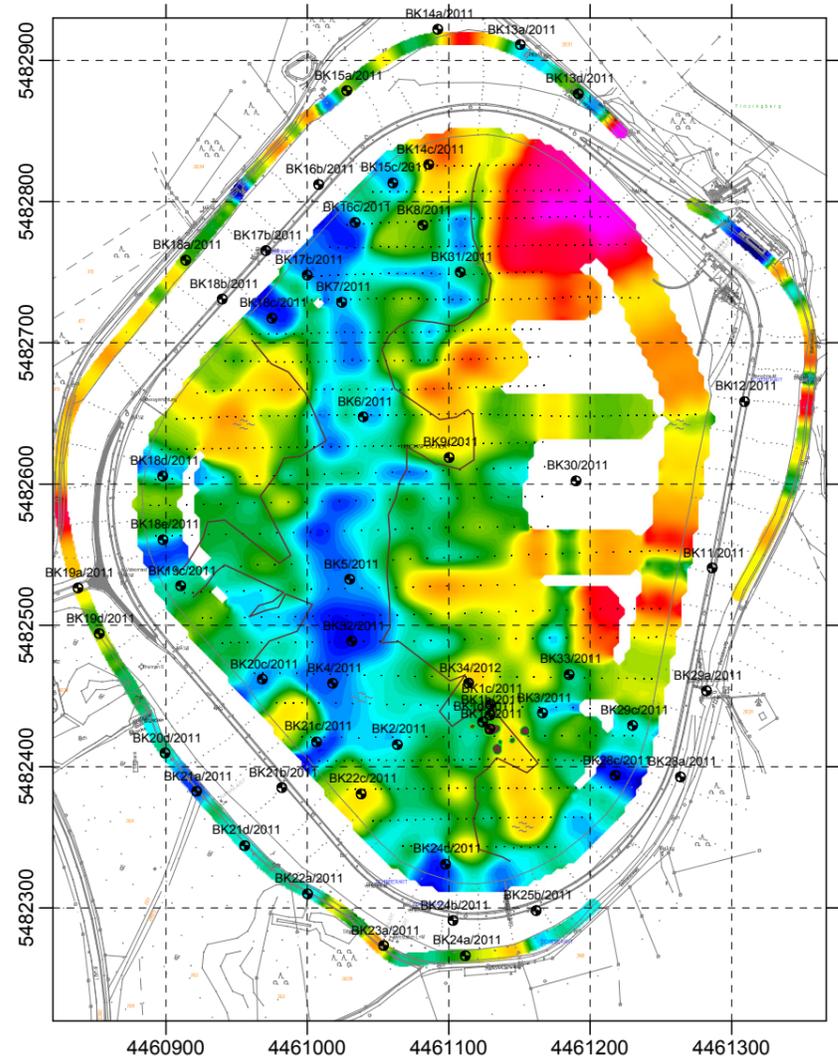
Horizontalschnitt bei ca. 547.5 m NN (Tiefe ca. 13.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 545.0 m NN (Tiefe ca. 16.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 543.0 m NN (Tiefe ca. 18.0 m u. Beckensohle)



**Legende**

- Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert
  - BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung
  - Erdfall
- Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in  $[\Omega m]$
- 

Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

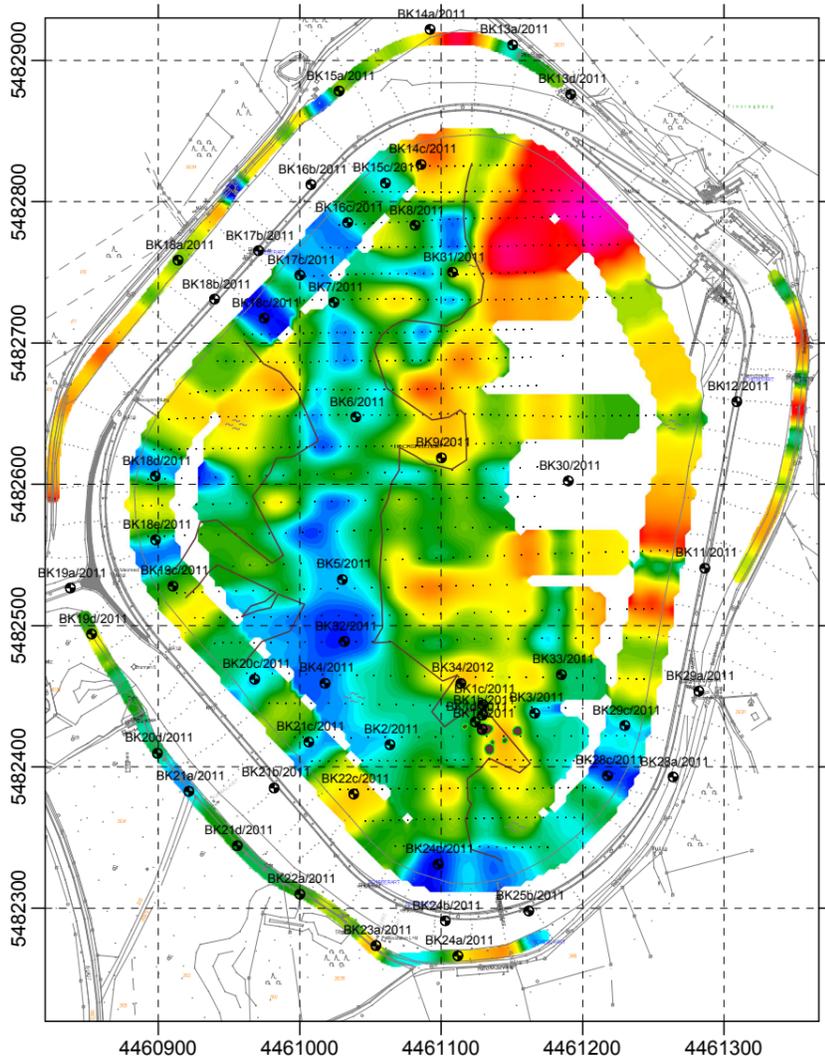


**Geophysik GGD**

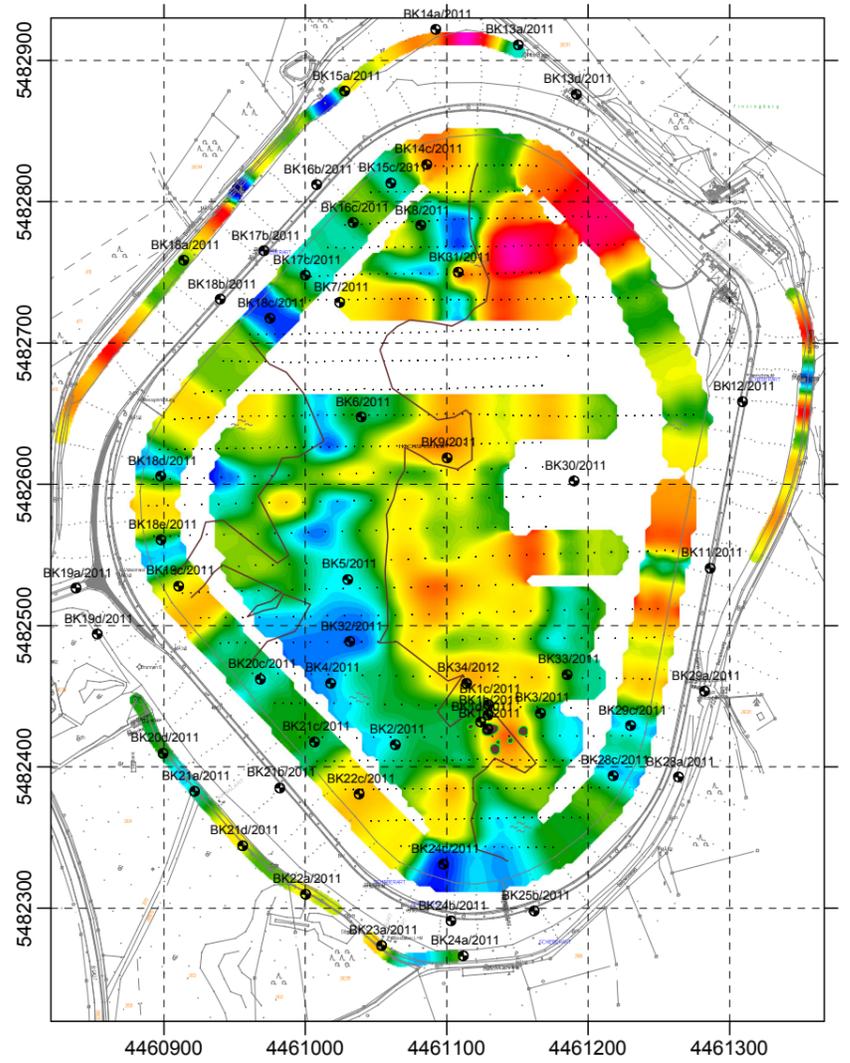
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 - E25, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 549.5 m - 543.0 m ü. NN	Maßstab: 1 : 5000
angef.: Schw.	Datum: 05.09.2011	Anlage: 2.2.3

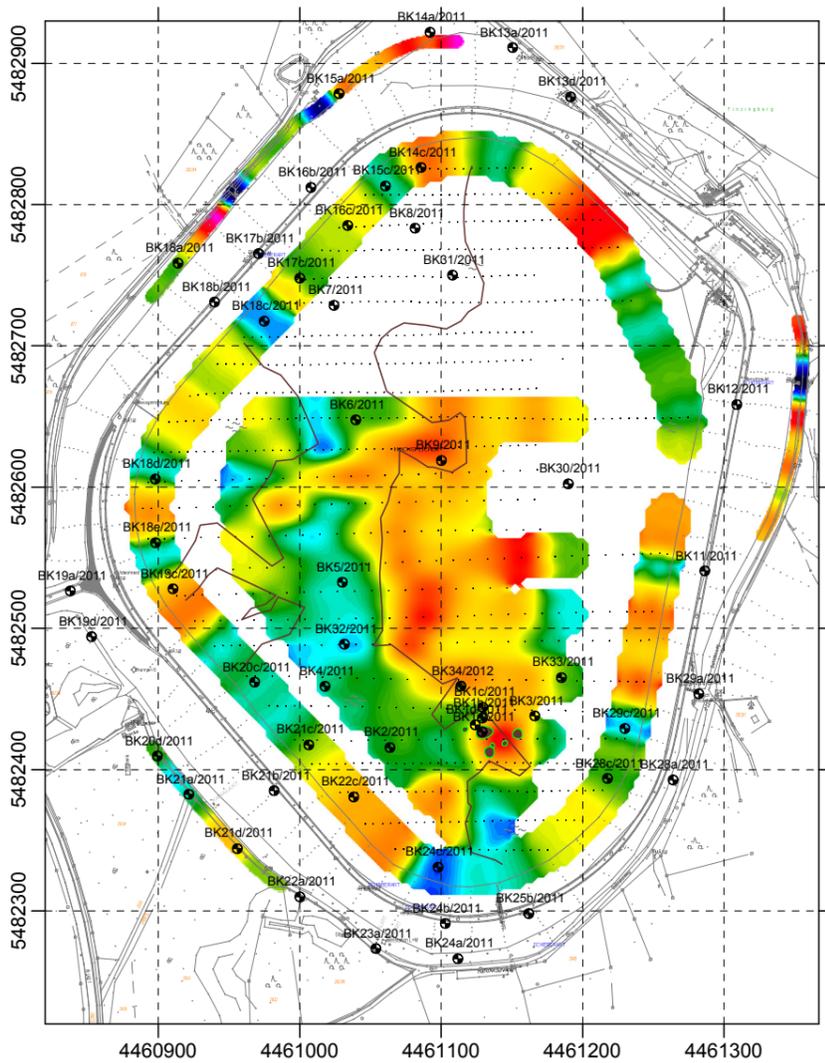
Horizontalschnitt bei ca. 540.0 m NN (Tiefe ca. 21.0 m u. Beckensohle)



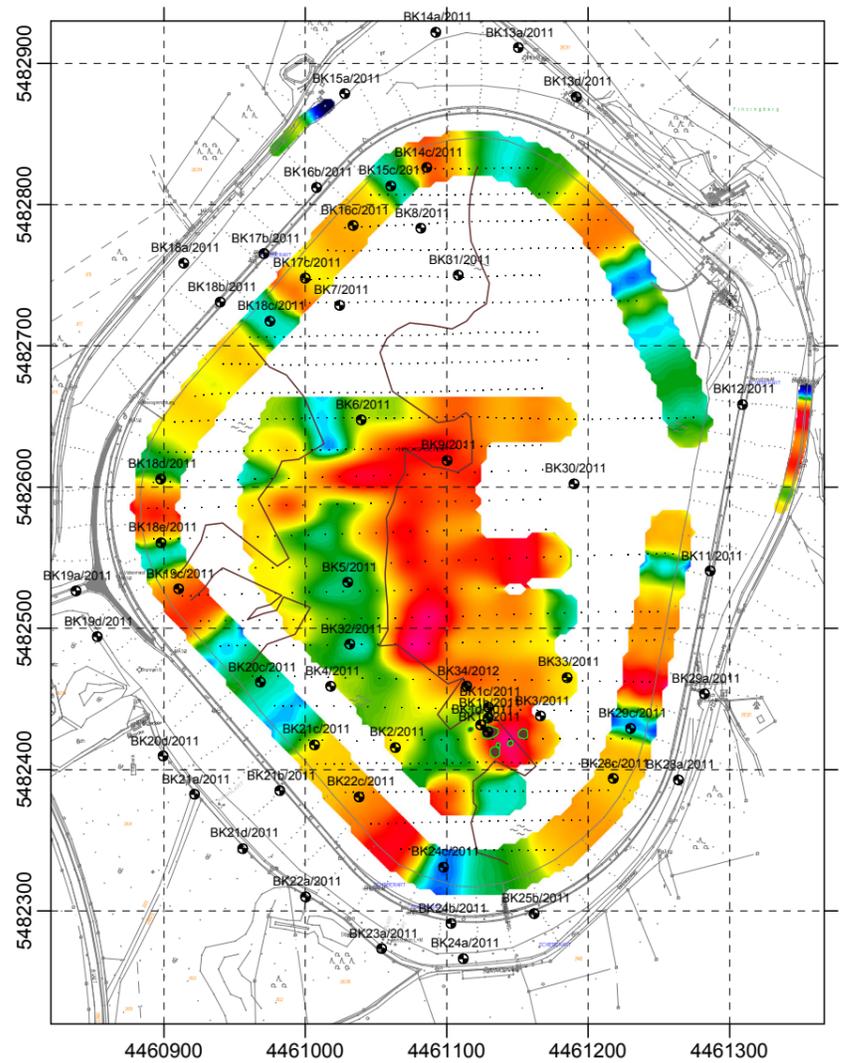
Horizontalschnitt bei ca. 537.0 m NN (Tiefe ca. 24.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 534.0 m NN (Tiefe ca. 27.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 531.0 m NN (Tiefe ca. 30.0 m u. Beckensohle)



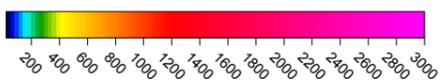
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

**Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in  $[\Omega m]$



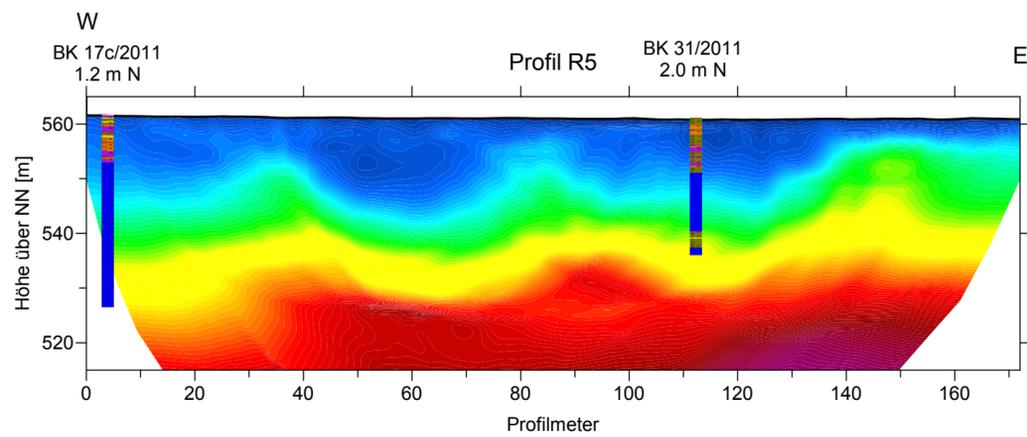
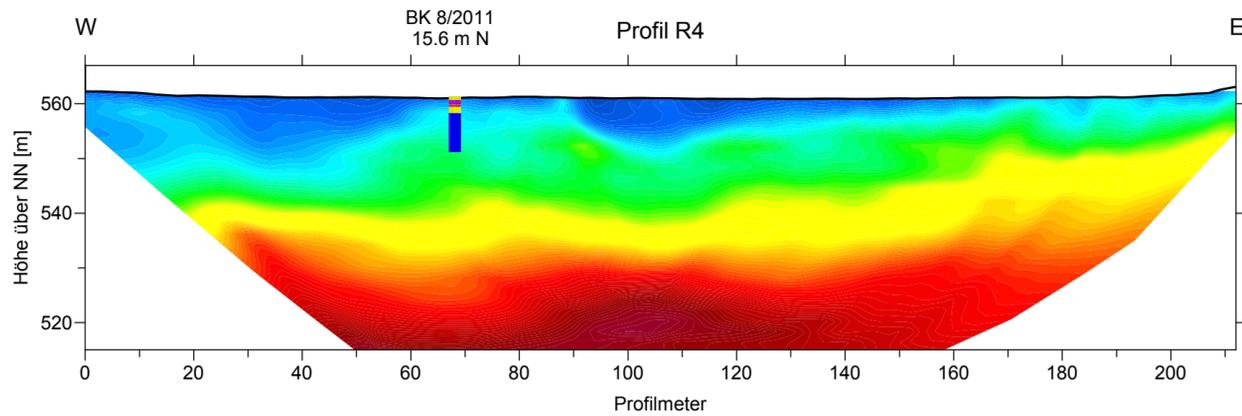
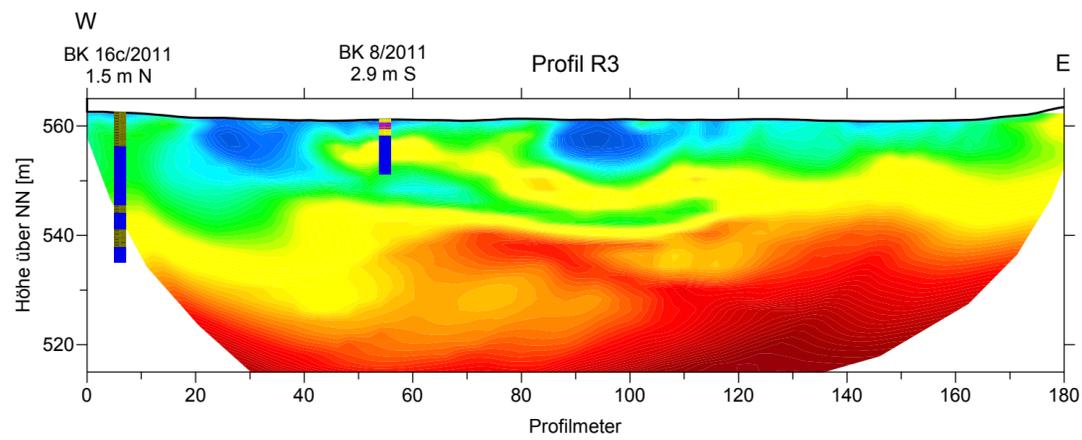
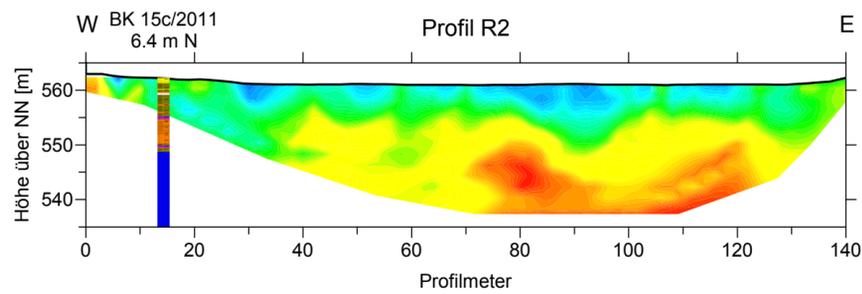
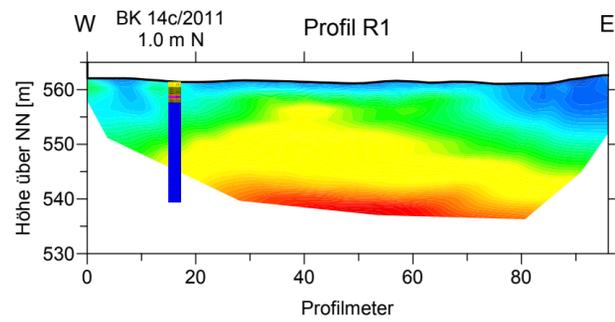
Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN



**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1 - E25, E30 (äußerer Dammfuß) und E31 (innerer Dammfuß), Tiefenniveaus 540.0 m - 531.0 m ü. NN	Maßstab: 1 : 5000
angef.: Schw.	Datum: 05.09.2011	Anlage: 2.2.4



### Legende

BK 14c/2011 Bohrung mit Name,  
1.0 m N Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

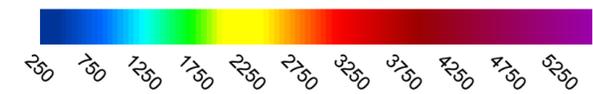


Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt



Kalkstein erbohrt

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



**Geophysik cGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken  
Seismische Refraktionstomographie und  
geoelektrische Sondierungskartierung

Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau  
Luitpoldstraße 27  
84034 Landshut

Bearbeiter:  
Dipl.-Geophys.  
J. Schwabe

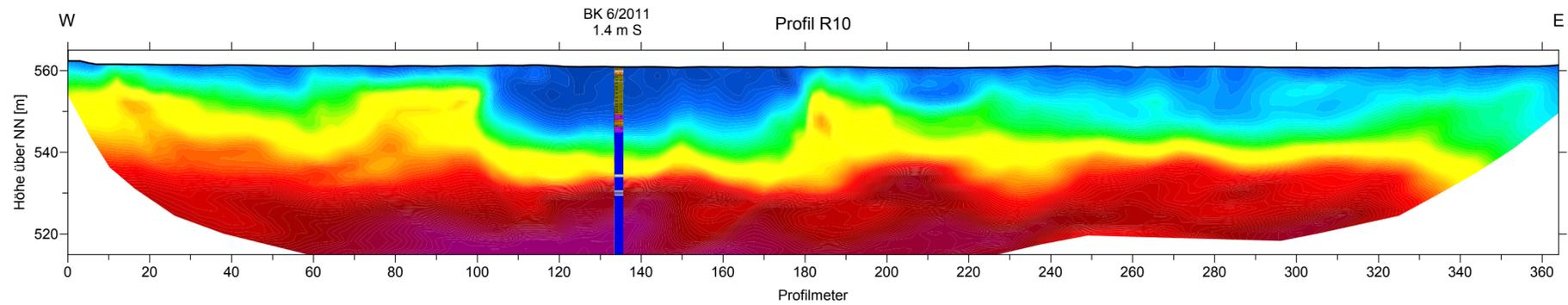
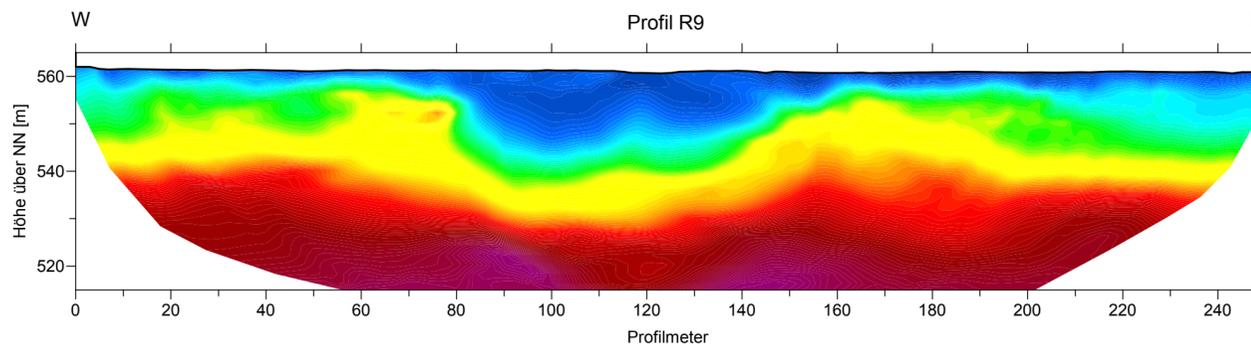
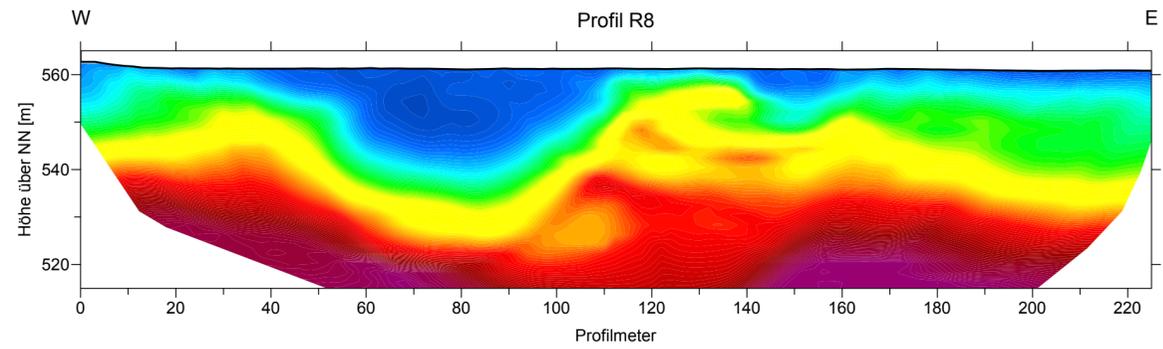
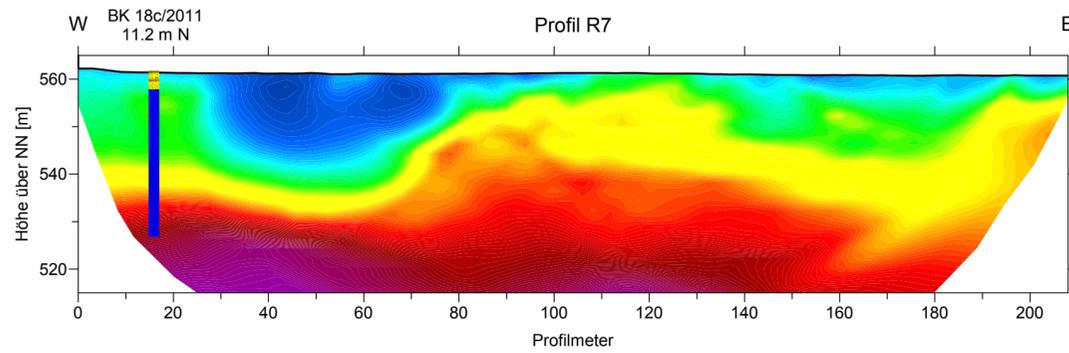
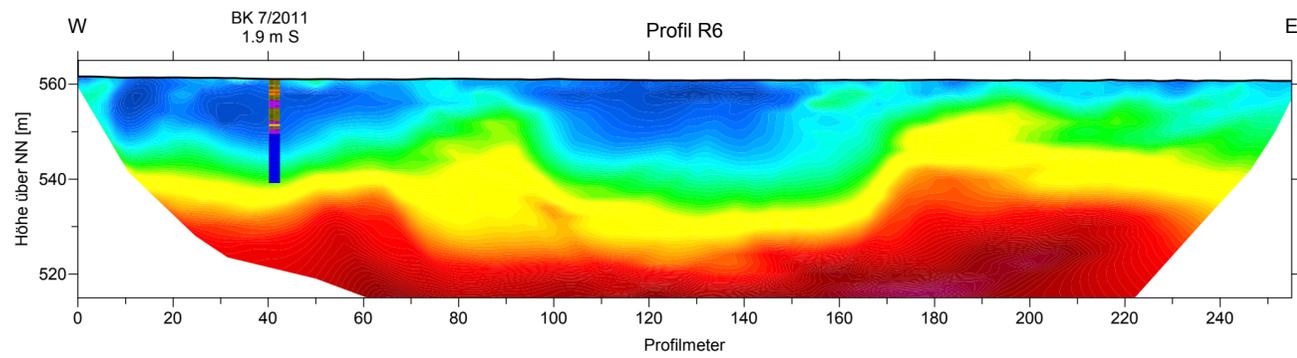
Titel: Darstellung der Kompressionswellengeschwindigkeit  
der Profile R1 bis R5

Maßstab:  
1 : 1000

angef.: Schw.

Datum: 01.09.2011

Anlage: 3.1.1



### Legende

BK 7/2011 Bohrung mit Name,  
1.9 m S Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

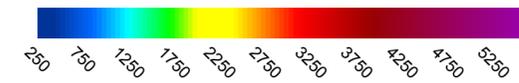


Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt



Kalkstein erbohrt

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m. b. H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken  
Seismische Refraktionstomographie und  
geoelektrische Sondierungskartierung

Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau  
Luitpoldstraße 27  
84034 Landshut

Bearbeiter:  
Dipl.-Geophys.  
J. Schwabe

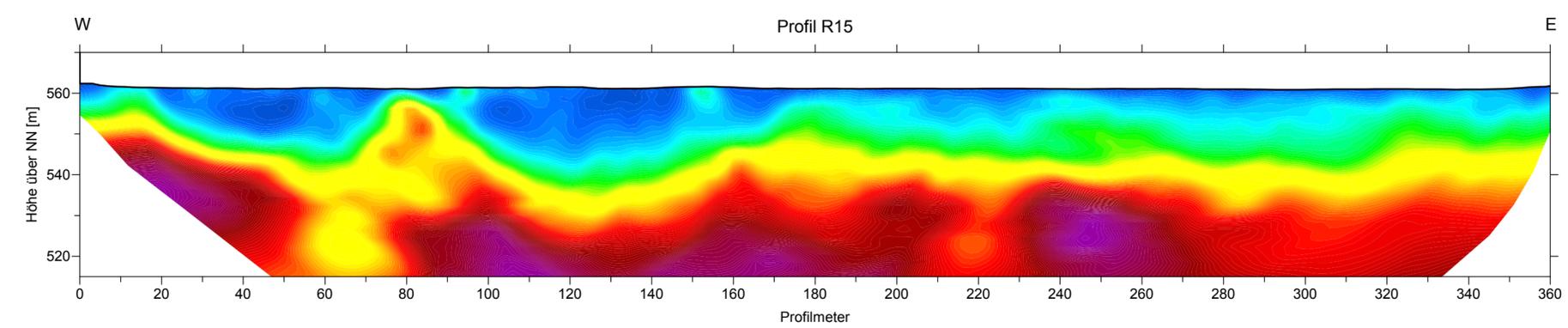
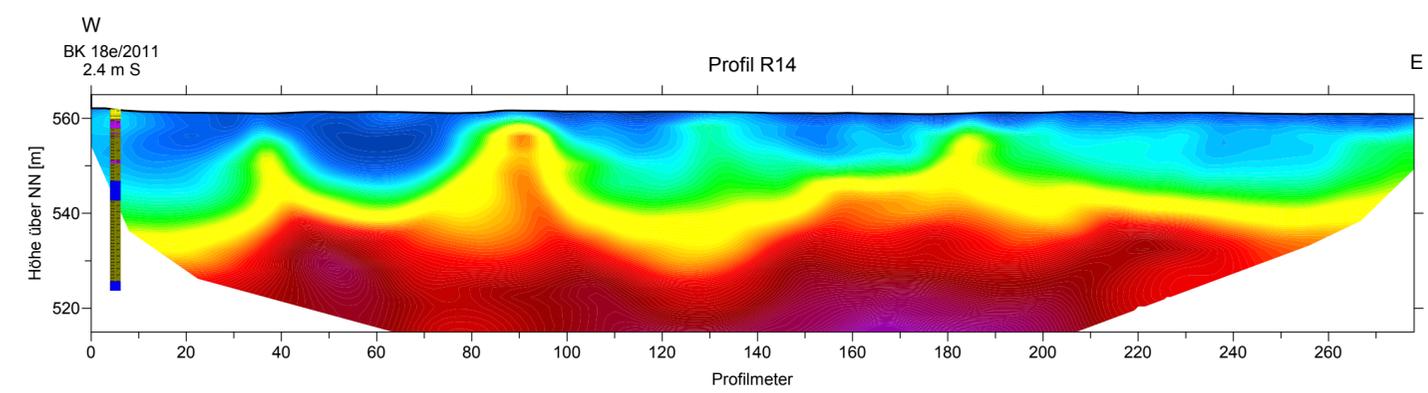
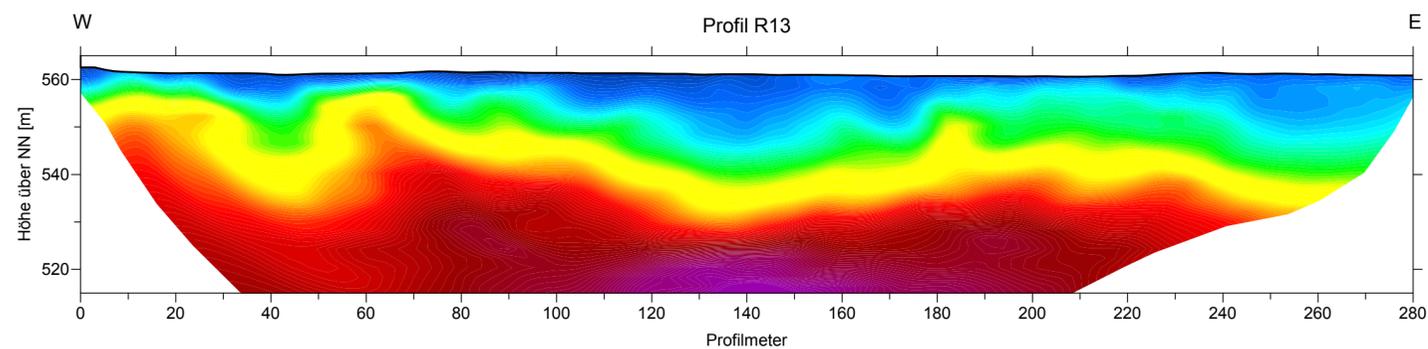
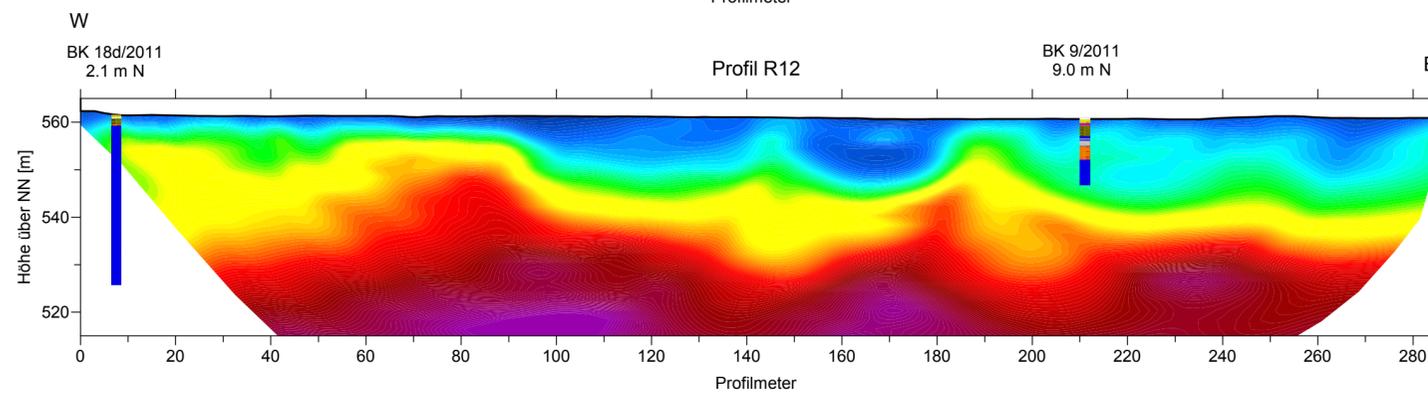
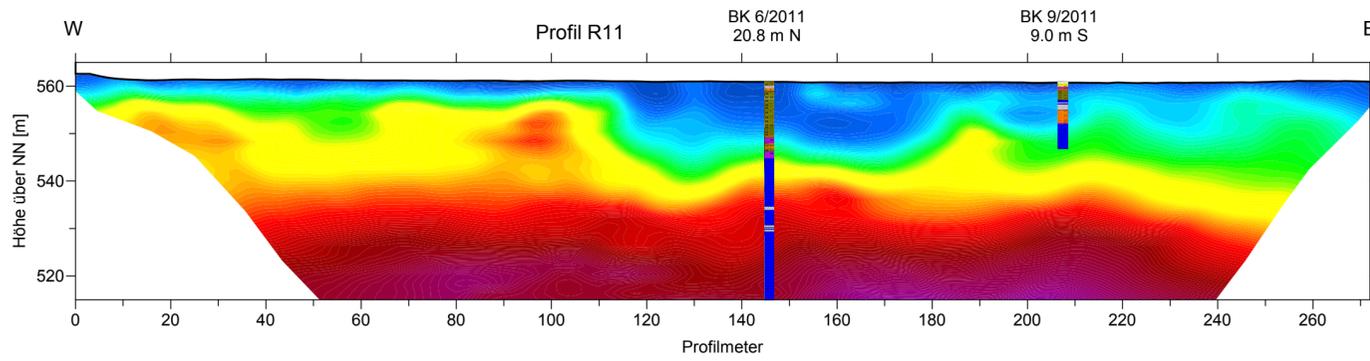
Titel: Darstellung der Kompressionswellengeschwindigkeit  
der Profile R6 bis R10

Maßstab:  
1 : 1000

angef.: Schw.

Datum: 31.08.2011

Anlage: 3.1.2



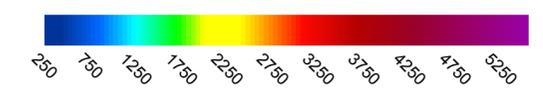
Legende

BK 6/2011 Bohrung mit Name,  
20.8 m N Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

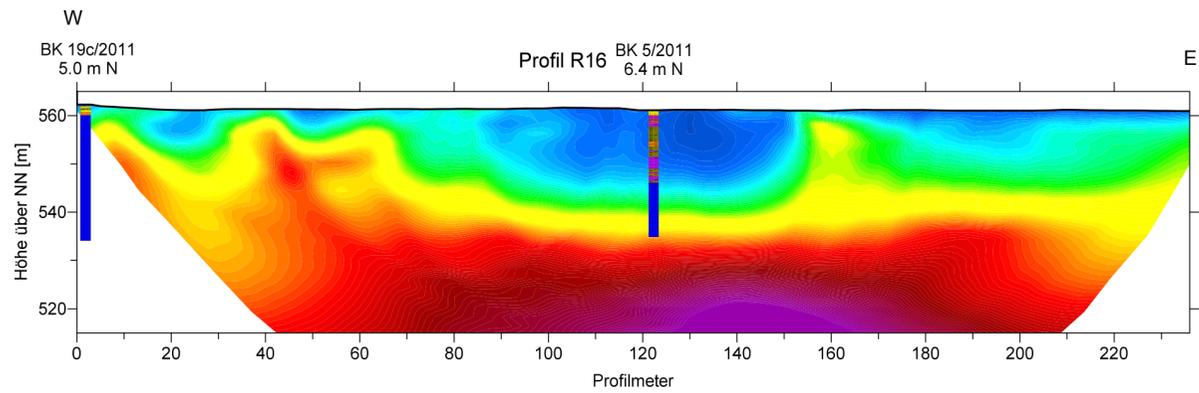
Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

Kalkstein erbohrt

**P-Wellengeschwindigkeit in m/s**



<p><b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</p>		
Objekt:	<p>PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung</p>	
Auftraggeber:	<p>E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut</p>	Bearbeiter:
		<p>Dipl.-Geophys. J. Schwabe</p>
Titel:	<p>Darstellung der Kompressionswellengeschwindigkeit der Profile R11 bis R15</p>	
		Maßstab:
		<p>1 : 1000</p>
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 3.1.3



**Legende**

BK 5/2011 Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil  
6.4 m N

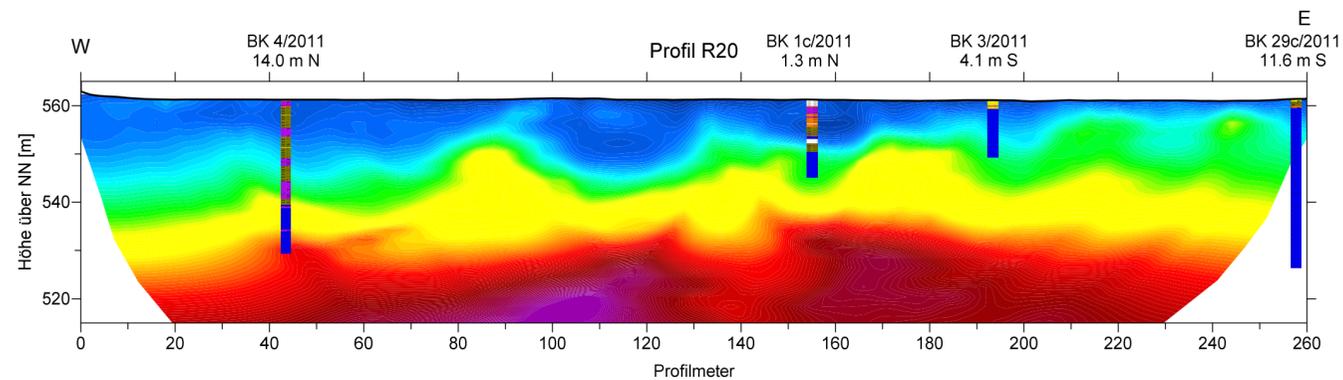
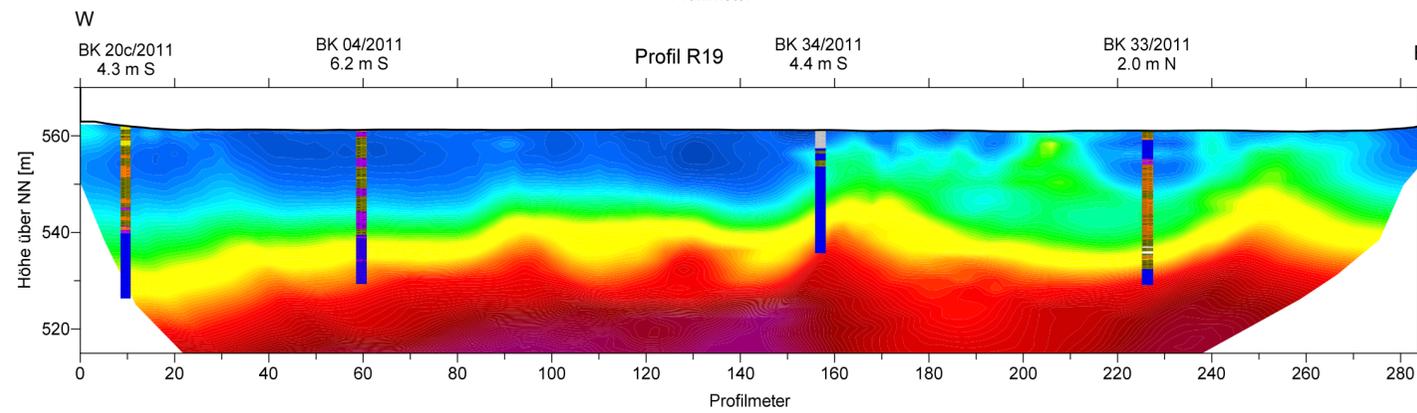
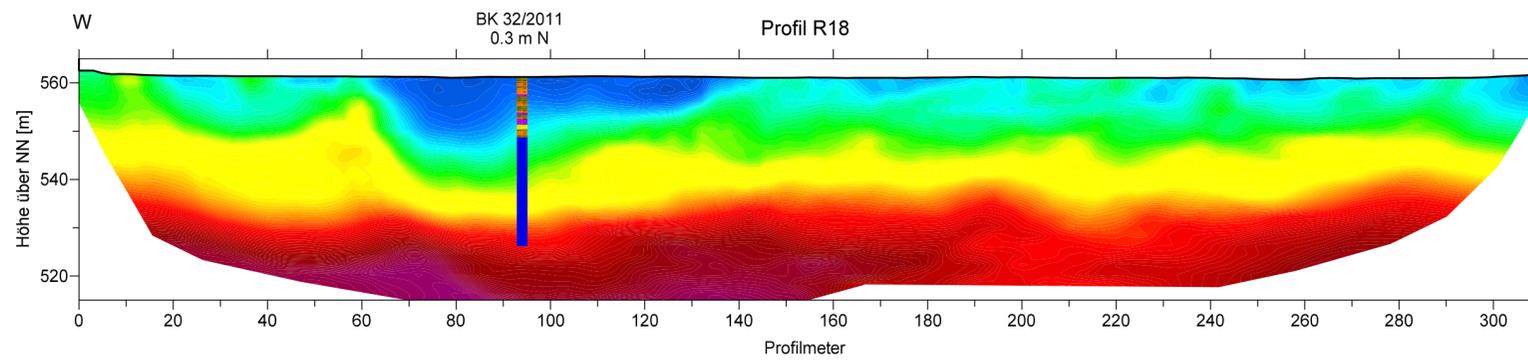
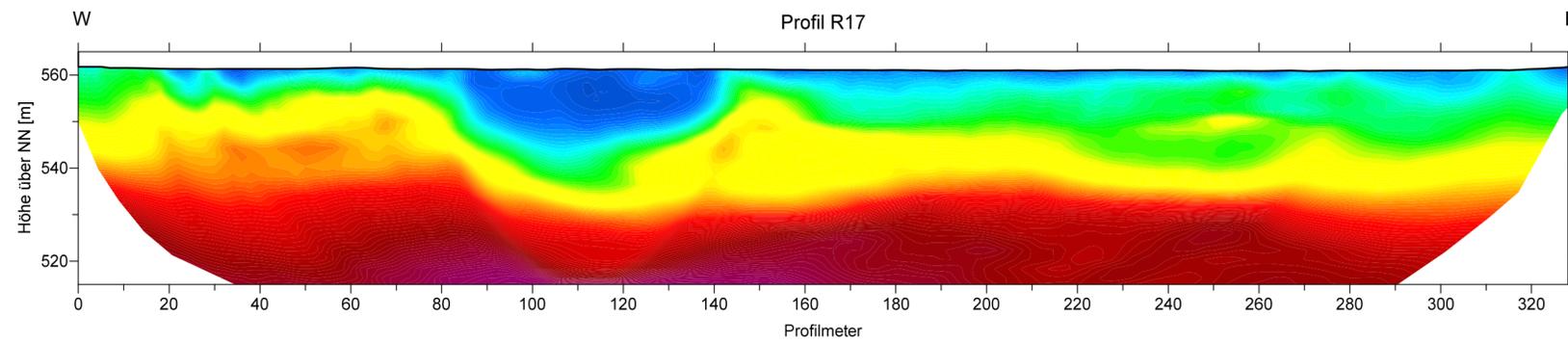
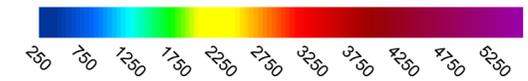


Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt

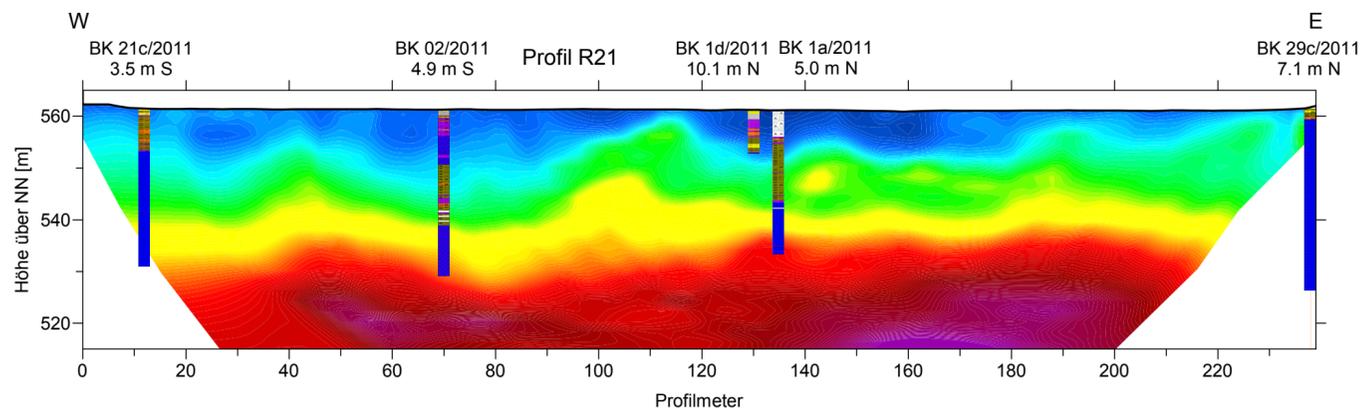


Kalkstein erbohrt

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



<p><b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</p>		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Darstellung der Kompressionswellengeschwindigkeit der Profile R16 bis R20	Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 3.1.4



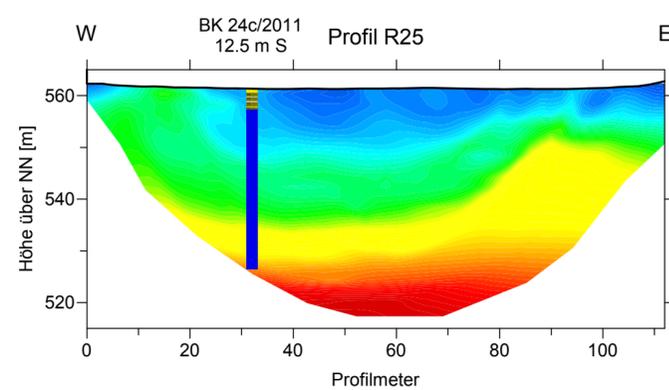
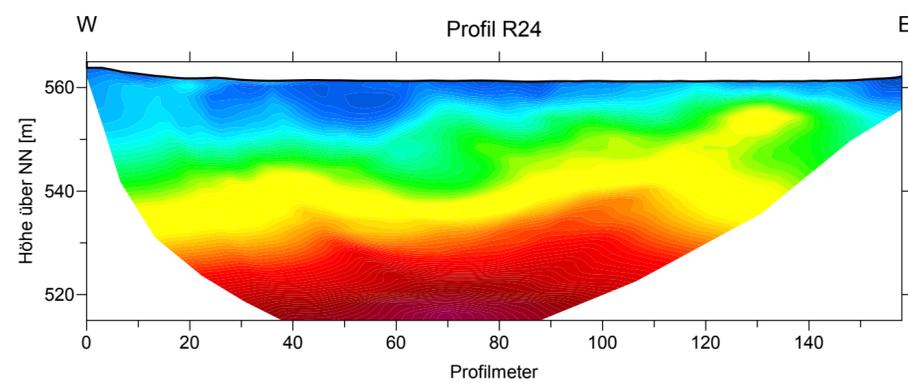
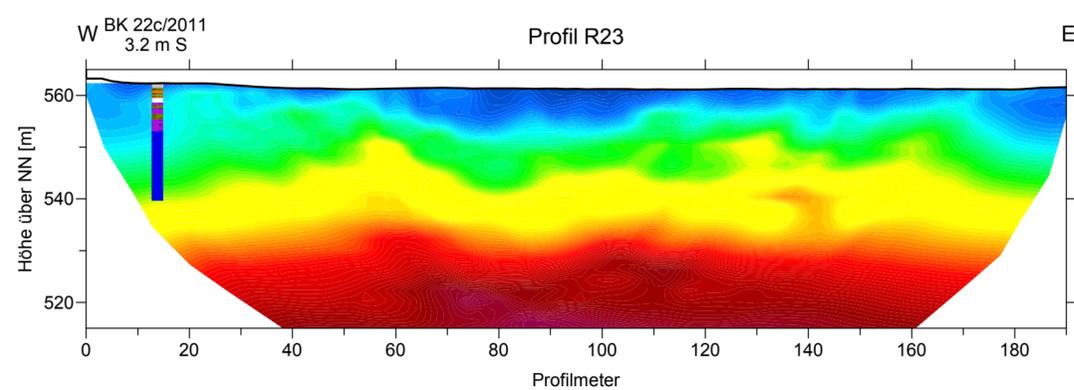
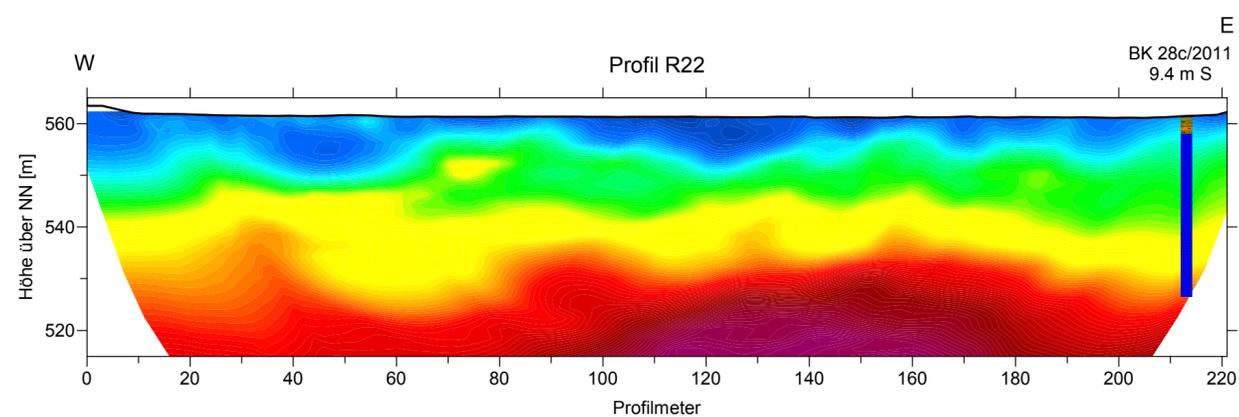
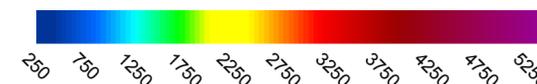
### Legende

BK 21c/2011 Bohrung mit Name,  
3.5 m S Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

 Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

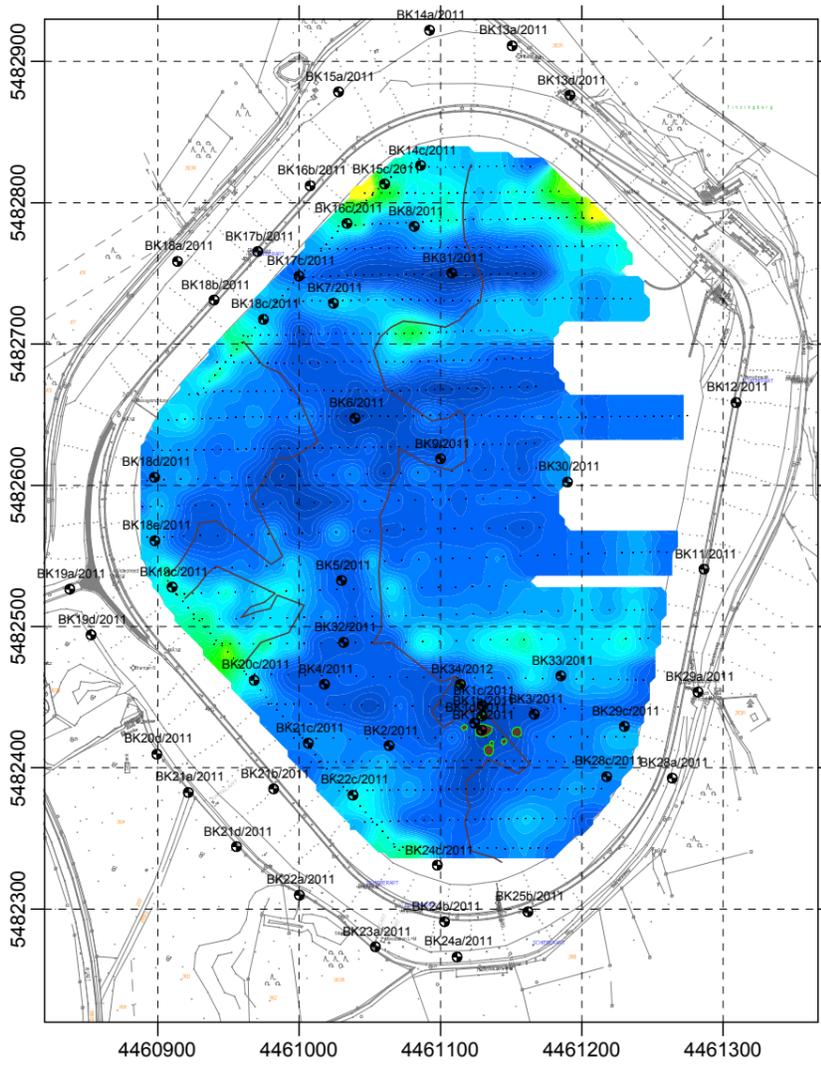
 Kalkstein erbohrt

P-Wellengeschwindigkeit in m/s

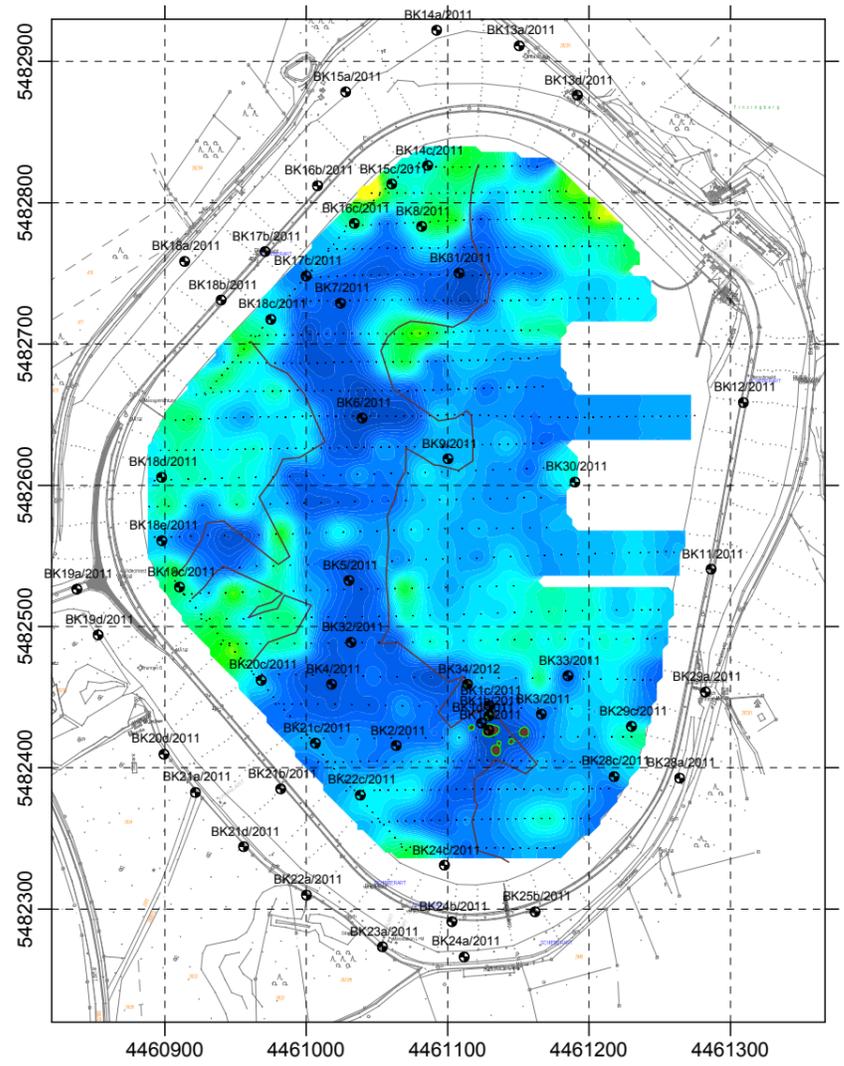


 <b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Darstellung der Kompressionswellengeschwindigkeit der Profile R21 bis R25	Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 3.1.5

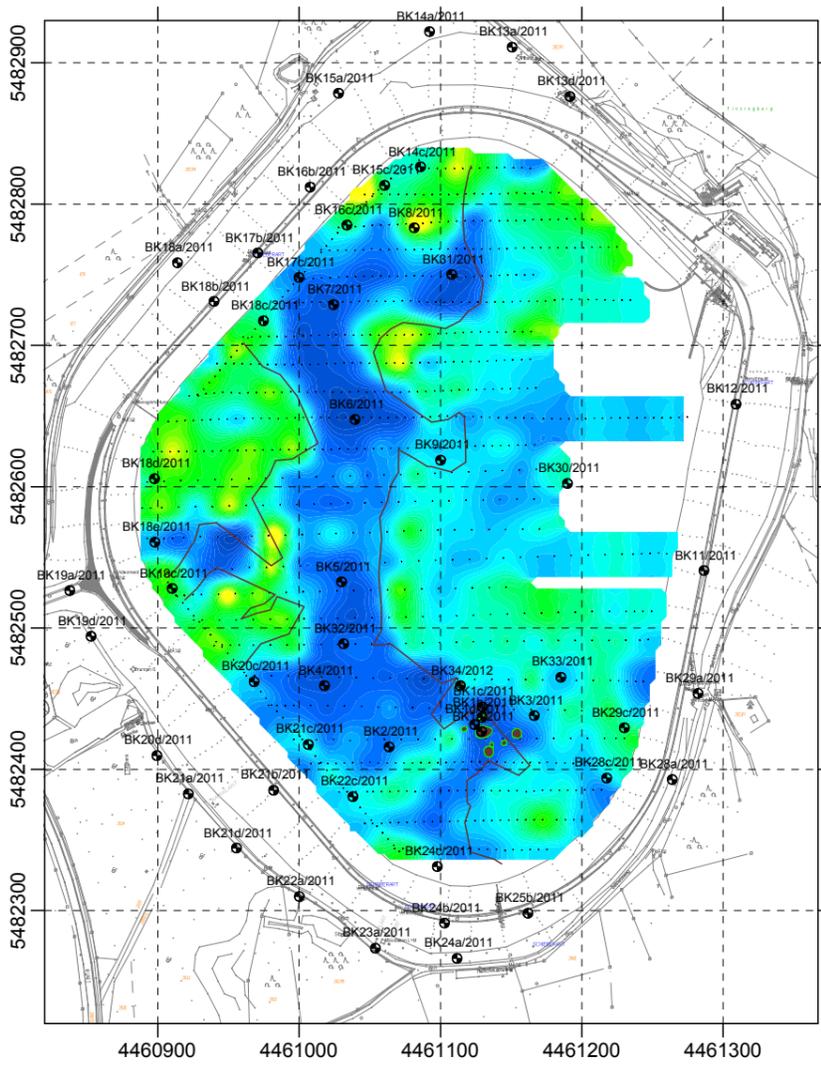
Horizontalschnitt bei ca. 559.0 m NN (Tiefe ca. 2.0 m u. Beckensohle)



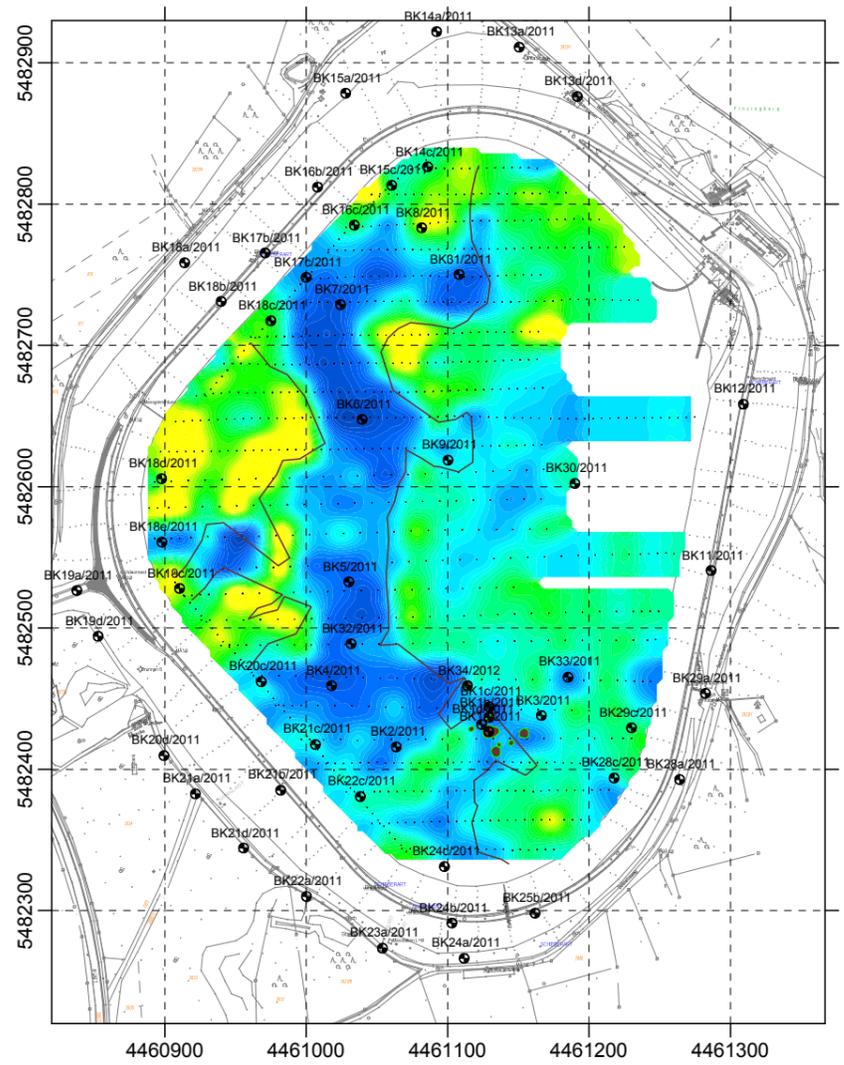
Horizontalschnitt bei ca. 557.0 m NN (Tiefe ca. 4.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 555.0 m NN (Tiefe ca. 6.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 553.0 m NN (Tiefe ca. 8.0 m u. Beckensohle)



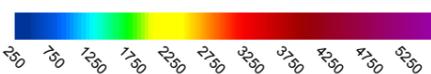
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



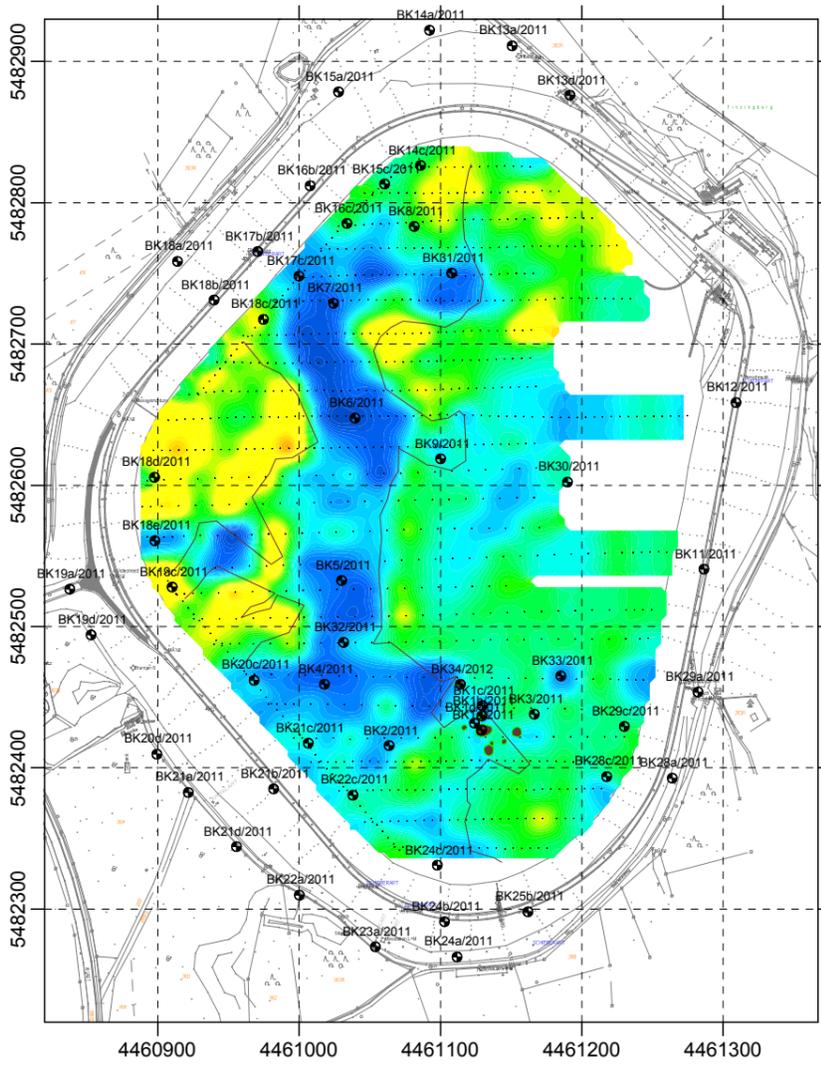
Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

**Geophysik GGD**

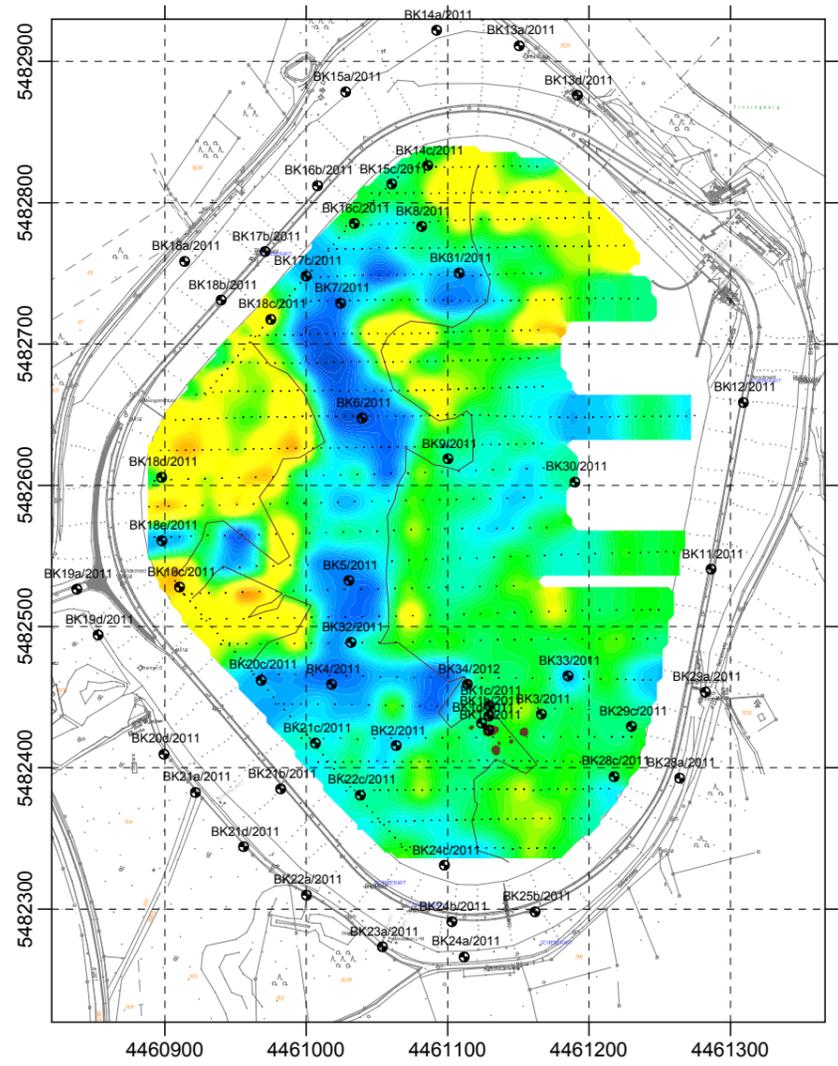
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Hapburg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Maßstab: 1 : 5000
Titel: Refraktionstomographische Horizontalschnitte aus Profilen R1 - R27 Tiefenniveaus 559.0 m - 553.0 m ü. NN		
angef.: Schw.	Datum: 05.09.2011	Anlage: 3.2.1

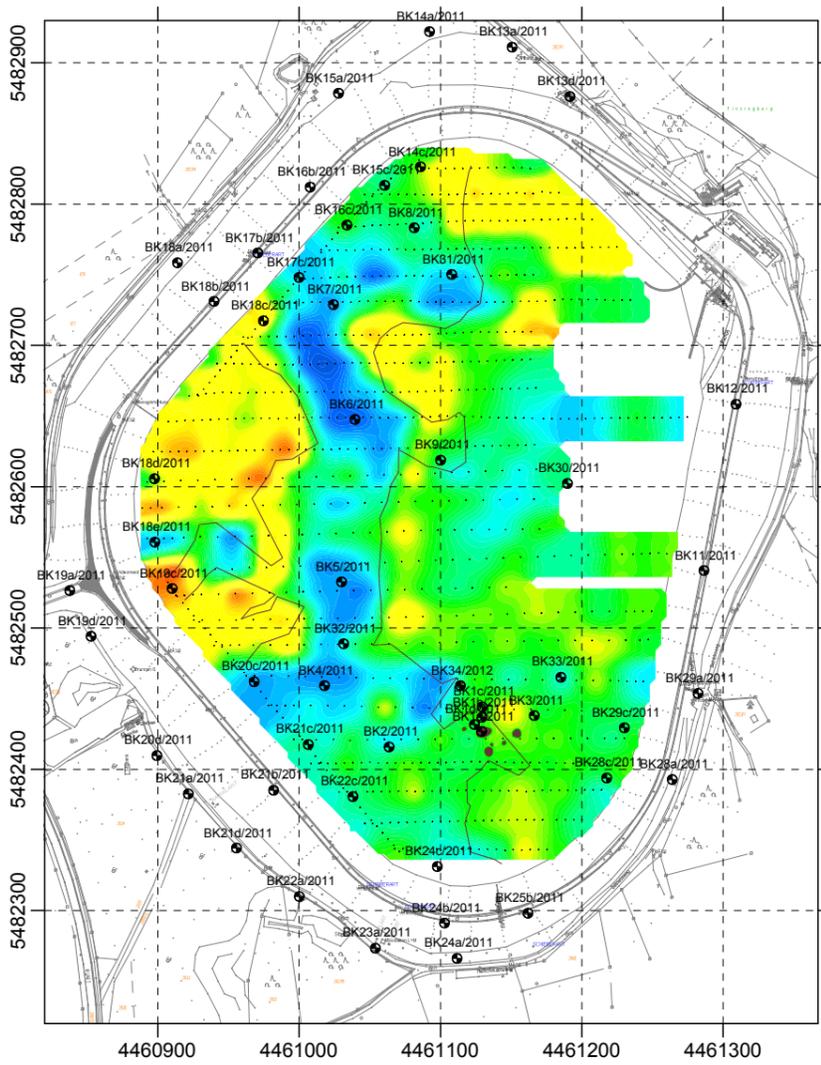
Horizontalschnitt bei ca. 551.0 m NN (Tiefe ca. 10.0 m u. Beckensohle)



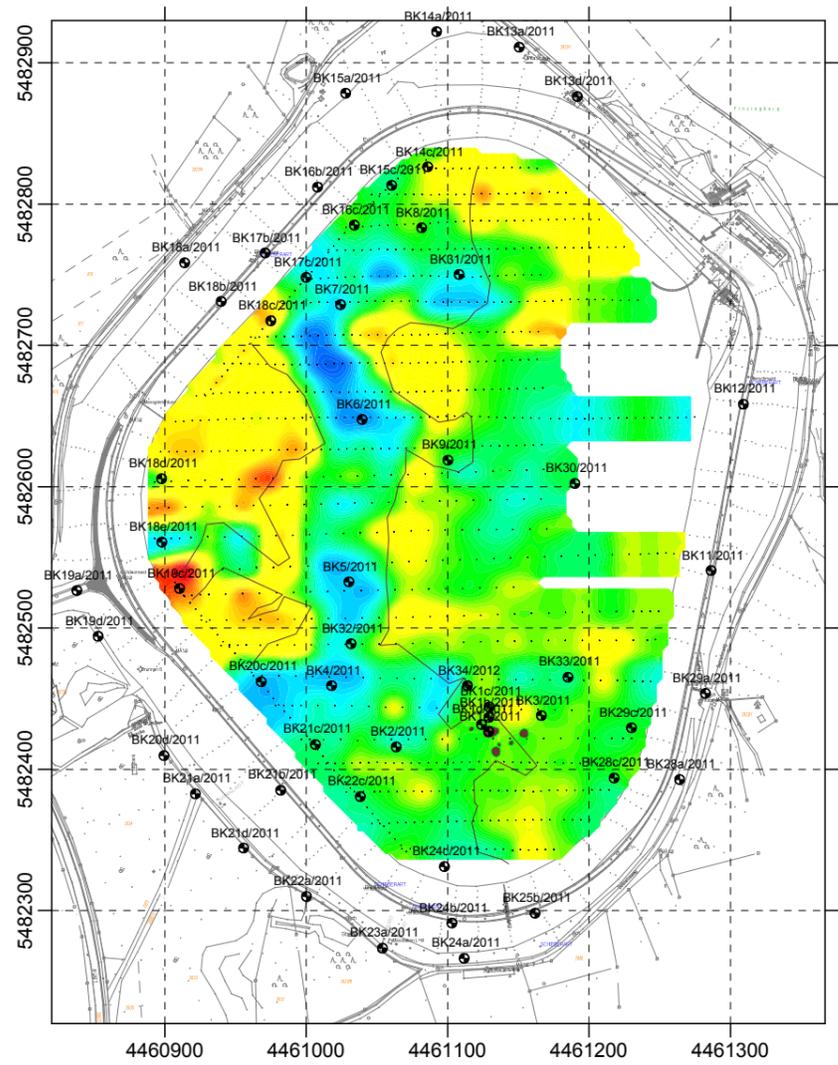
Horizontalschnitt bei ca. 549.0 m NN (Tiefe ca. 12.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 547.0 m NN (Tiefe ca. 14.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 545.0 m NN (Tiefe ca. 16.0 m u. Beckensohle)



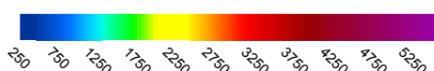
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

● BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

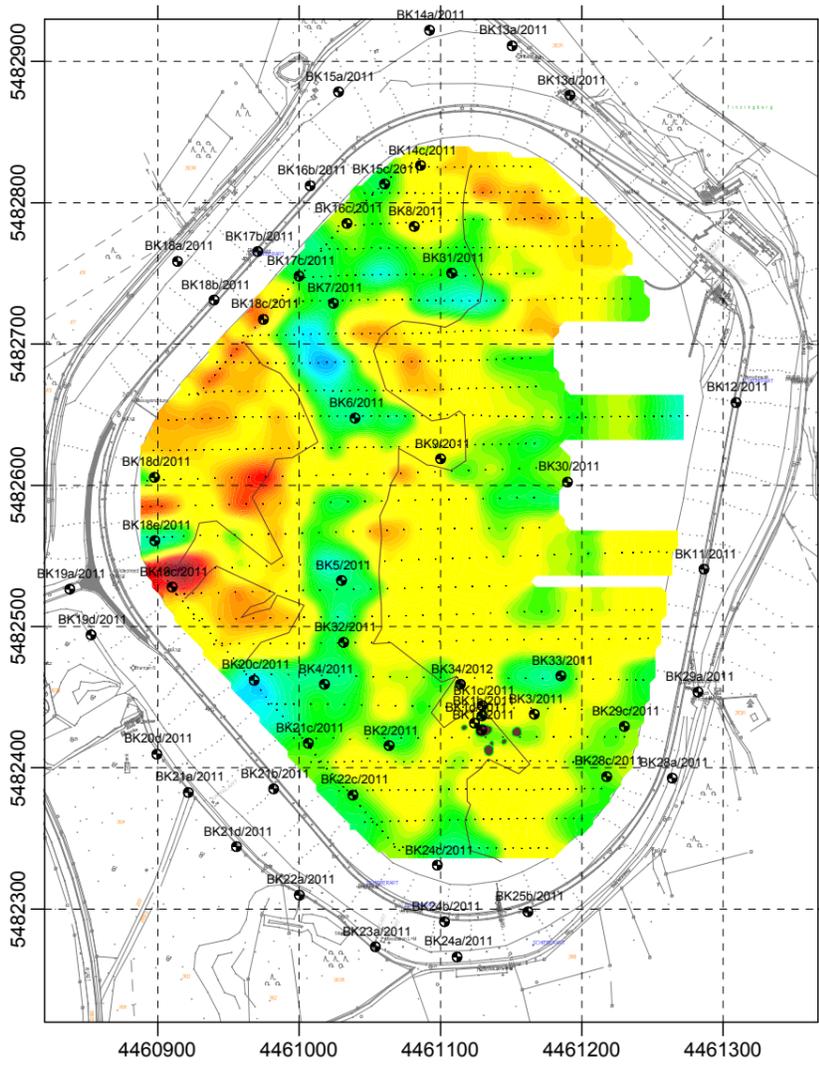


**Geophysik GGD**

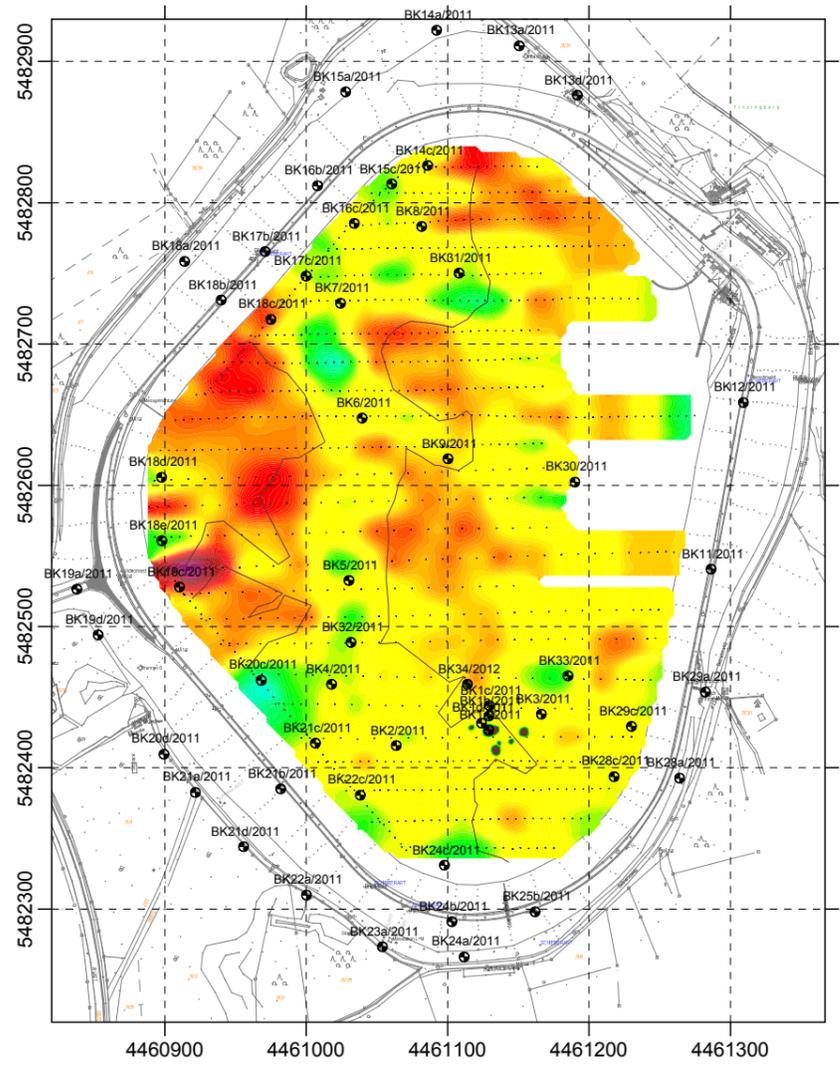
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und goelektrische Sondierkartierung	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Refraktionstomographische Horizontalschnitte aus Profilen R1 - R27 Tiefenniveaus 551.0 m - 545.0 m ü. NN	Maßstab: 1 : 5000
angef.: Schw.	Datum: 05.09.2011	Anlage: 3.2.2

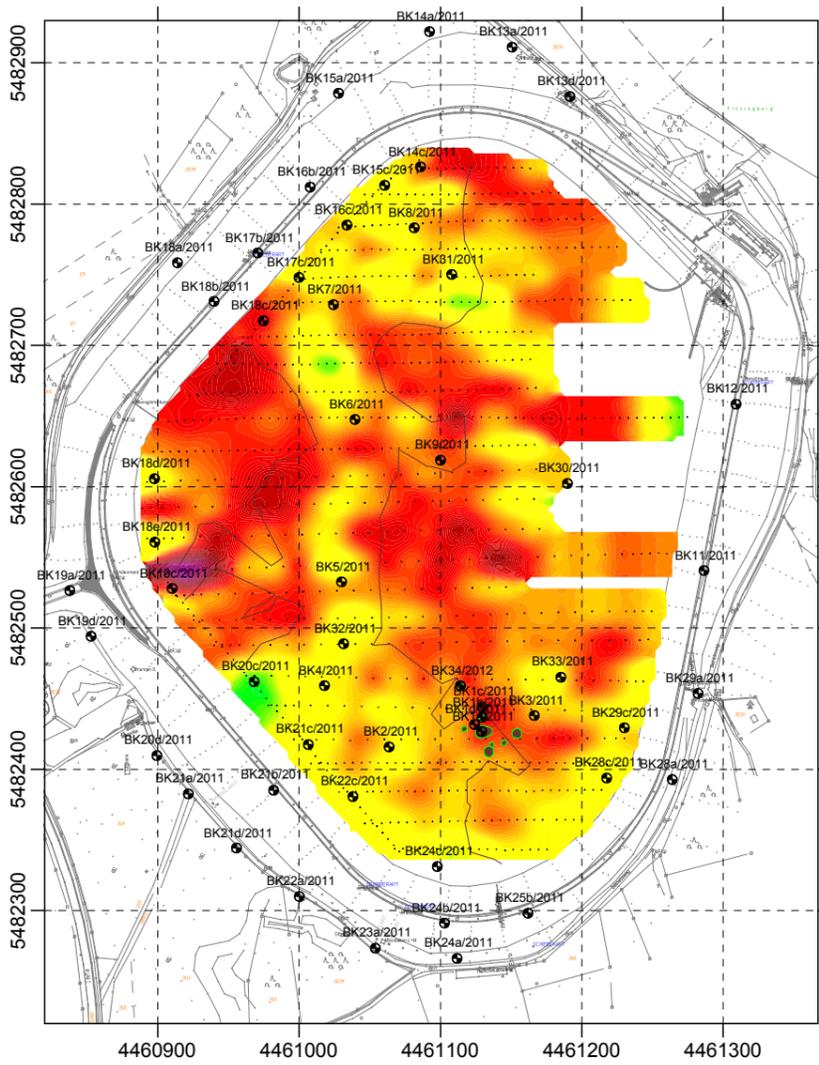
Horizontalschnitt bei ca. 541.0 m NN (Tiefe ca. 20.0 m u. Beckensohle)



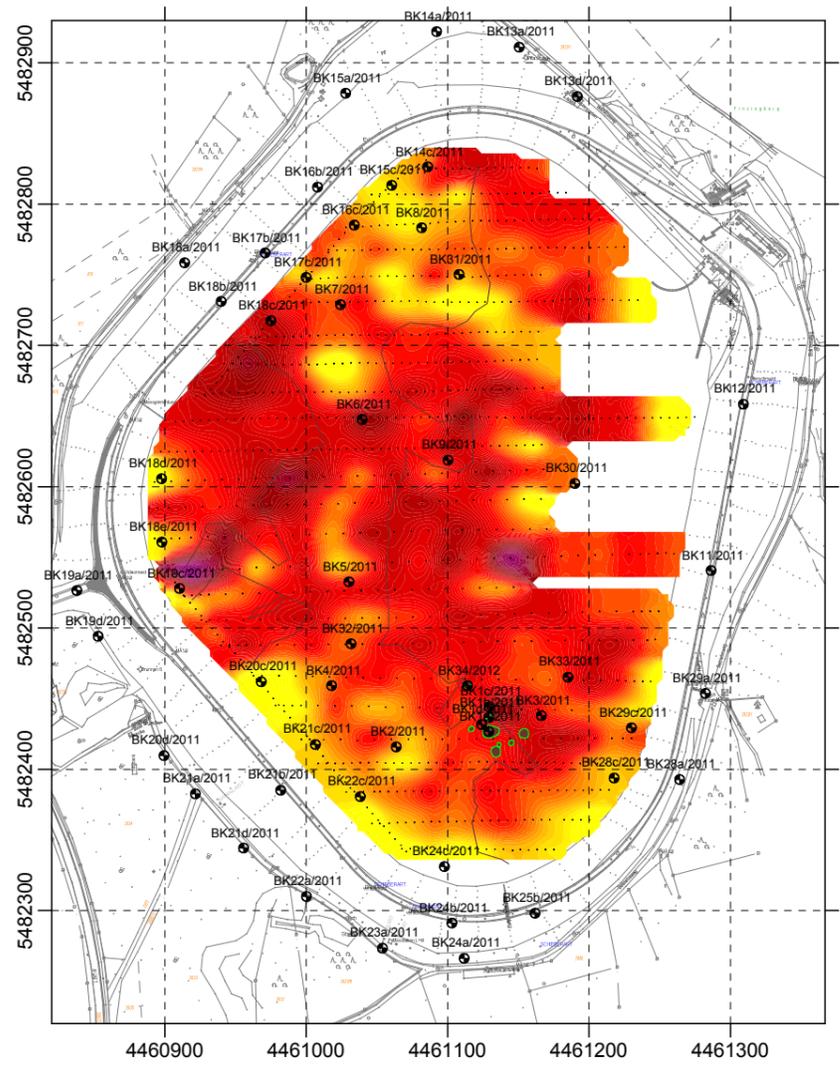
Horizontalschnitt bei ca. 537.0 m NN (Tiefe ca. 24.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 533.0 m NN (Tiefe ca. 28.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 529.0 m NN (Tiefe ca. 32.0 m u. Beckensohle)



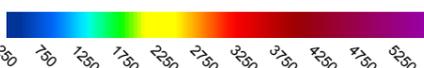
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

● BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

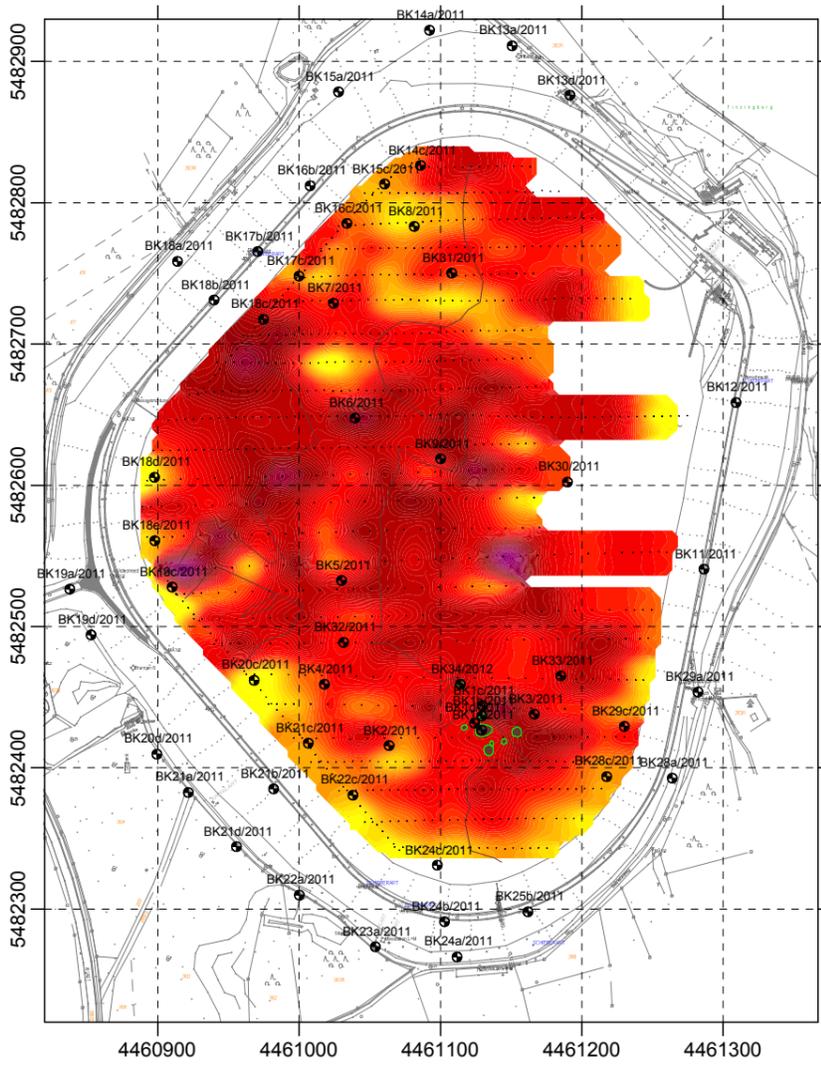


**Geophysik GGD**

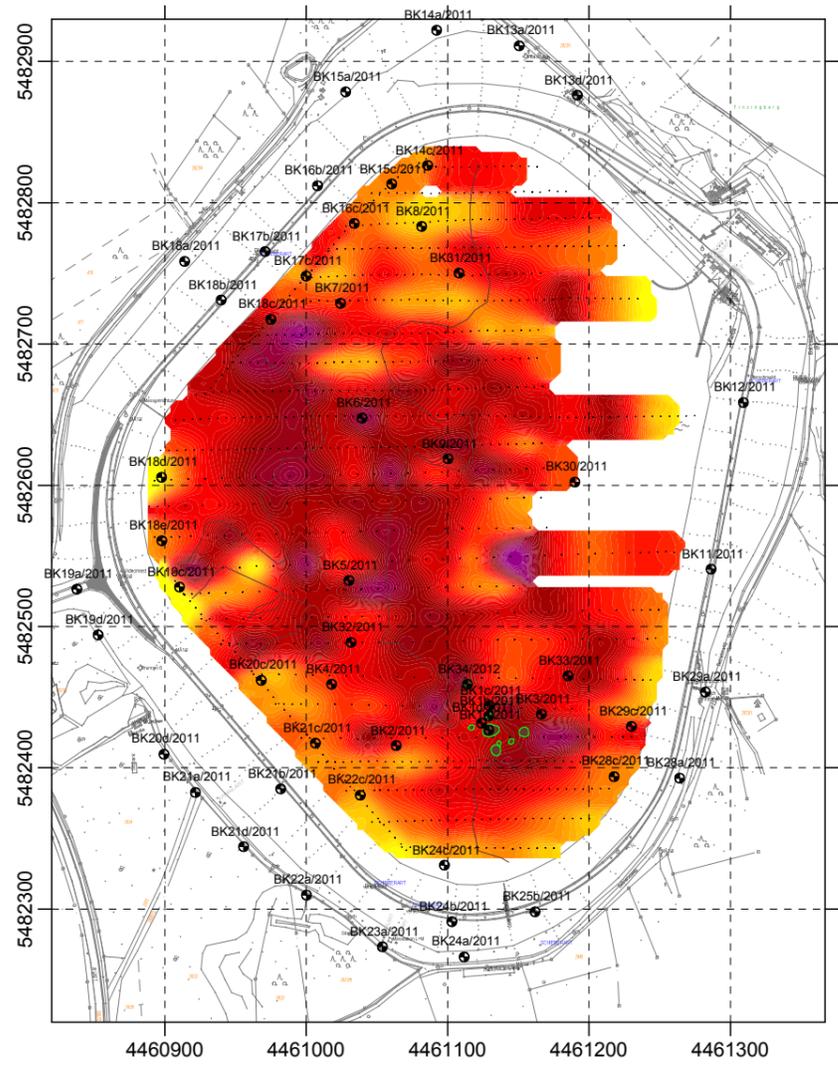
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Maßstab: 1 : 5000
Titel: Refraktionstomographische Horizontalschnitte aus Profilen R1 - R27 Tiefenniveaus 541.0 m - 529.0 m ü. NN		
angef.: Schw.	Datum: 06.09.2011	Anlage: 3.2.3

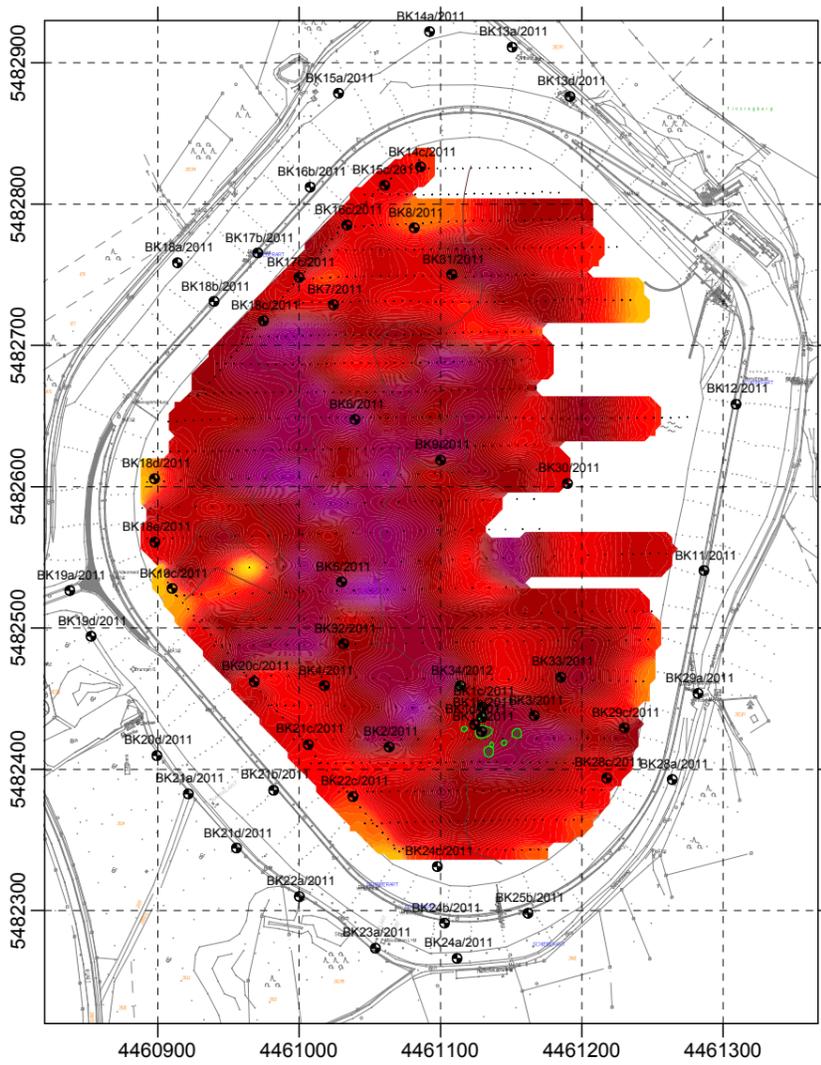
Horizontalschnitt bei ca. 527.0 m NN (Tiefe ca. 34.0 m u. Beckensohle)



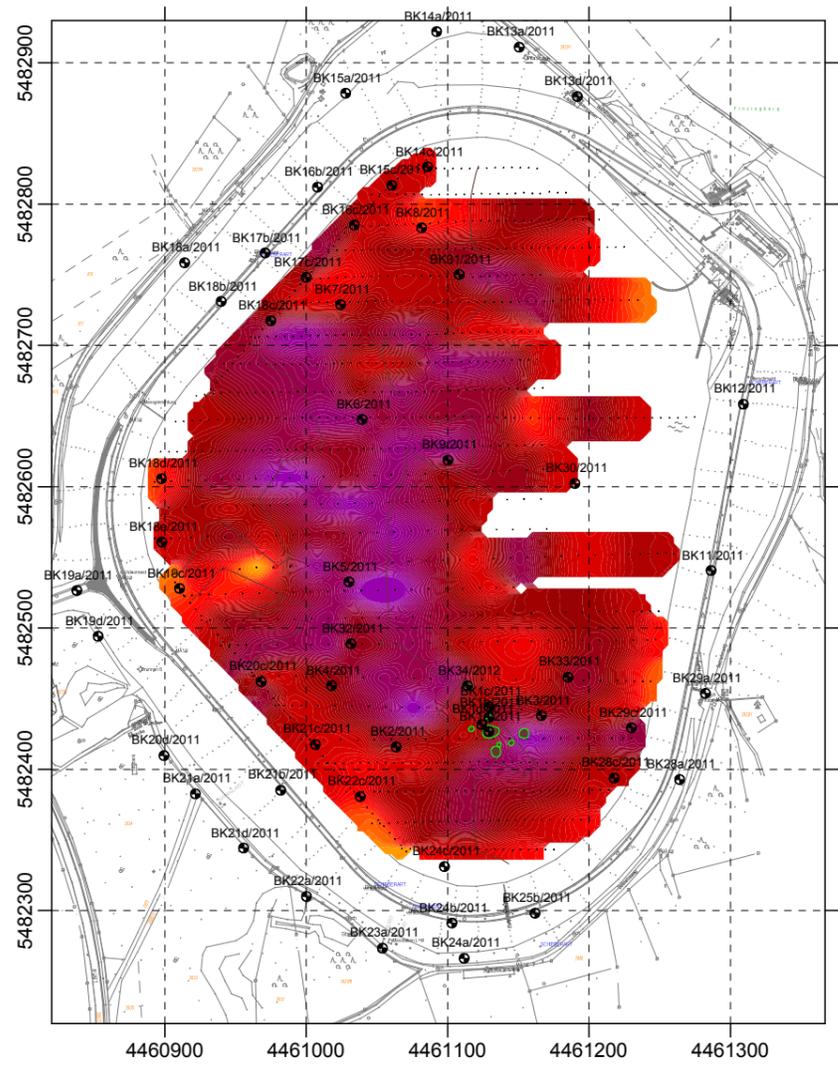
Horizontalschnitt bei ca. 523.0 m NN (Tiefe ca. 38.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 519.0 m NN (Tiefe ca. 42.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 515.0 m NN (Tiefe ca. 46.0 m u. Beckensohle)



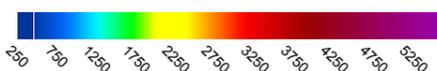
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

P-Wellengeschwindigkeit in m/s



Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

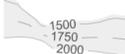
**Geophysik GGD**

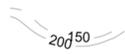
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung	
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel: Refraktionstomographische Horizontalschnitte aus Profilen R1 - R27 Tiefenniveaus 527.0 m - 515.0 m ü. NN	
Maßstab: 1 : 5000	Anlage: 3.2.4
angef.: Schw.	Datum: 06.09.2011

## Legende

-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone

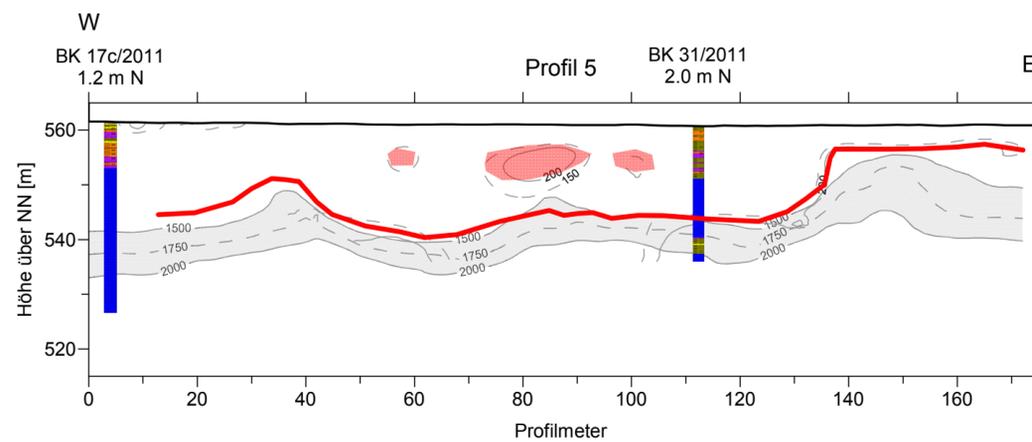
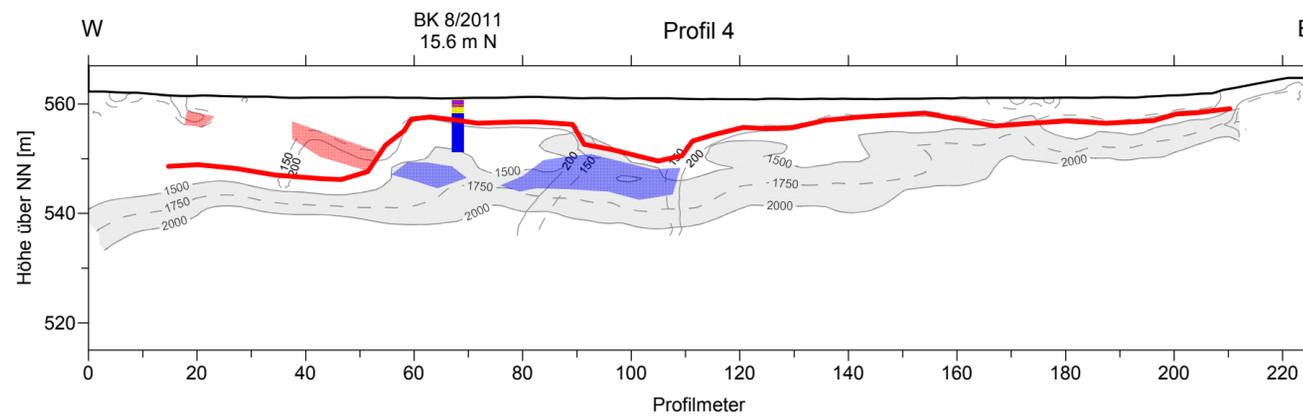
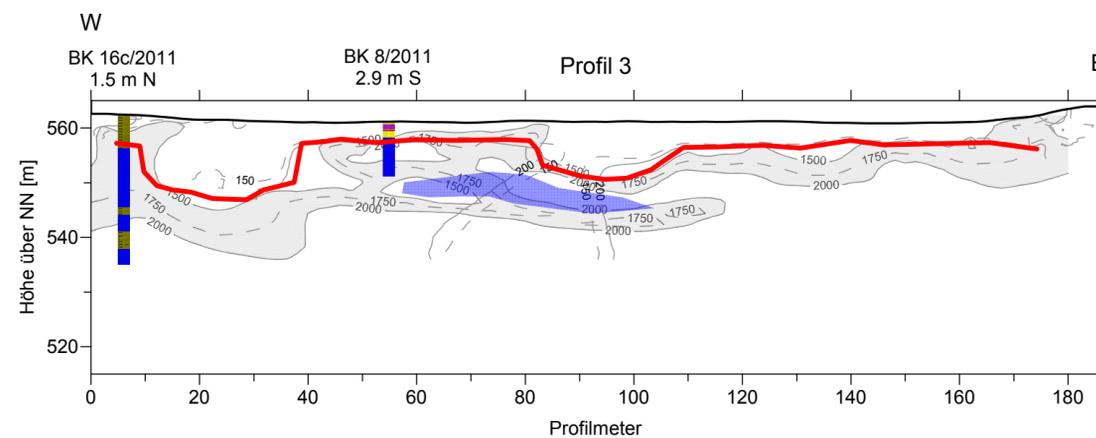
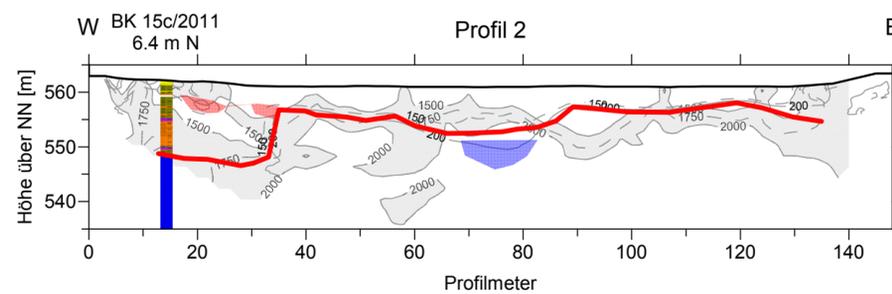
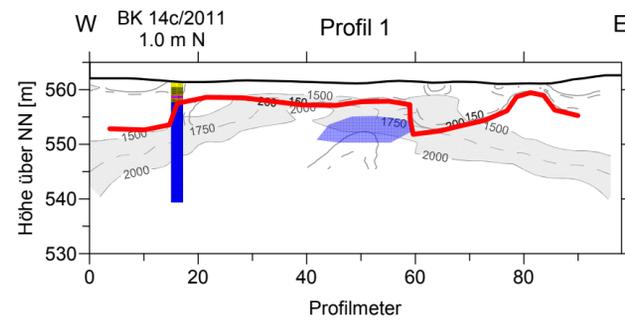
 Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s

 Isohomen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm

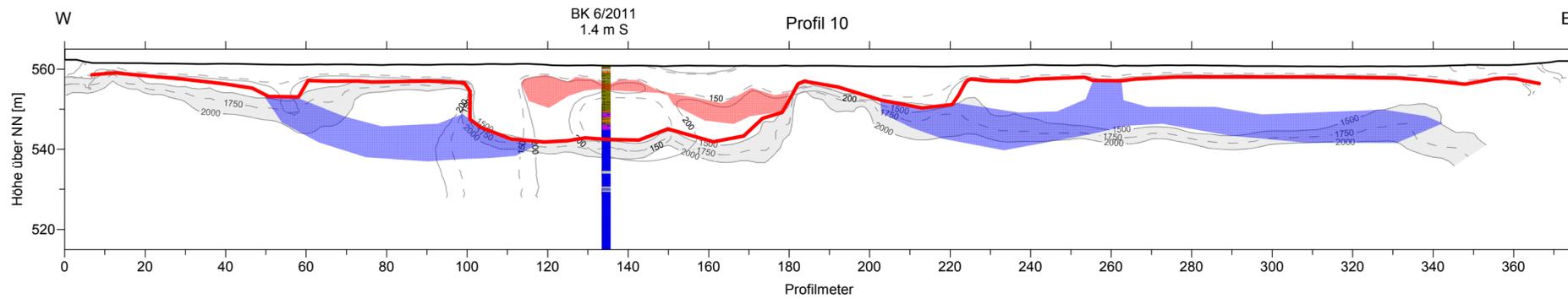
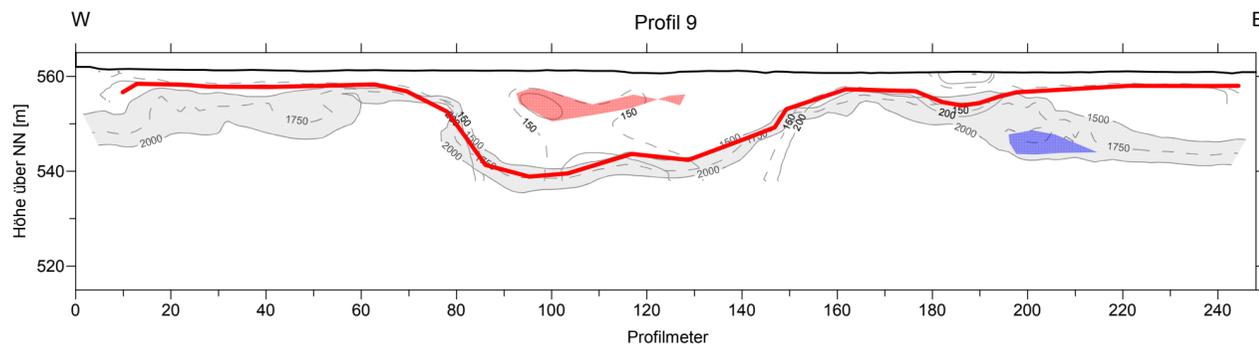
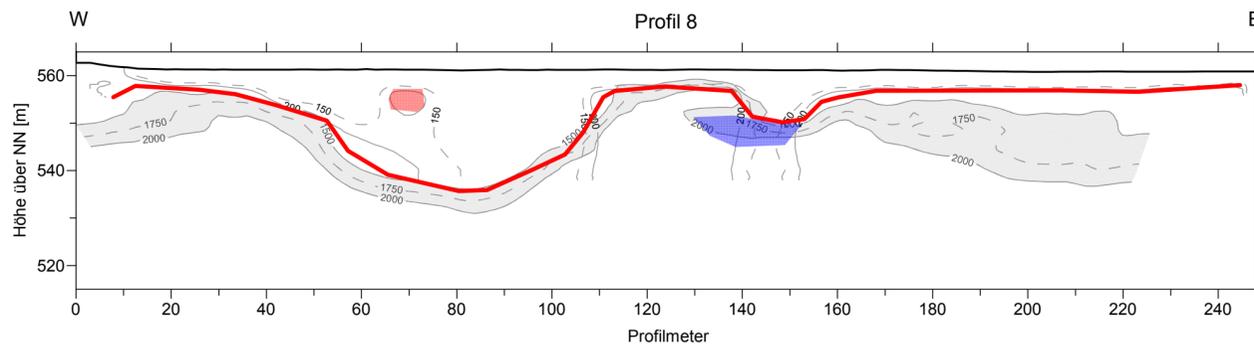
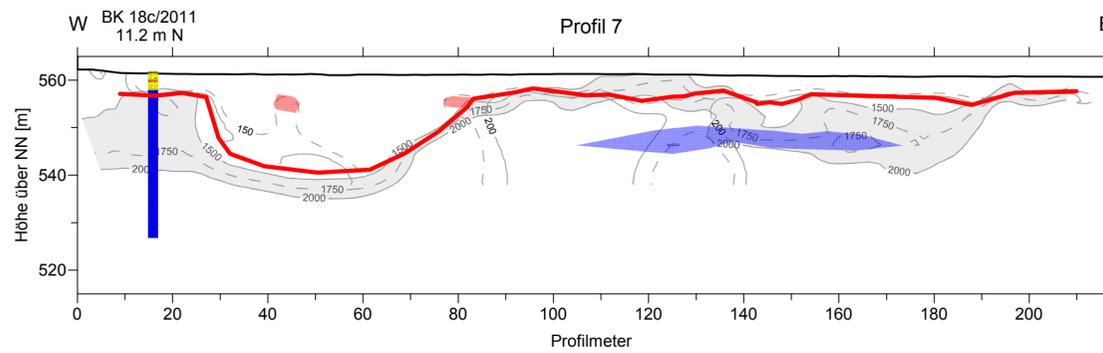
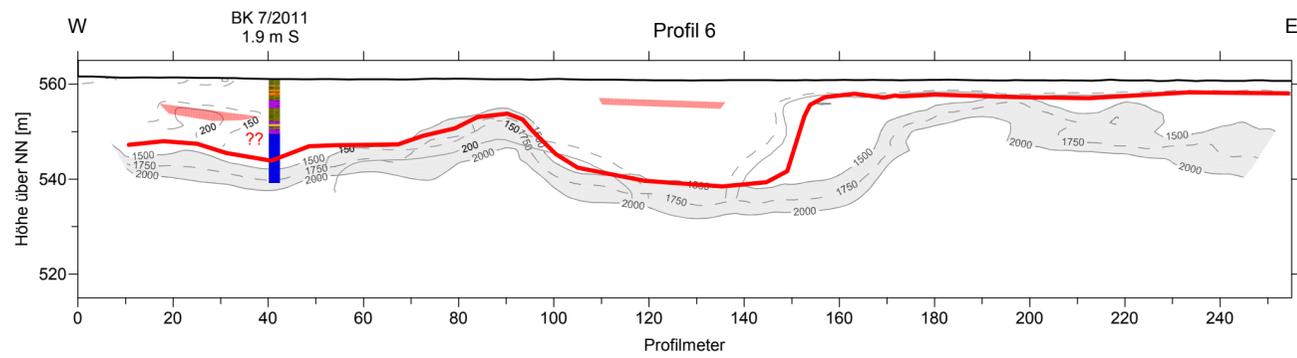
BK 14c/2011 1.0 m N Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

 Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt

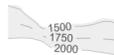
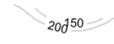
 Kalkstein erbohrt



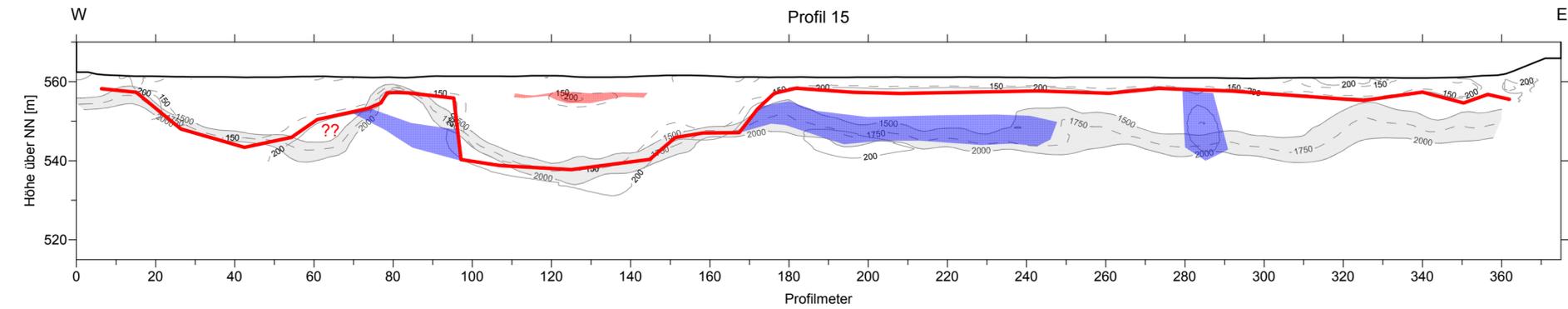
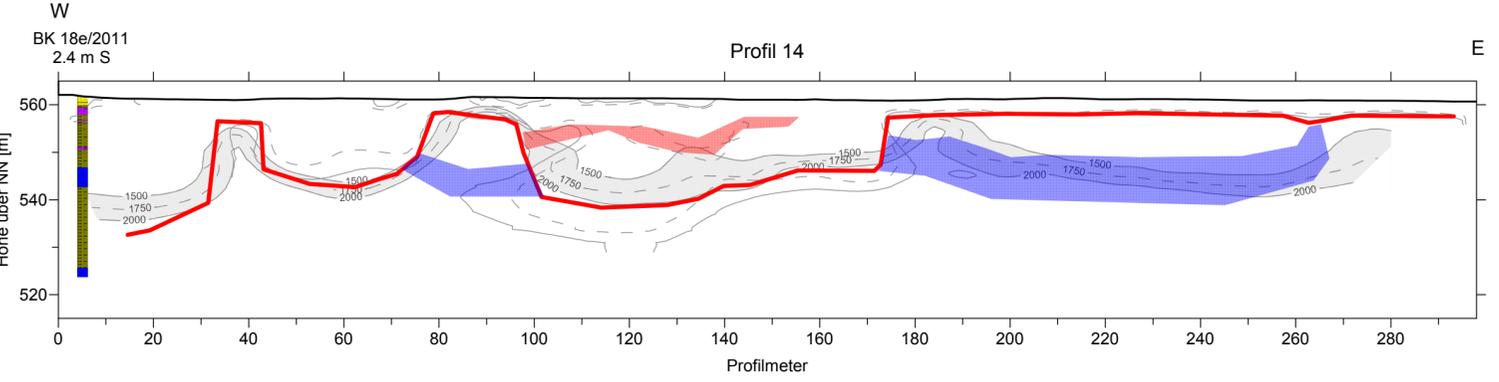
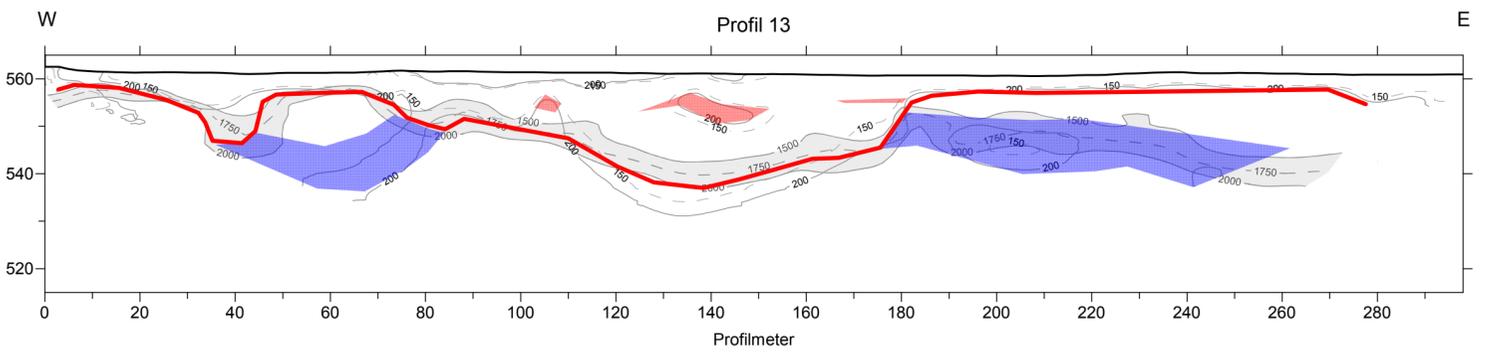
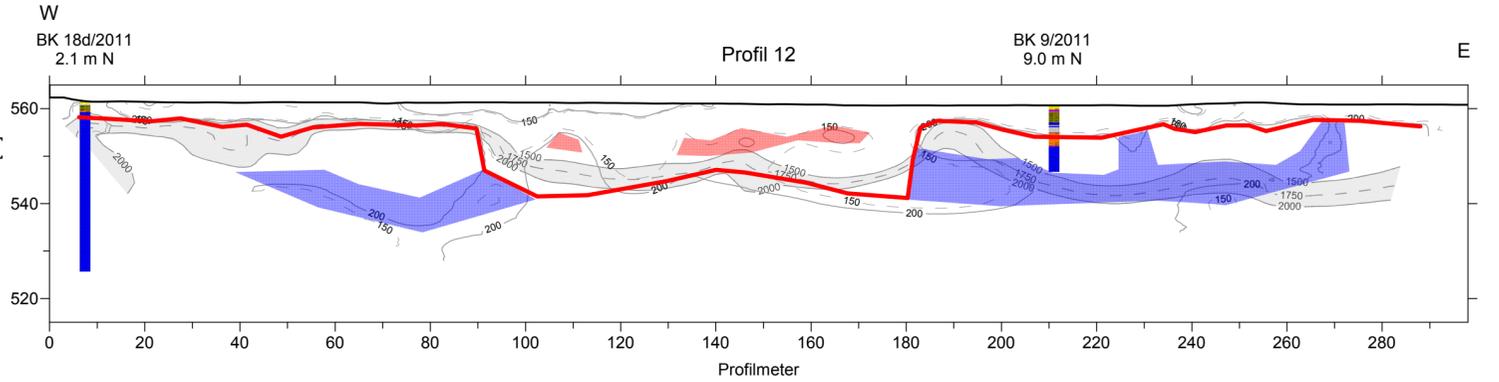
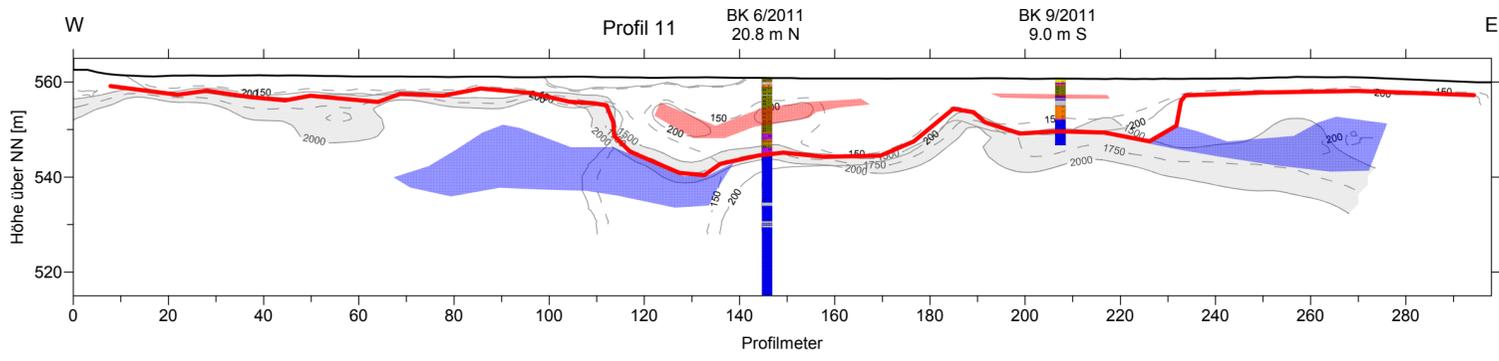
 <b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33		
Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 4.1



**Legende**

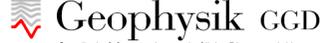
-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
-  Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
-  Isochomen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
- BK 7/2011**  
1.9 m S  
 Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
-  Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
-  Kalkstein erbohrt

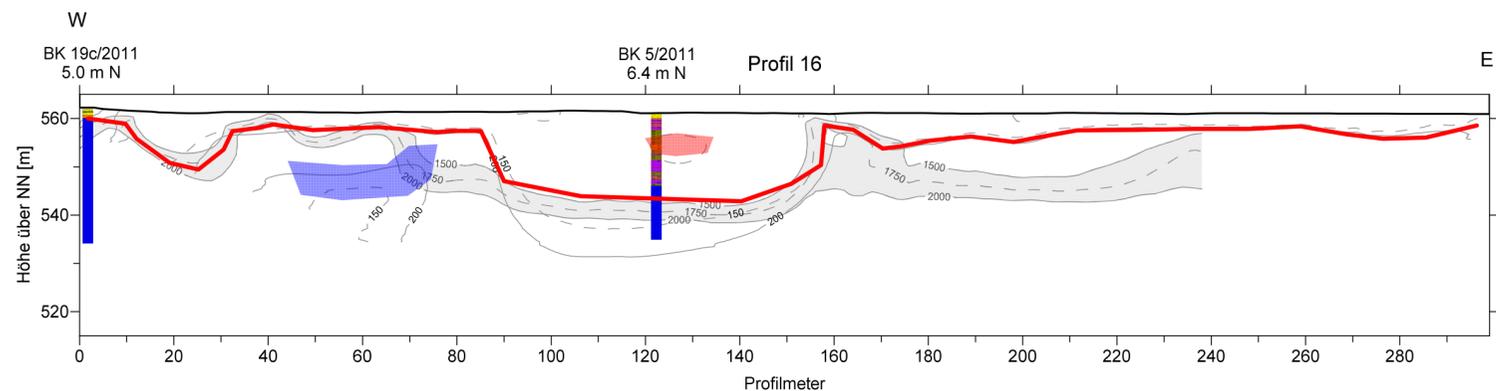
 Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m. b. H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierkartierung		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile 6 bis 10		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 30.08.2011	<b>Anlage:</b> 4.2



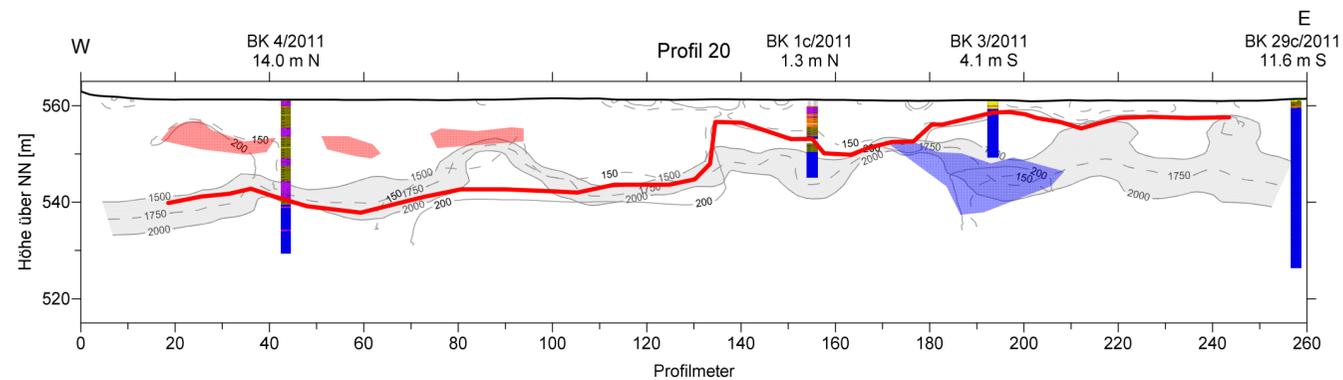
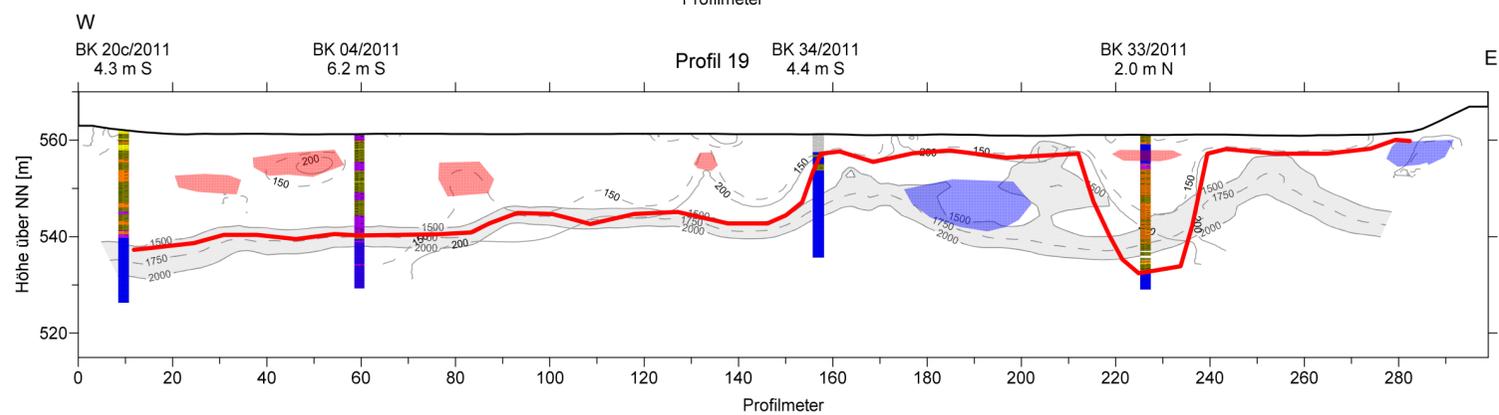
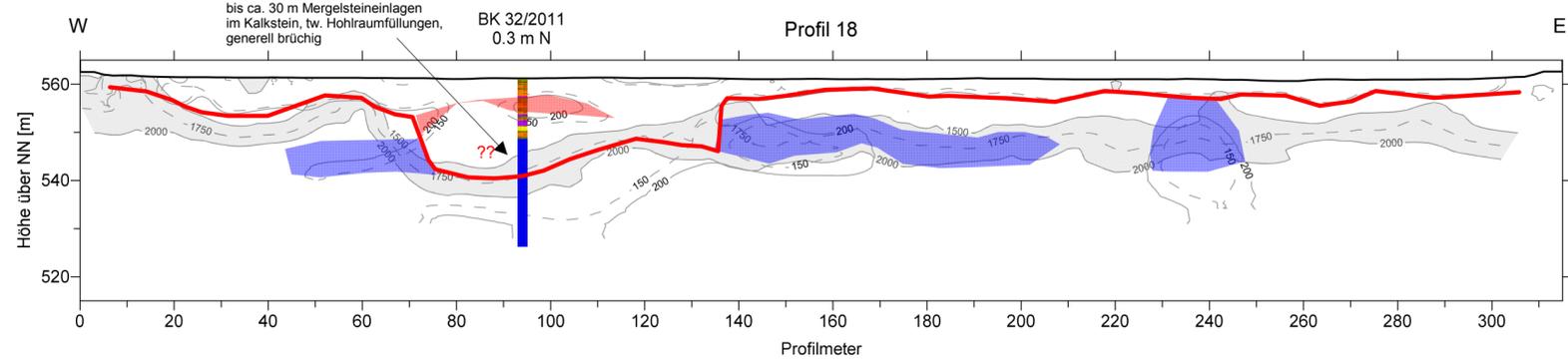
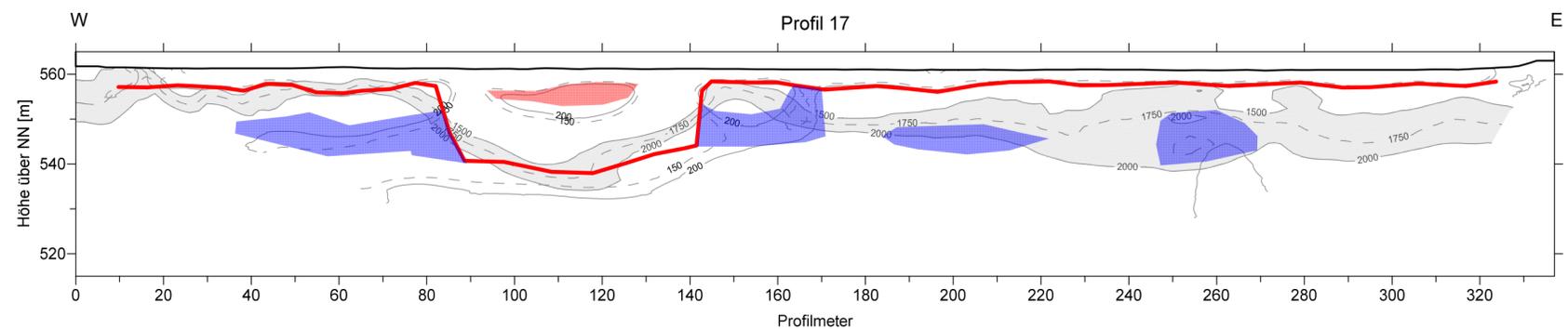
**Legende**

-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
-  Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
-  Isohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
- BK 6/2011 20.8 m N** Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
-  Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
-  Kalkstein erbohrt

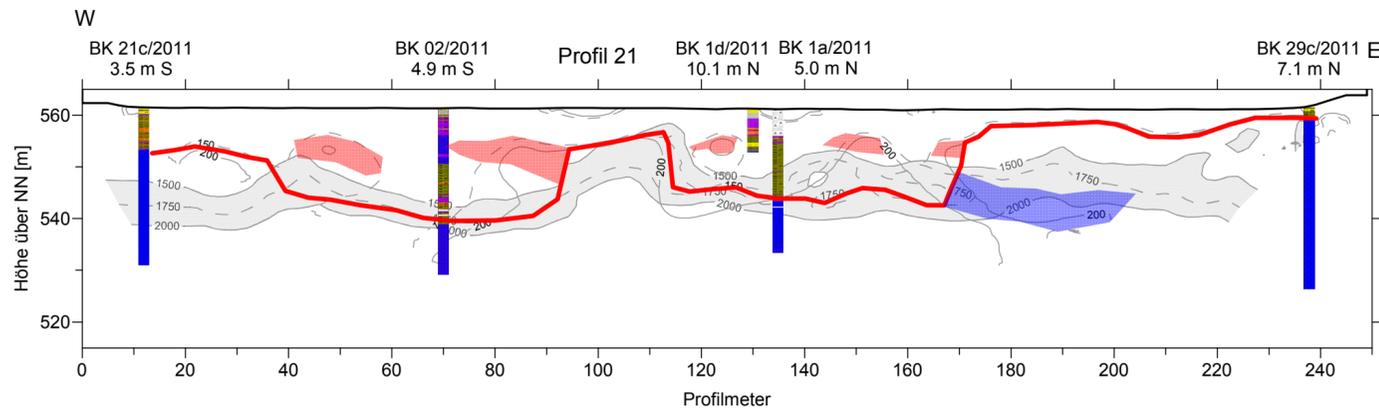
 <p><b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</p>		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile 11 bis 15		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef. Schw.</b>	<b>Datum:</b> 01.09.2011	<b>Anlage:</b> 4.3



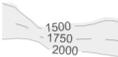
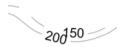
- Legende**
- Felslinie aus Komplexinterpretation
  - Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
  - Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
  - 1500  
1750  
2000 Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
  - 200/150 Isohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
  - BK 5/2011  
6.4 m N Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
  - Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
  - Kalkstein erbohrt

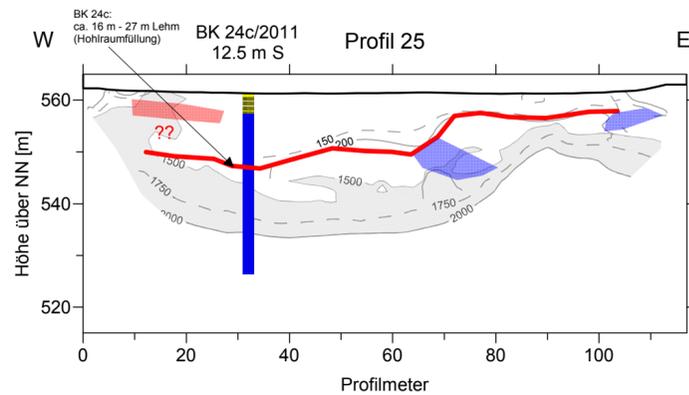
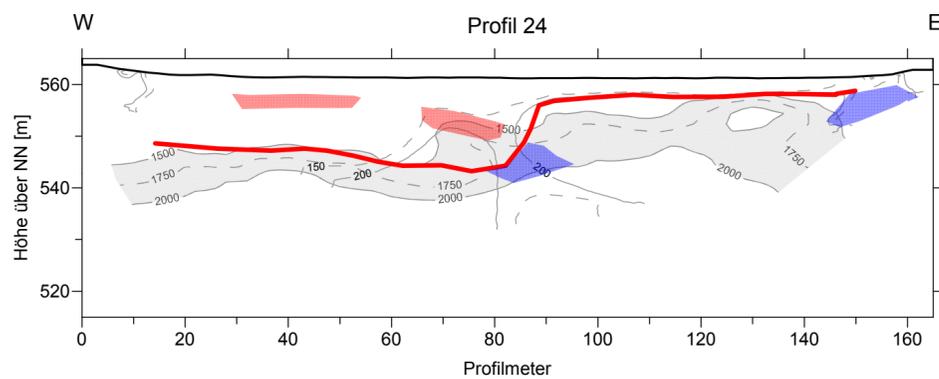
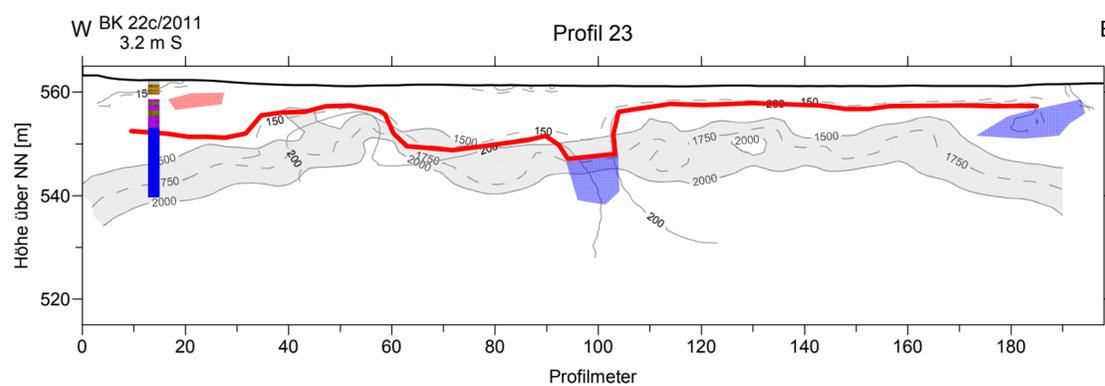
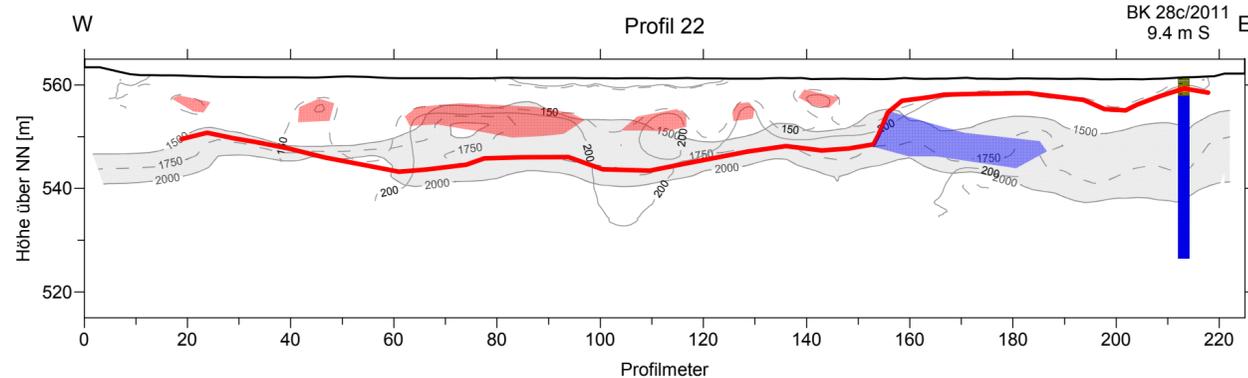


<b>Geophysik ccd</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktometrie und geoelektrische Sondierkartierung		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe	
<b>Titel:</b> Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile 16 bis 20		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 01.09.2011	<b>Anlage:</b> 4.4

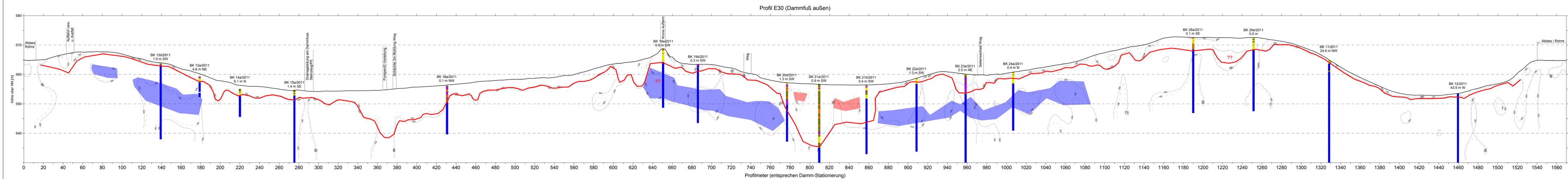
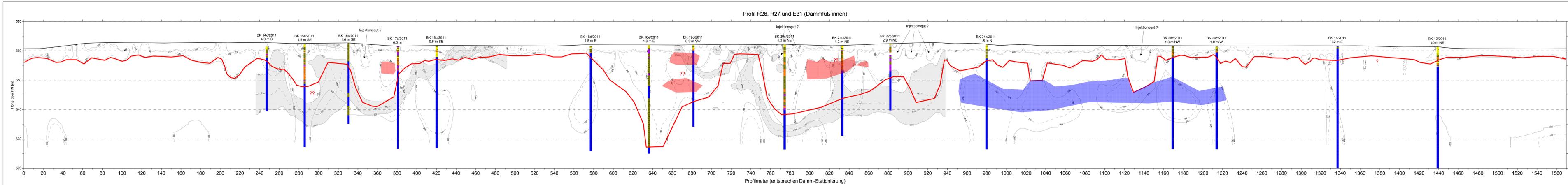


### Legende

-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
-  Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
-  Isohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
- BK 21c/2011 3.5 m S Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
-  Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
-  Kalkstein erbohrt



 <b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung		
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel: Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile 21 bis 25		Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011	Anlage: 4.5



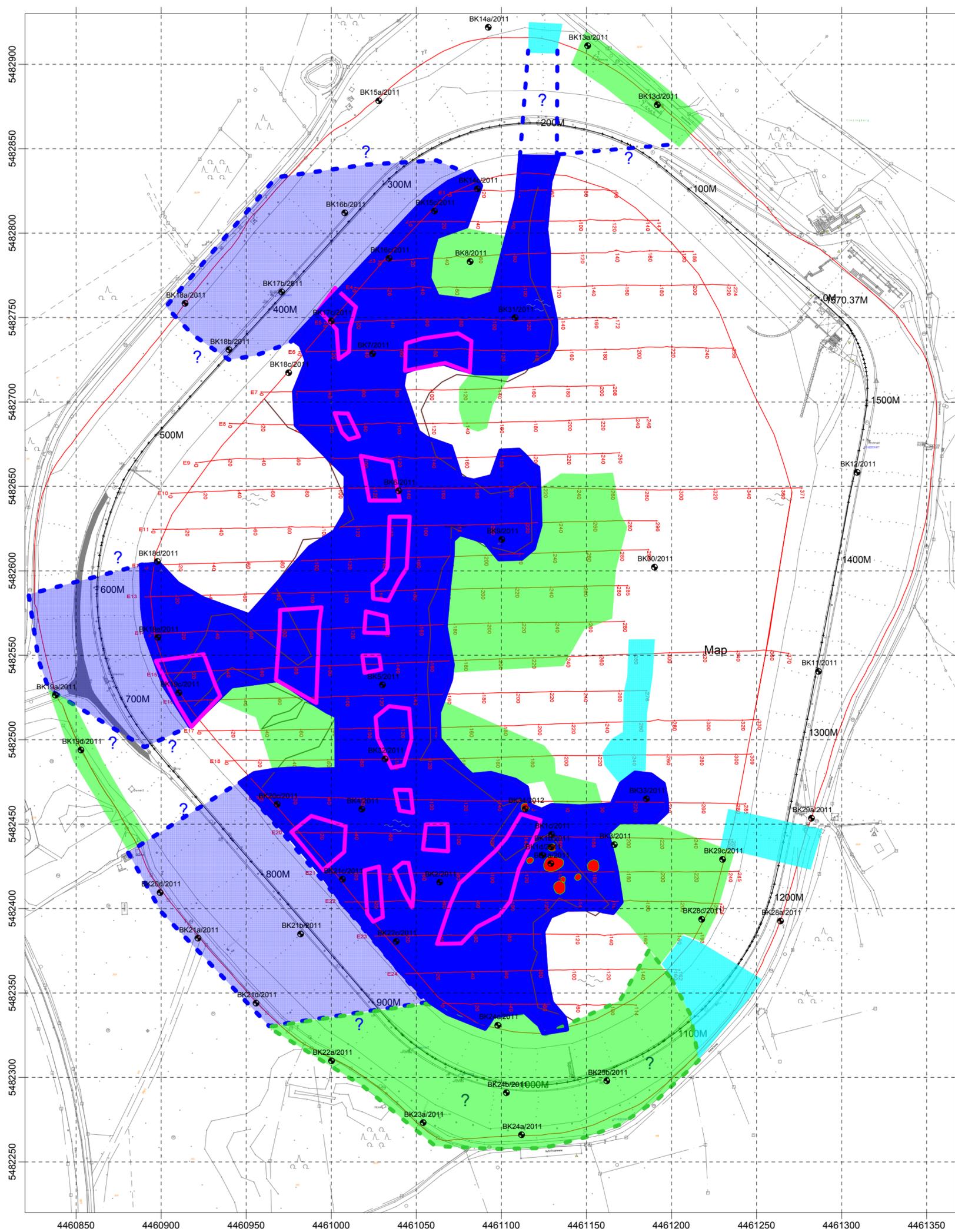
#### Legende

- Felslinie aus Komplexinterpretation
- Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
- Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
- Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
- Isohomen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
- BK 14c/2011 Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
- Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
- Kalkstein erbohrt

Die Profilmeter entsprechen einer abschnittsweisen senkrechten Projektion der Dammstationierung auf die geophysikalischen Profile am Dammfuß innen und außen.

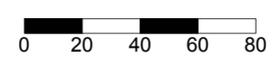
**Geophysik ccd**  
Gesellschaft für geophysikalische Dienste m.B.H.

Objekt: PSW Happing, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionsseismik und geoelektrische Sondierungsleistung	Bearbeiter: Dipl.-Geophysik J. Schmeier
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luftpolstraße 27 34104 Landstut	Maßstab: n 1 : 1000 n 1 : 1 : 300
Titel: Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile R26, R27 und E31 (Dammfuß innen) sowie E30 (Dammfuß außen)	Datum: 02.09.2011 ANSP: 4,5

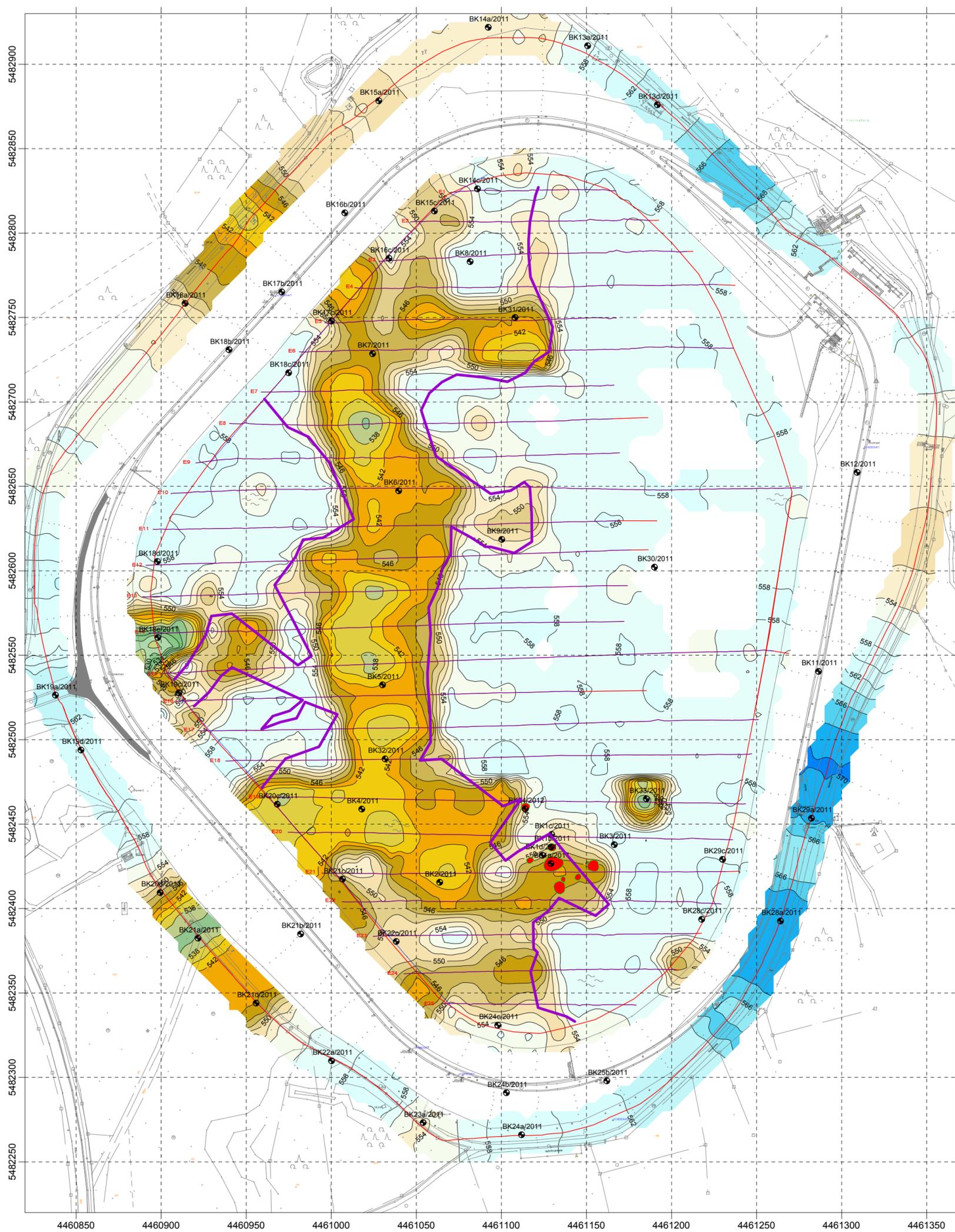


**Legende**

-  Störzone nach Komplexinterpretation
-  Interpolierte Störzone, Verlauf unsicher (keine Messdaten unter Dammkörper)
-  Hinweise auf Lockermaterial bzw. Verwitterung unterhalb der Felslinie
-  Verdacht auf entfestigte Bereiche außerhalb der vermuteten Störzone
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinkörper (Blöcke, Schollen) innerhalb der Störzone
-  Bohrung mit Name
-  Umriss der Störzone nach Altunterlagen
-  Erdfälle 2011



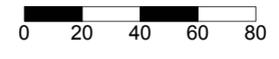
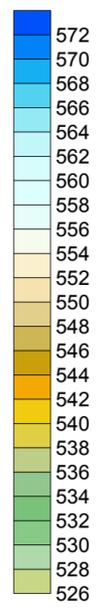
 <b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33	
Objekt:	PSW Happurg Geophysikalische Erkundung Geoelektrik & Refraktionsseismik
Auftraggeber:	Eon Wasserkraft
Bearbeiter:	Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Faktenkarte nach Komplexinterpretation
Maßstab:	1 : 2000
angef.: Schw.	Datum: 01.09.2011
Anlage:	5



**Legende**

- geophysikalisches Messprofil  
(rot - Geoelektrik, blau - Refraktionsseismik,  
im Becken überwiegend lagegleich)
- BK 7/2011  
Bohrung mit Name
- Umriss der Störzonen nach Altunterlagen
- Erdfälle 2011
- 500M  
Dammstationierung

Höhe der interpretierten  
Felsoberfläche  
in m NN



<p><b>Geophysik GGD</b> Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</p>	
<b>Objekt:</b> PSW Happurg Geophysikalische Erkundung Geoelektrik & Refraktionsseismik	
<b>Auftraggeber:</b> Eon Wasserkraft	<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Karte der Felsoberfläche nach Komplexinterpretation	
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 09.09.2011
<b>Anlage:</b> 6	
<b>Maßstab:</b> 1 : 2000	

**Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken  
Untergrundsanie rung im Bereich der Störzone**

**Baugrund- und Sanierungsgutachten**

**Anlage 9**

**Ergebnisse der Baugrunderkundung 2011  
Geophysikalische Untersuchungen**

**Anlage 9.2**

Ergebnisbericht Pumpspeicherwerk Happurg, Sanierung Oberbecken ·  
Geophysikalische Erkundung, Nachtrag 2. Erkundungsphase ·  
Geoelektrik, Gravimetrie,  
aufgestellt am 22.12.2011 durch die Gesellschaft für  
Geowissenschaftliche Dienste mbH · GGD, Leipzig

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 Bohrerergebnisse 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
<b>Summe Phase 2</b>		<b>5392</b>	

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.

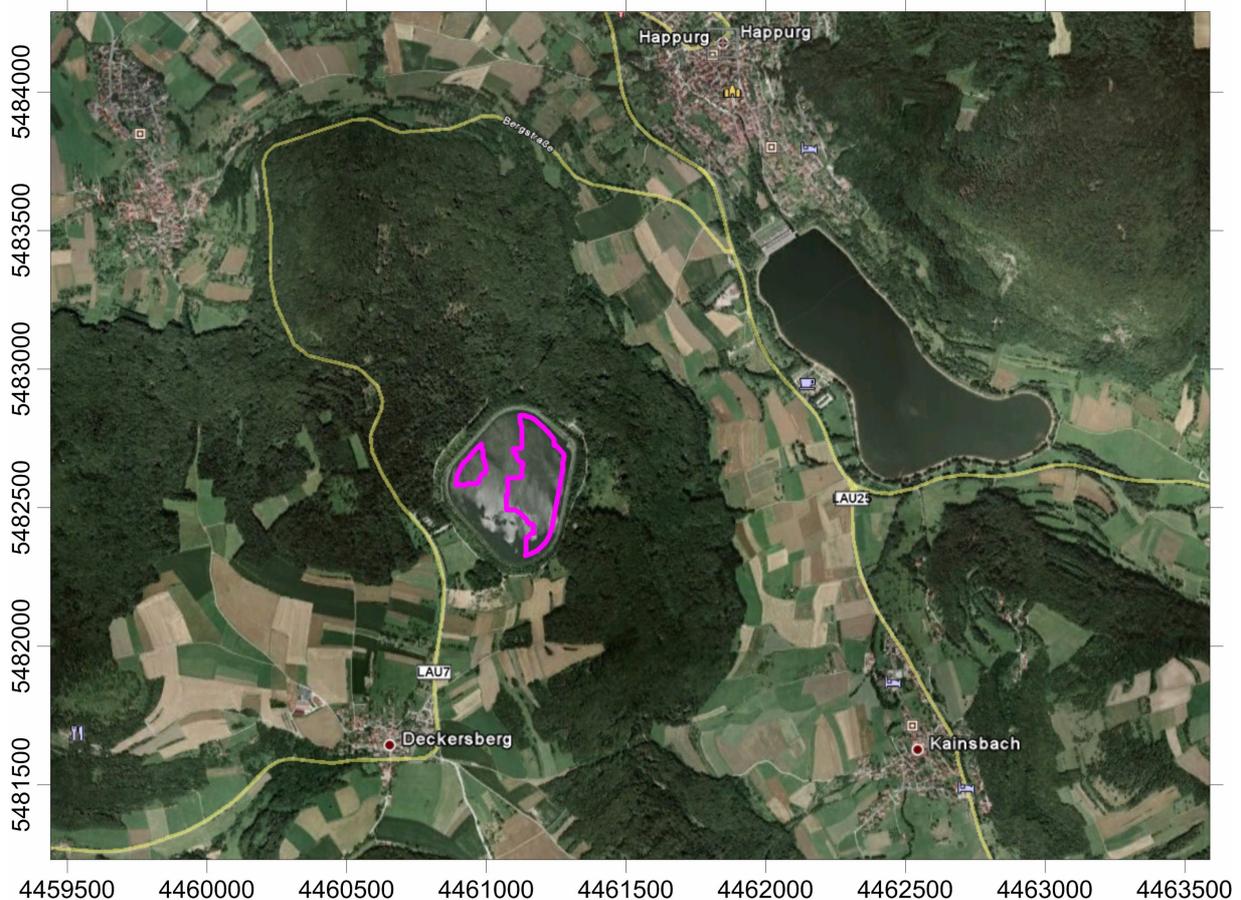


Abb. 1: Lage der gravimetrischen Untersuchungsgebiete (Quelle: Google Earth)

Das geophysikalische Messverfahren der Gravimetrie dient der Erfassung der Störung  $\Delta g$  (Delta-g) der global wirkenden Schwerebeschleunigung.  $\Delta g$  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  $\mu\text{Gal}$  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.

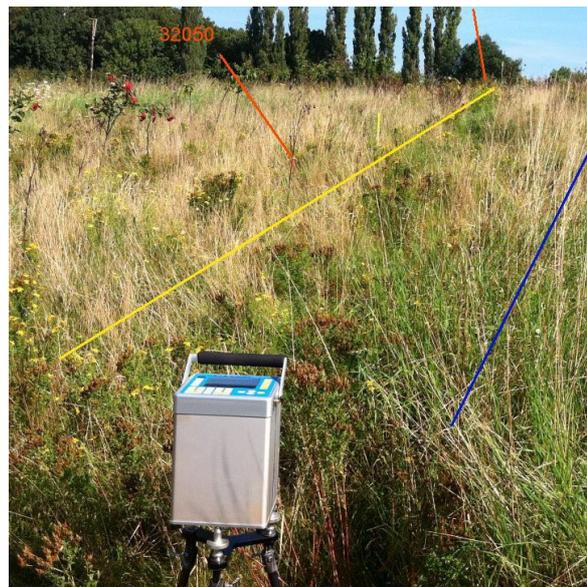


Abb. 2: Quarzfedergravimeter SCINTREX CG-5

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  $\Delta g$  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  $2.5 \text{ g/cm}^3$  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.

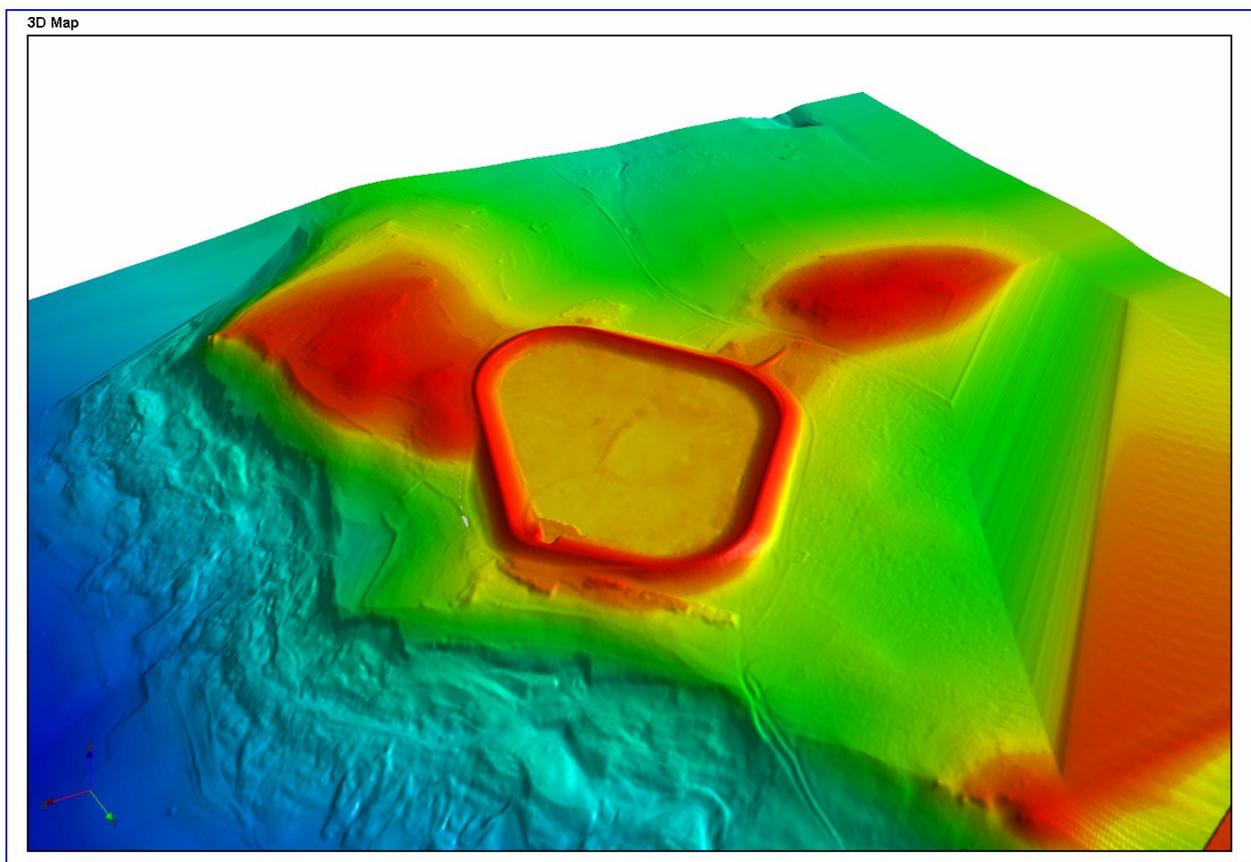


Abb. 4: Kombiniertes Höhenmodell für die Geländekorrektur (perspektivische Ansicht)

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 Geländekorrekur 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.

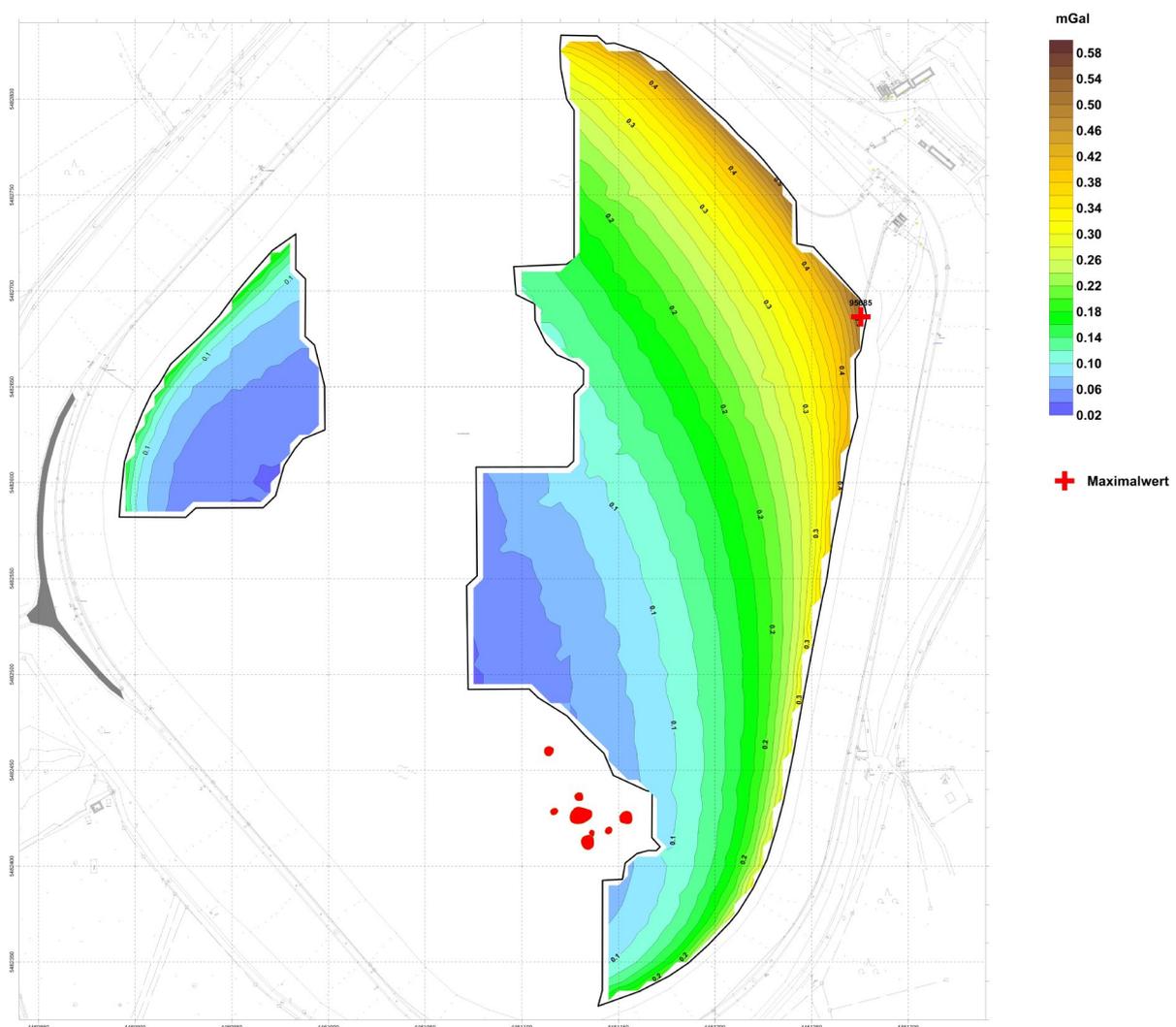


Abb. 5: Korrekturbeträge der Geländekorrekur

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  $\pm 0.005$  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]	$\pm 0.007$	$\pm 0.005$

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 Tieflagen 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 Felsline 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.

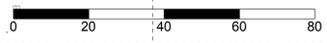
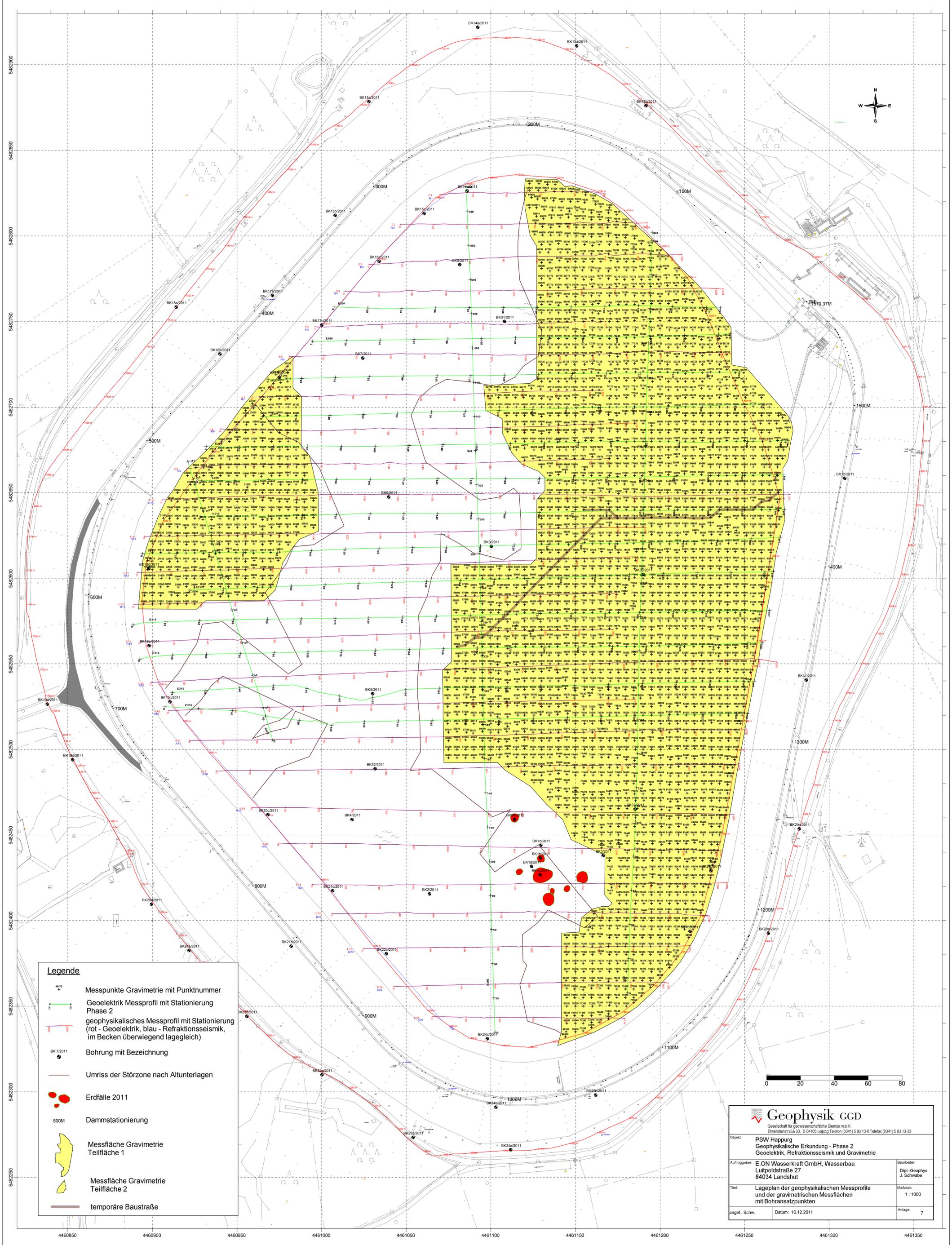
Die gravimetrischen Ergebnisse (Schwerekarten) zeigen eine auffällige Korrelation mit der vermuteten Verteilung der Lockermaterialien nach der Geoelektrik. Insbesondere jene Stellen, an denen niedrige Widerstände im Niveau der Felsoberfläche auftreten, bilden sich im Schwerefeld als lokale Minima ab. 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

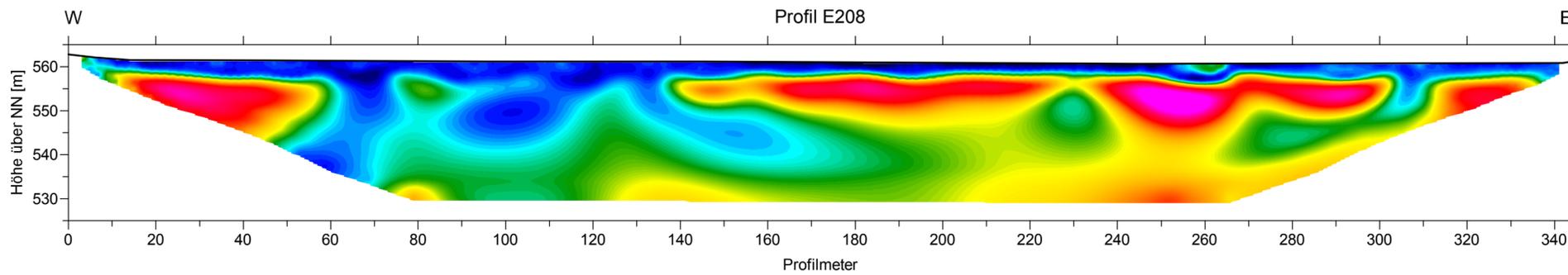
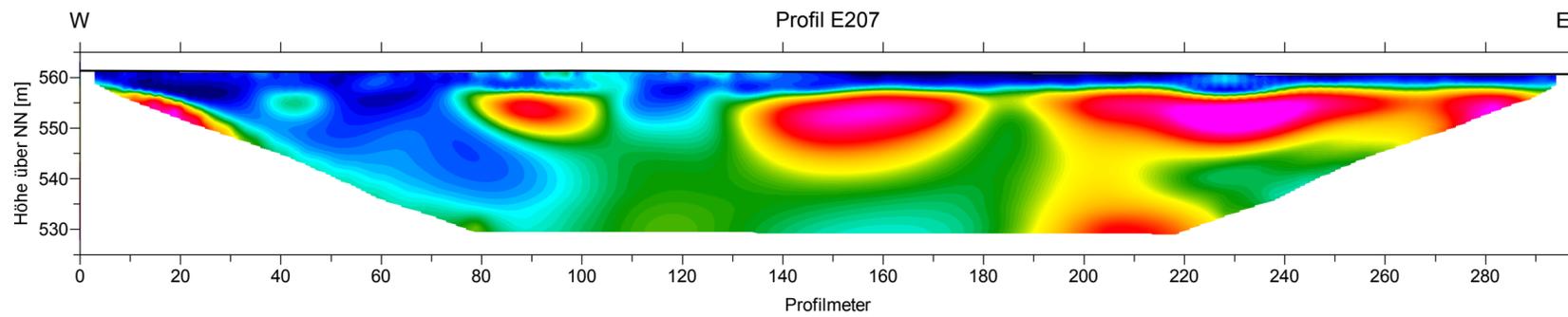
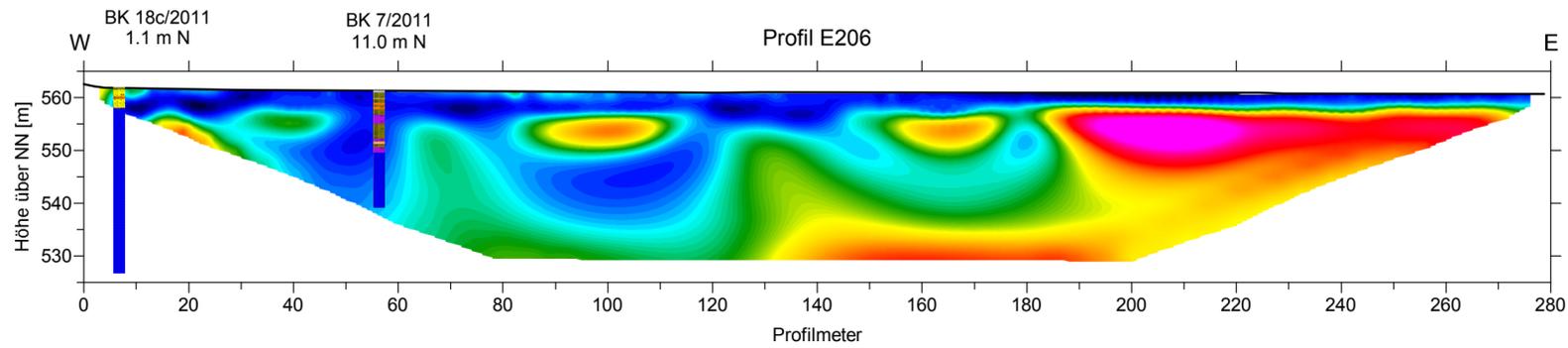
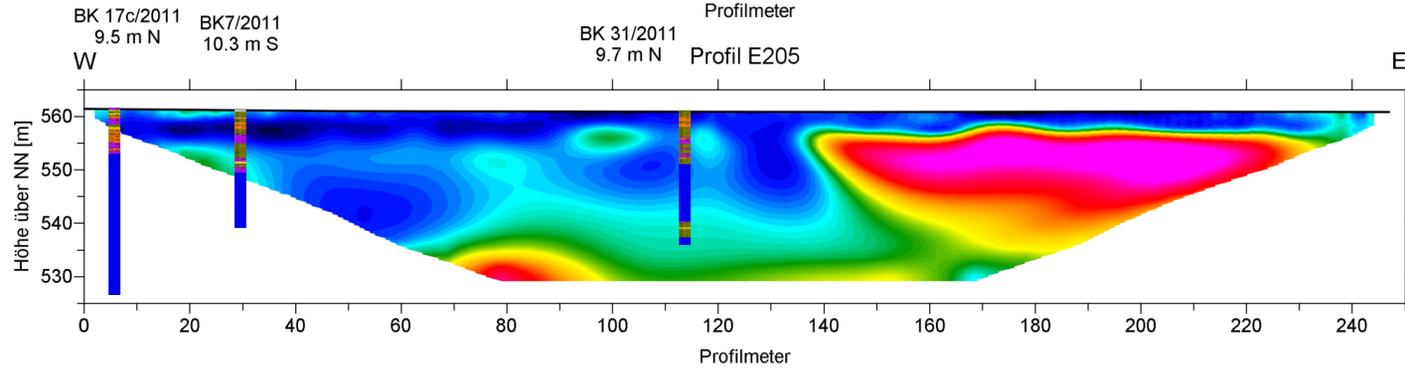
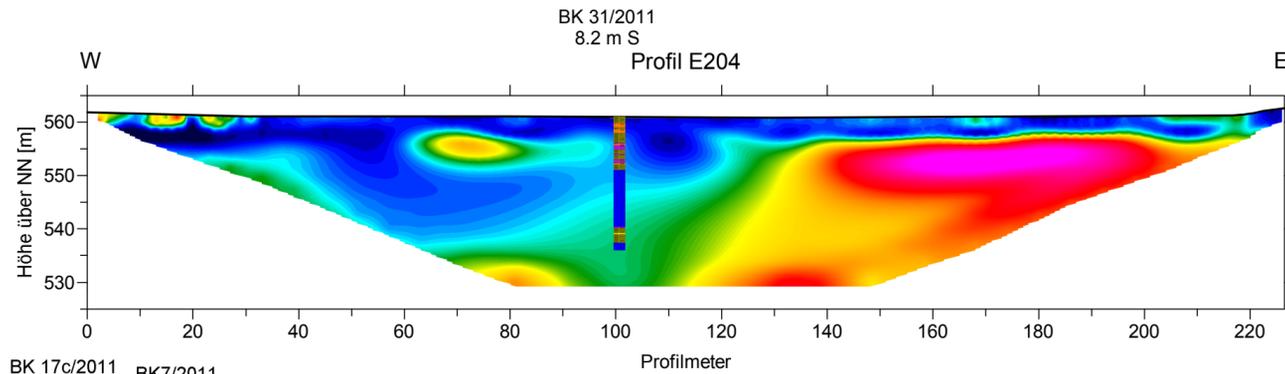


- Legende**
- Messpunkte Gravimetrie mit Punktnummer
  - Geoelektrik Messprofil mit Stationierung Phase 2
  - geophysikalisches Messprofil mit Stationierung (rot - Geoelektrik, blau - Refraktionsseismik, im Becken überwiegend lagegleich)
  - Bohrung mit Bezeichnung
  - Umriss der Störzone nach Altunterlagen
  - Erdfälle 2011
  - Dammsstationierung
  - Messfläche Gravimetrie Teilfläche 1
  - Messfläche Gravimetrie Teilfläche 2
  - temporäre Baustraße

**Geophysik GGD**  
 Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste mbH  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-33

<b>Objekt:</b> PSW Happurg Geophysikalische Erkundung - Phase 2 Geoelektrik, Refraktionsseismik und Gravimetrie	<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>Titel:</b> Lageplan der geophysikalischen Messprofile und der gravimetrischen Messflächen mit Bohrsatzpunkten	<b>Anlage:</b> 7
<b>angef. Schw.</b>	<b>Datum:</b> 16.12.2011

4460850 4460900 4460950 4461000 4461050 4461100 4461150 4461200 4461250 4461300 4461350



**Legende**

BK 31/2011 Bohrung mit Name,  
8.2 m S Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

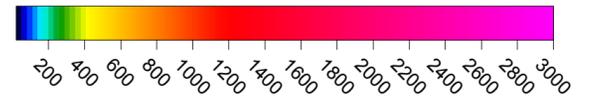


Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

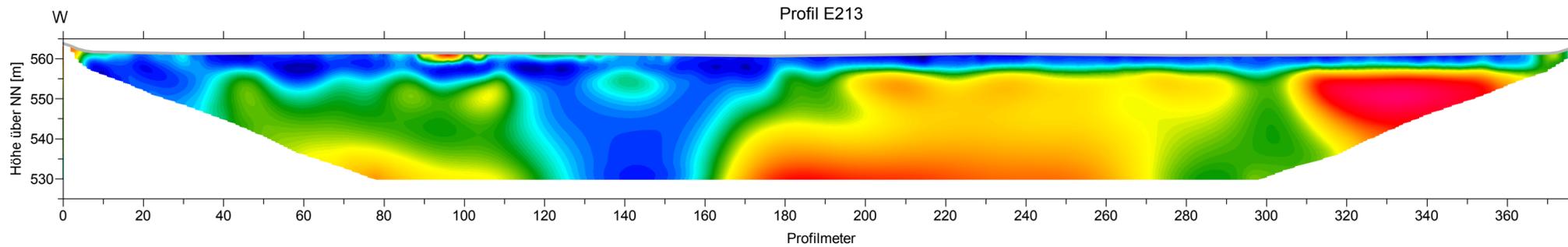
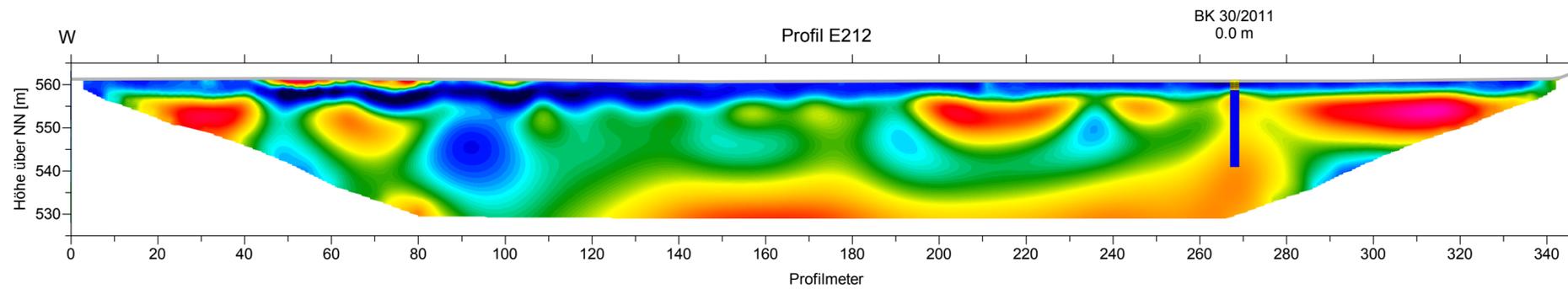
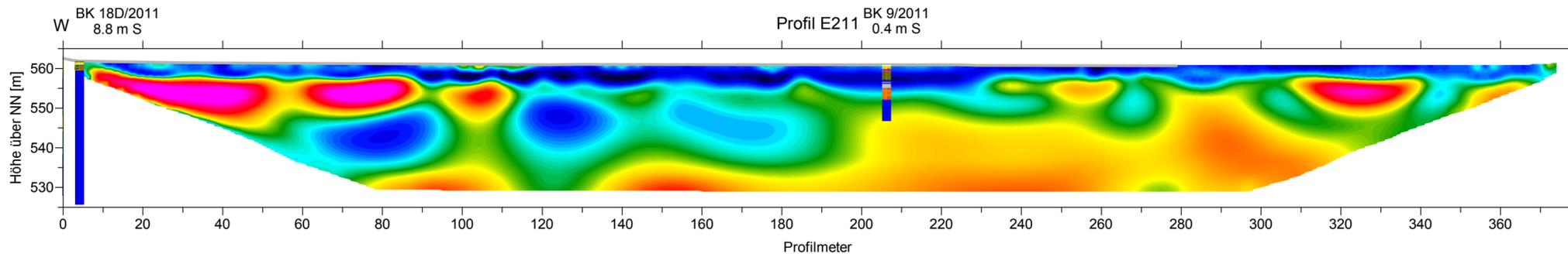
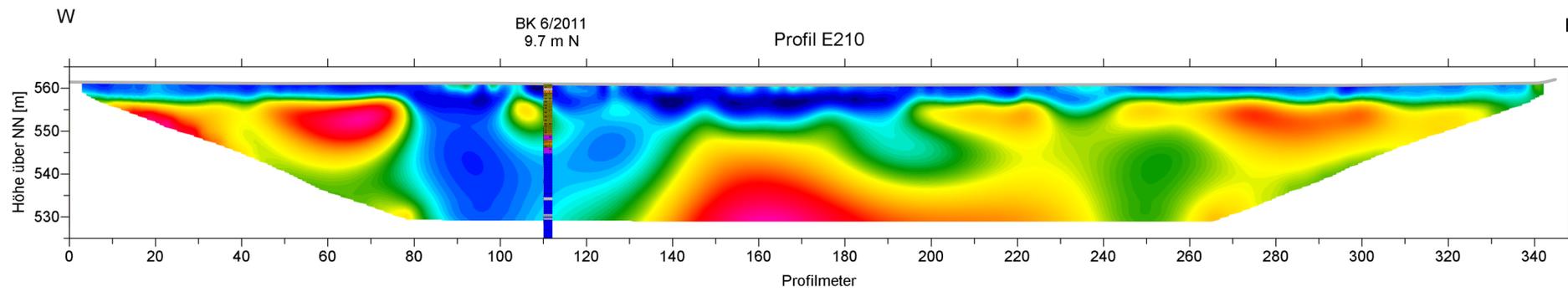
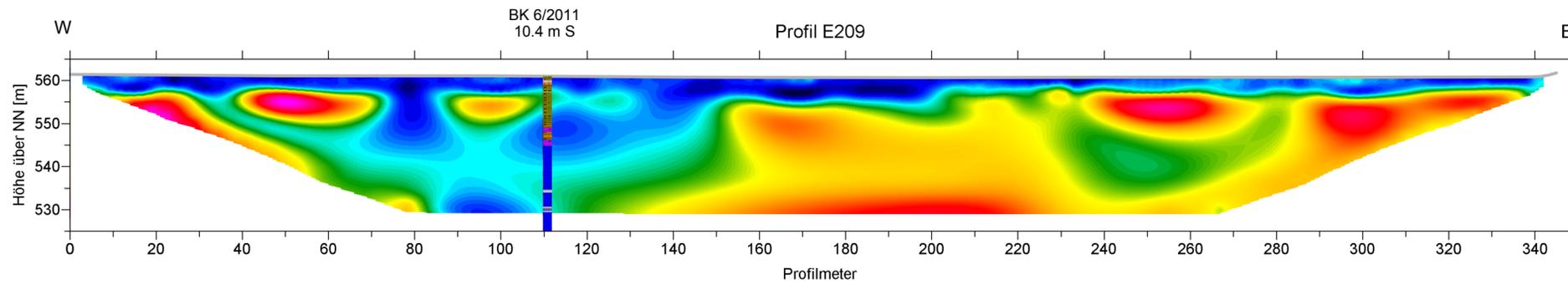


Kalkstein erbohrt

Spezifischer elektr. Widerstand  
 $\rho_s$  in [ $\Omega m$ ]



 <b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E204 bis E208	Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 28.11.2011	Anlage: 8.1.1



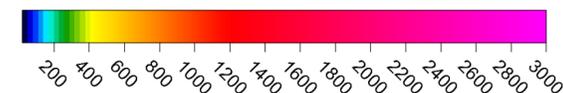
**Legende**

BK 6/2011 Bohrung mit Name,  
10.4 m S Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

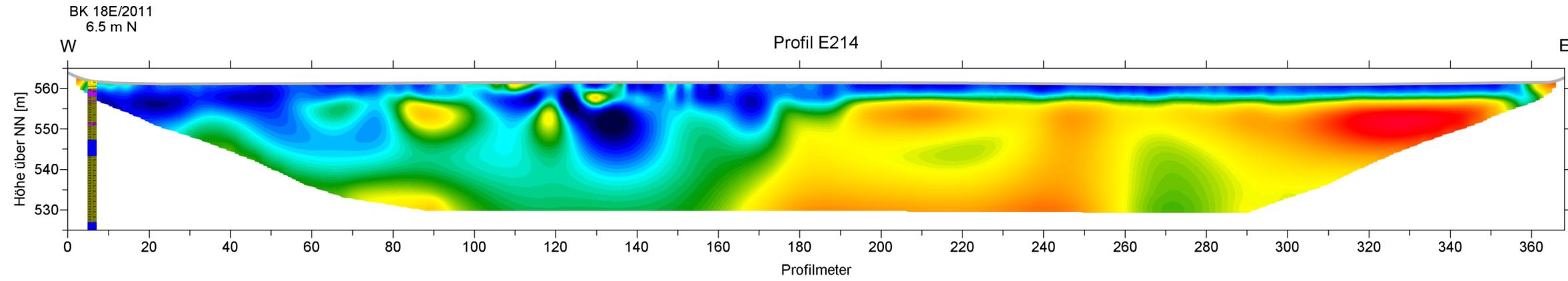
Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

Kalkstein erbohrt

Spezifischer elektr. Widerstand  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]



<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E09 bis E213		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 28.11.2011	<b>Anlage:</b> 8.1.2

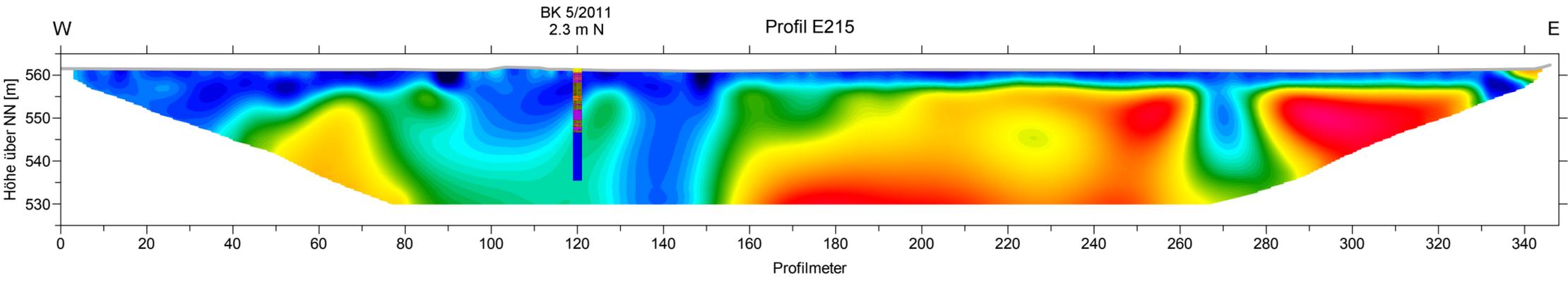


**Legende**

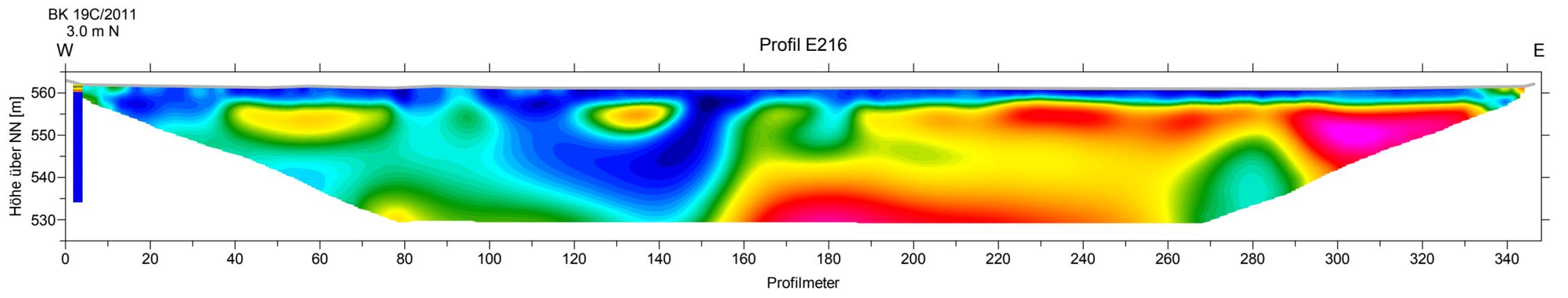
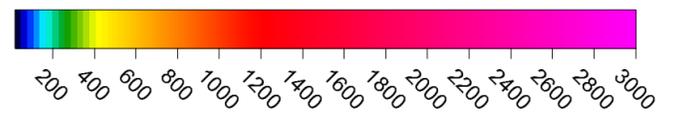
BK 18E/2011 Bohrung mit Name,  
6.5 m N Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil

Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt

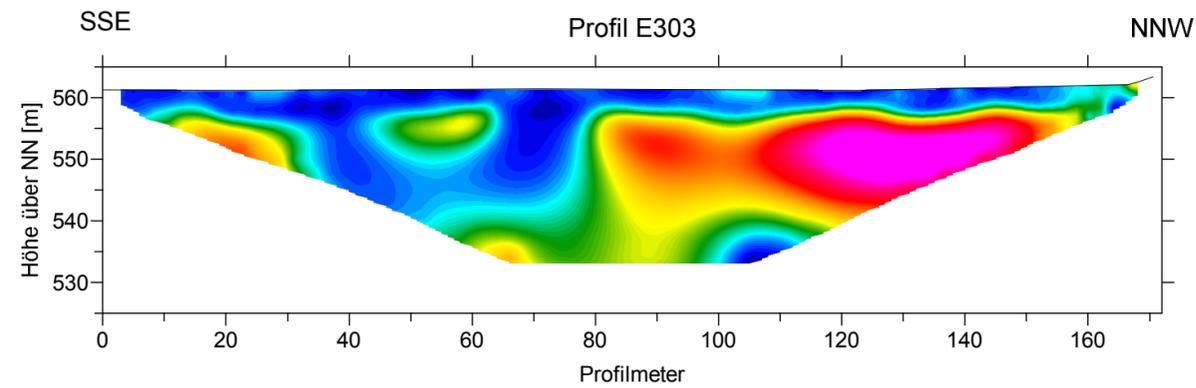
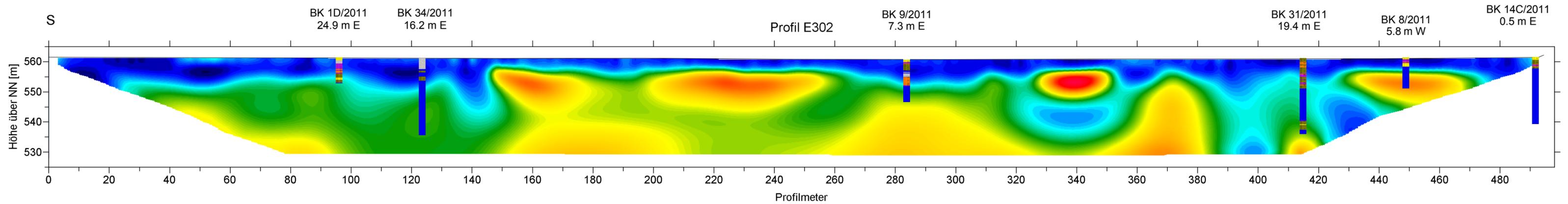
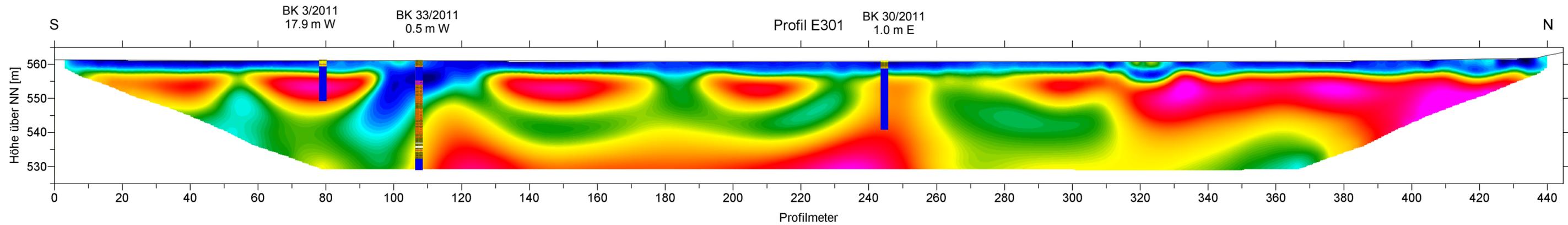
Kalkstein erbohrt



**Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in [ $\Omega m$ ]



<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe
<b>Titel:</b> Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E214 bis E216		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 28.11.2011	<b>Anlage:</b> 8.1.3



Legende

BK 18E/2011 Bohrung mit Name,  
6.5 m N Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil



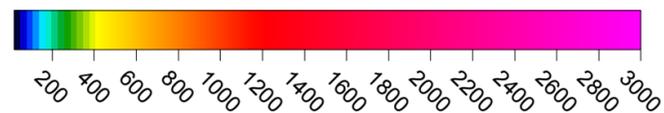
Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand,  
Kies und Steine erbohrt



Kalkstein erbohrt

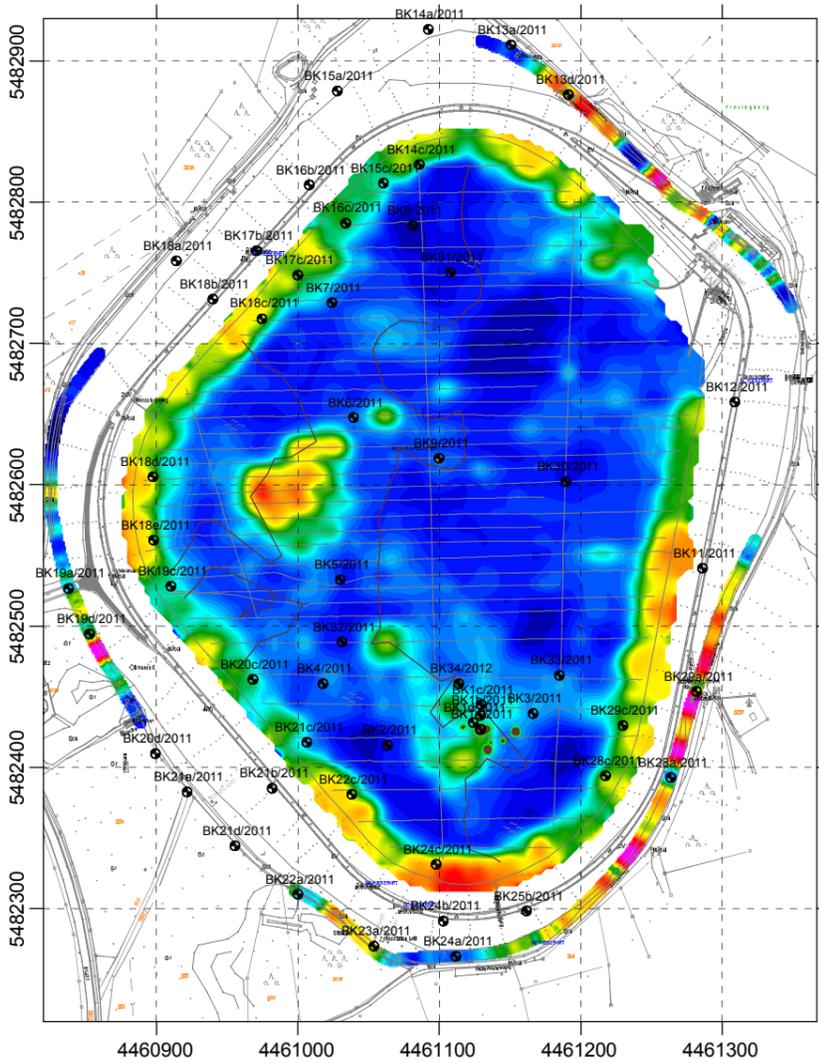
N

Spezifischer elektr. Widerstand  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]

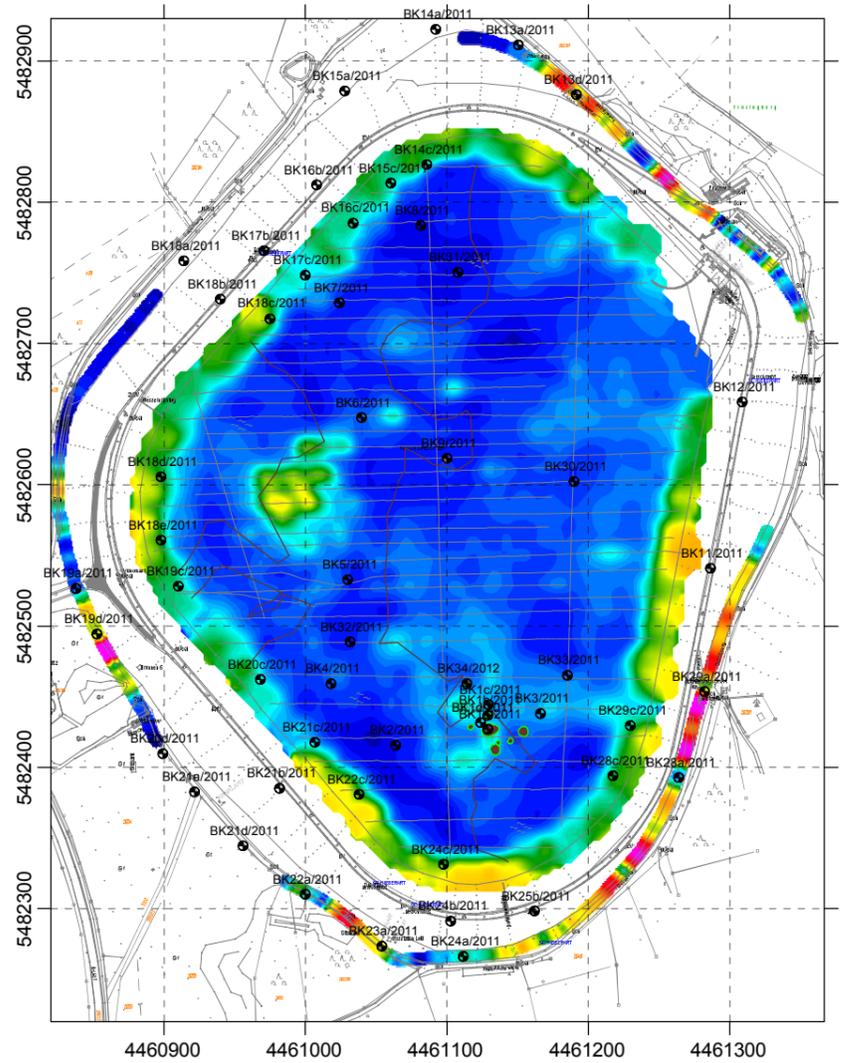


 <b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktions-tomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Darstellung des spezifischen elektrischen Widerstandes der Profile E301 bis E303	Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 28.11.2011	Anlage: 8.1.4

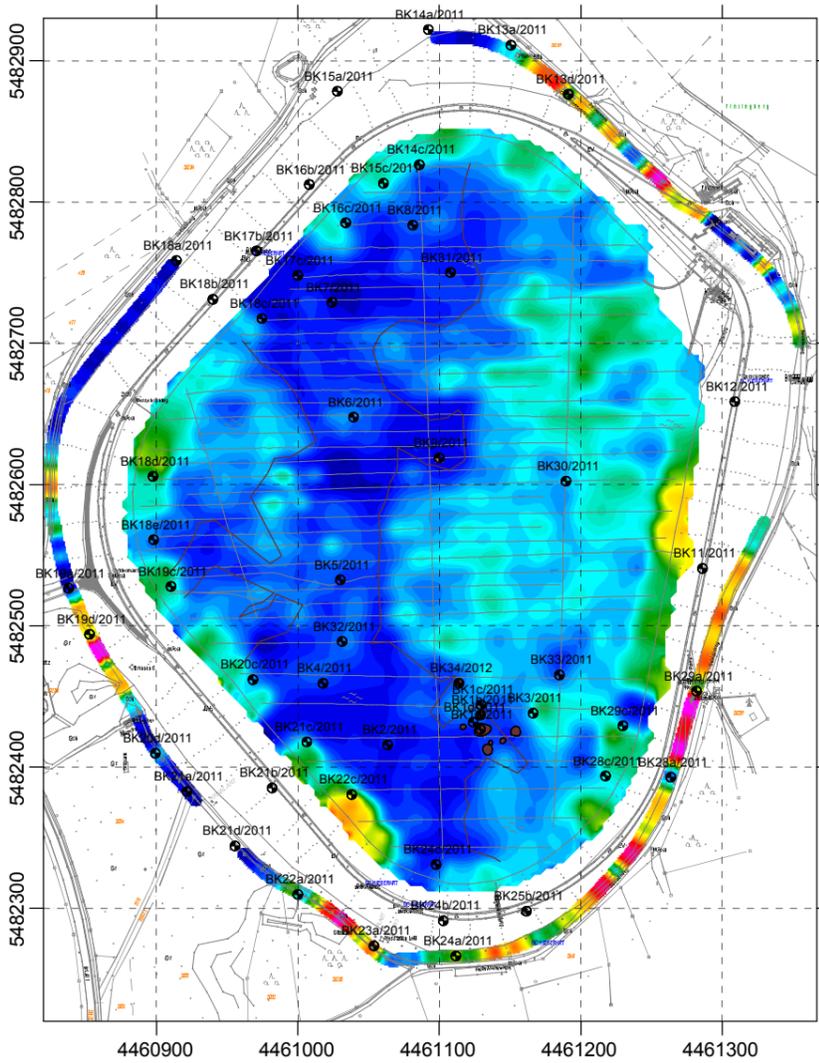
Horizontalschnitt bei ca. 560.5 m NN (Tiefe ca. 0.5 m u. Beckensohle)



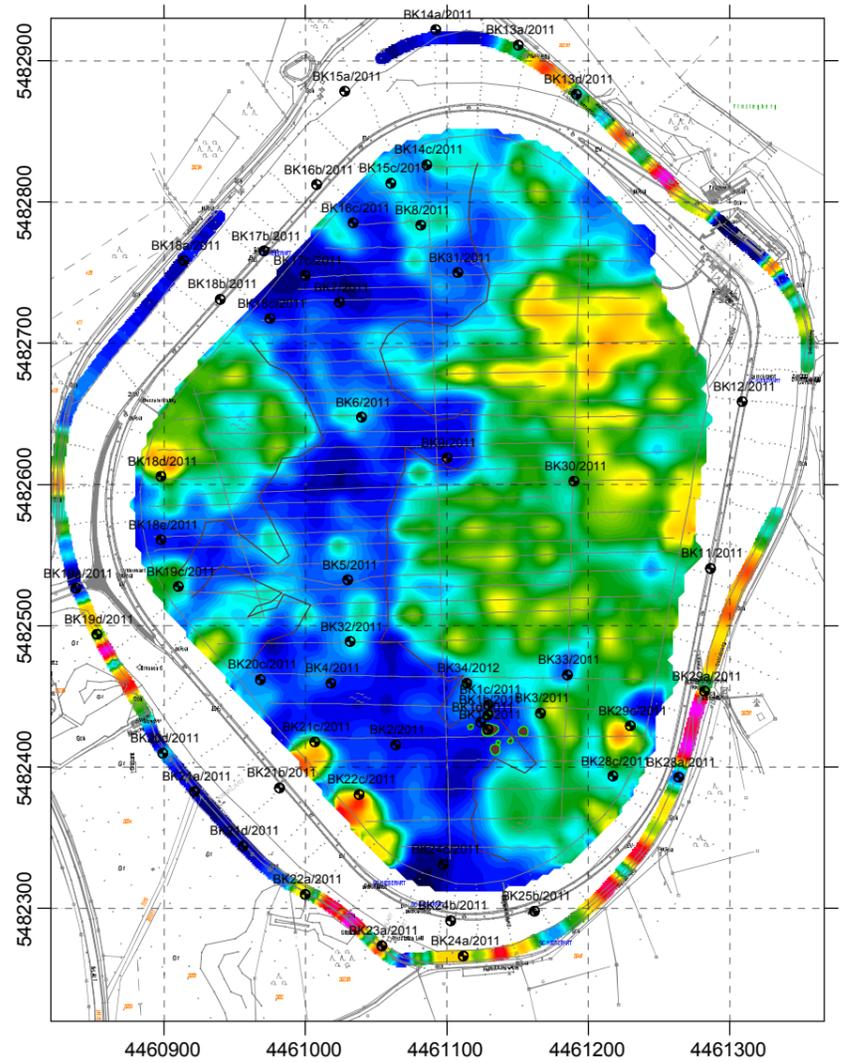
Horizontalschnitt bei ca. 559.5 m NN (Tiefe ca. 1.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 558.5 m NN (Tiefe ca. 2.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 557.3 m NN (Tiefe ca. 3.7 m u. Beckensohle)



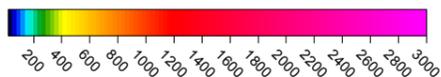
**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

Spezifischer elektr. Widerstand  $\rho_s$  in  $[\Omega m]$



Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN



**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken  
Seismische Refraktionstomographie und  
geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)

Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau  
Luitpoldstraße 27  
84034 Landshut

Bearbeiter:  
Dipl.-Geophys.  
J. Schwabe

Titel: Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen  
E1-E25, E204-E216, E301-E303, und Dammfüße,  
Tiefenniveaus 560.5 m - 557.3 m ü. NN

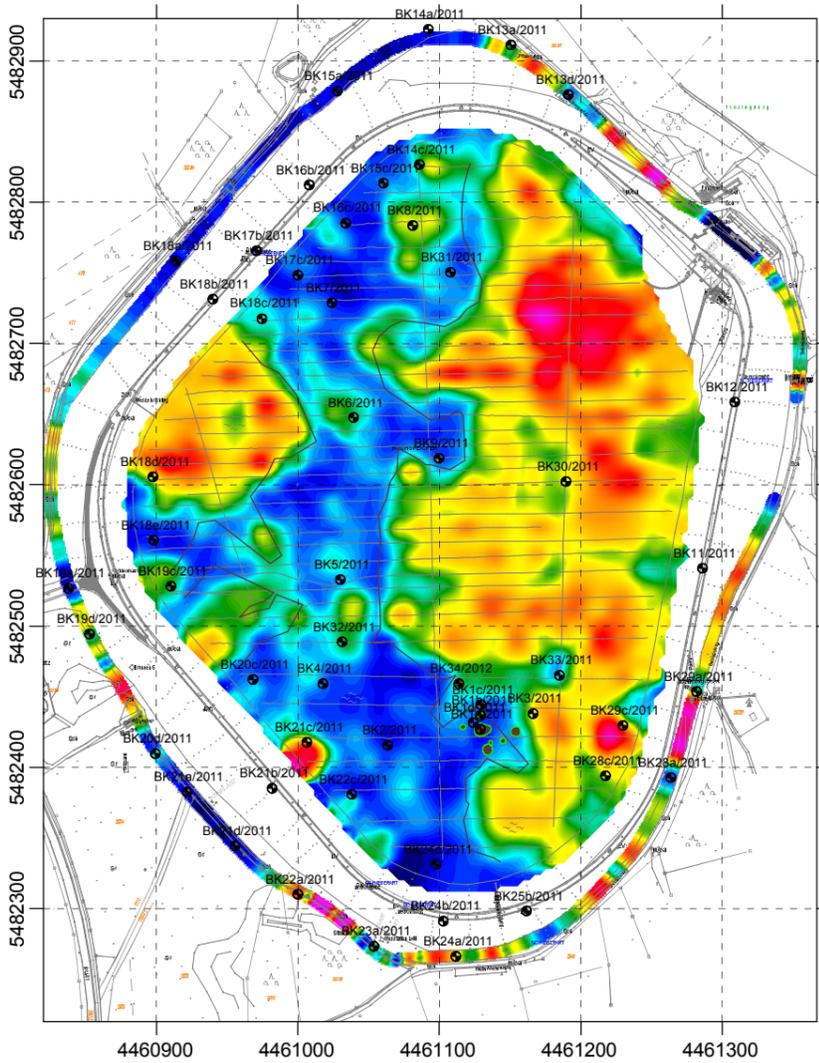
Maßstab:  
1 : 5000

angef.: Schw.

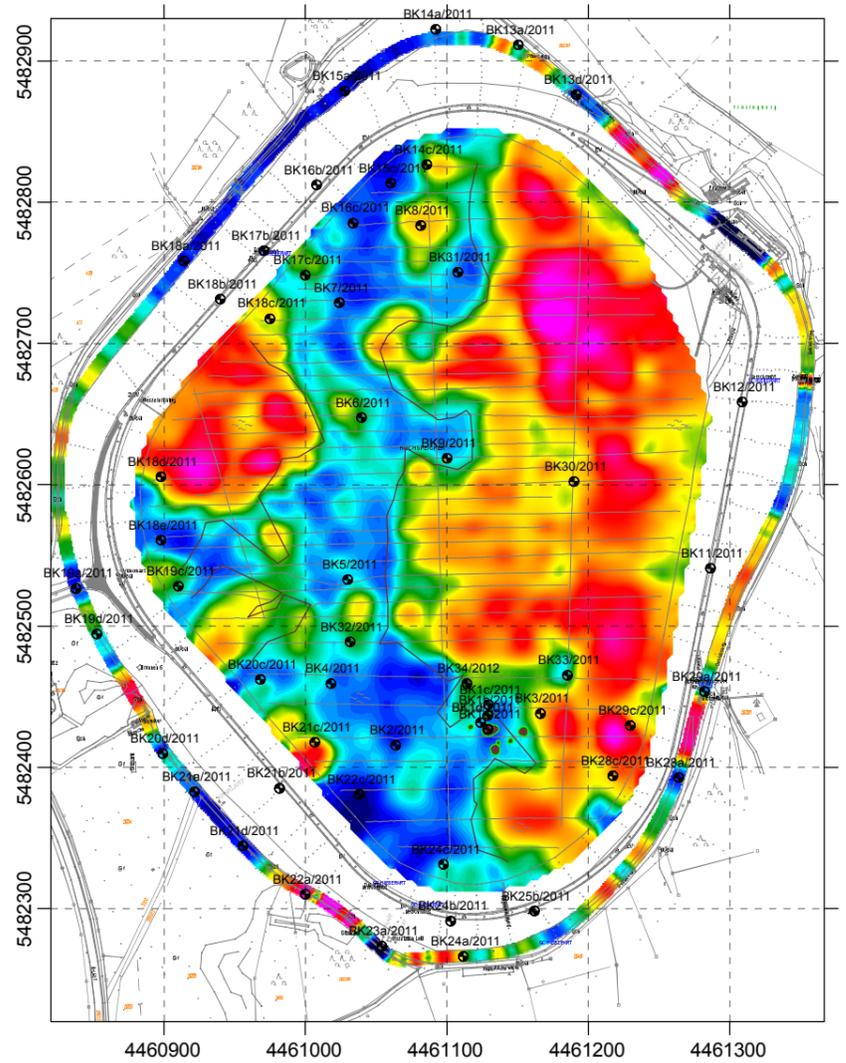
Datum: 29.11.2011

Anlage: 8.2.1

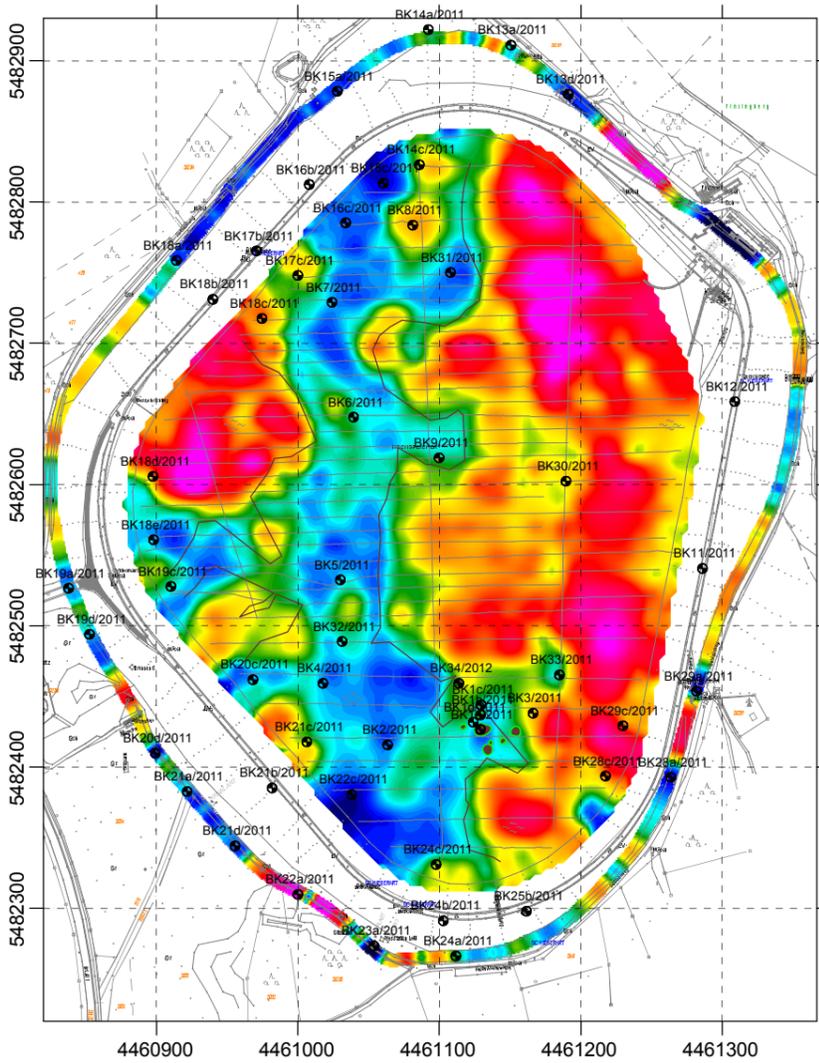
Horizontalschnitt bei ca. 556.0 m NN (Tiefe ca. 5.0 m u. Beckensohle)



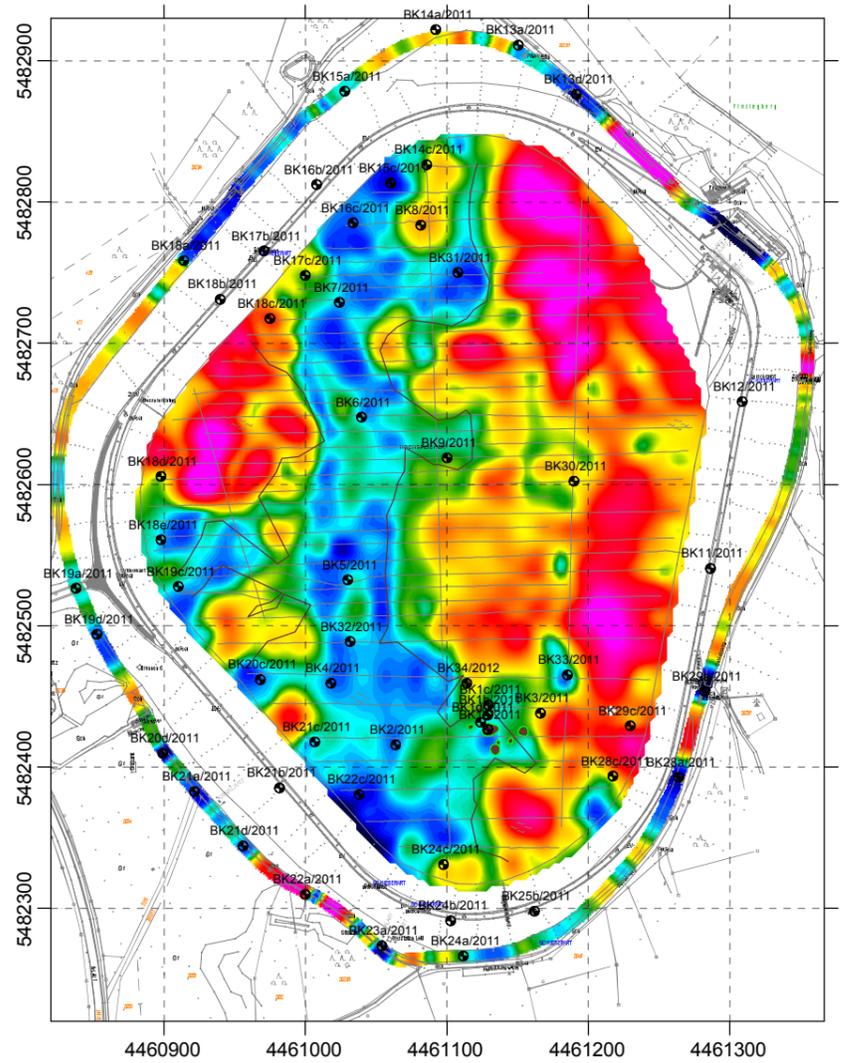
Horizontalschnitt bei ca. 554.6 m NN (Tiefe ca. 6.4 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 553.0 m NN (Tiefe ca. 8.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 551.5 m NN (Tiefe ca. 9.5 m u. Beckensohle)



**Legende**

- Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert
  - Kernbohrung mit Bezeichnung
  - Erdfall
- Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]
- 

Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN

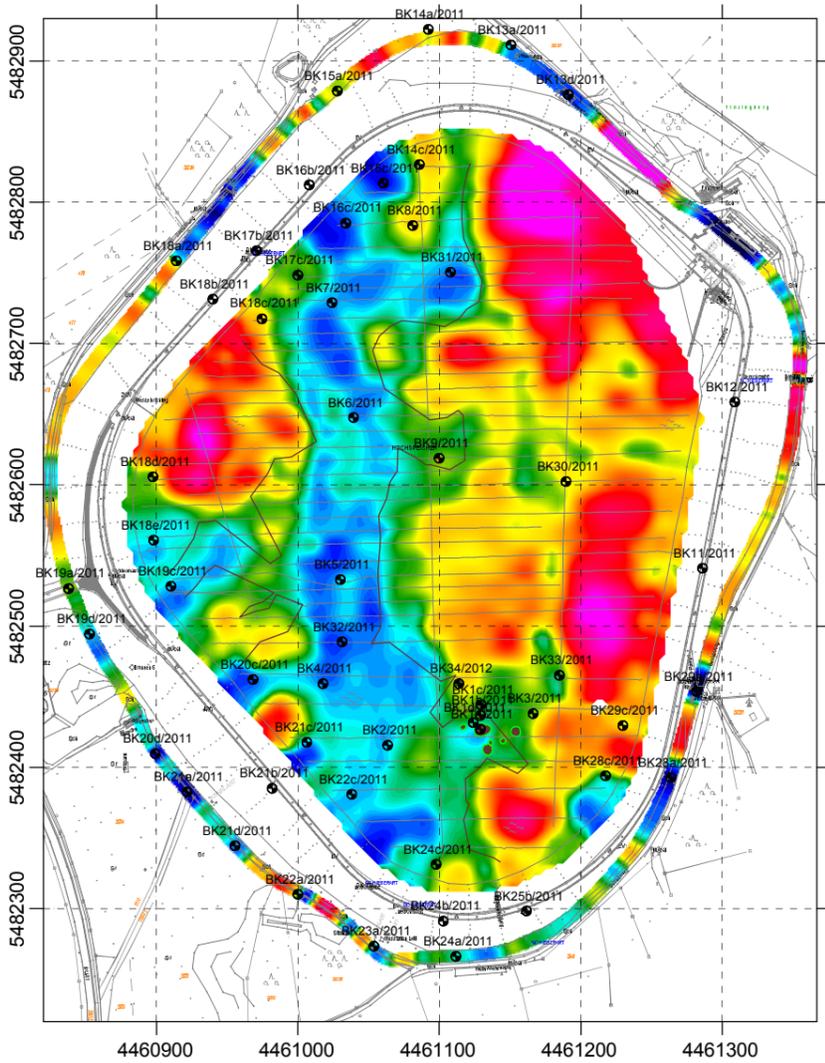


**Geophysik GGD**

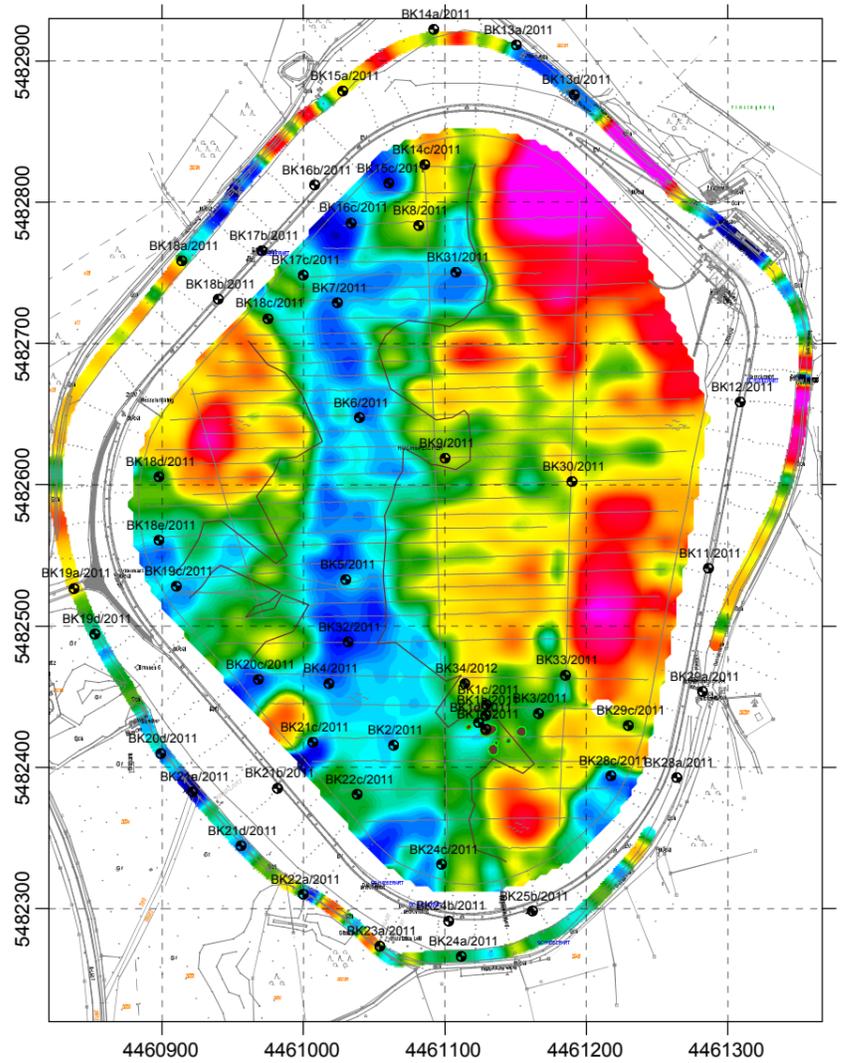
Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt:		<b>PSW Happurg, Sanierung Oberbecken</b> Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)	
Auftraggeber:		<b>E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau</b> Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:		<b>Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1-E25, E204-E216, E301-E303, und Dammfüße, Tiefenniveaus 556.0 m - 551.5 m ü. NN</b>	Maßstab: <b>1 : 5000</b>
angef.: Schw.	Datum: 29.11.2011	Anlage: <b>8.2.2</b>	

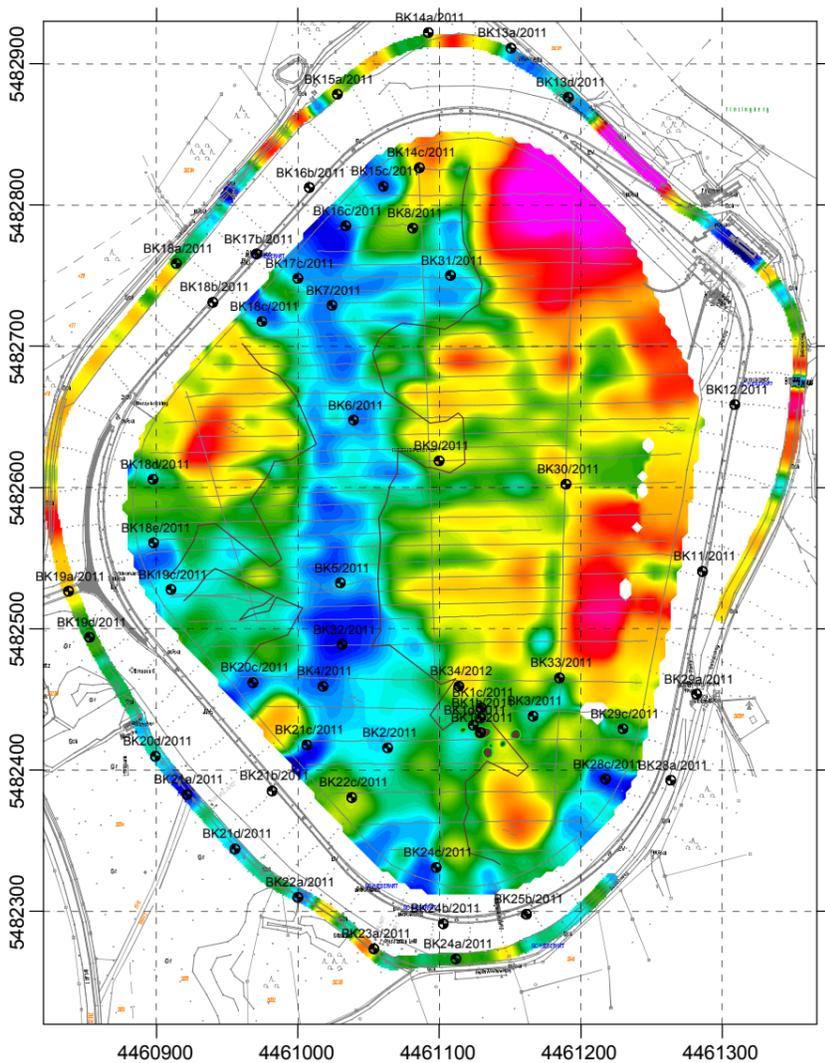
Horizontalschnitt bei ca. 549.5 m NN (Tiefe ca. 11.5 m u. Beckensohle)



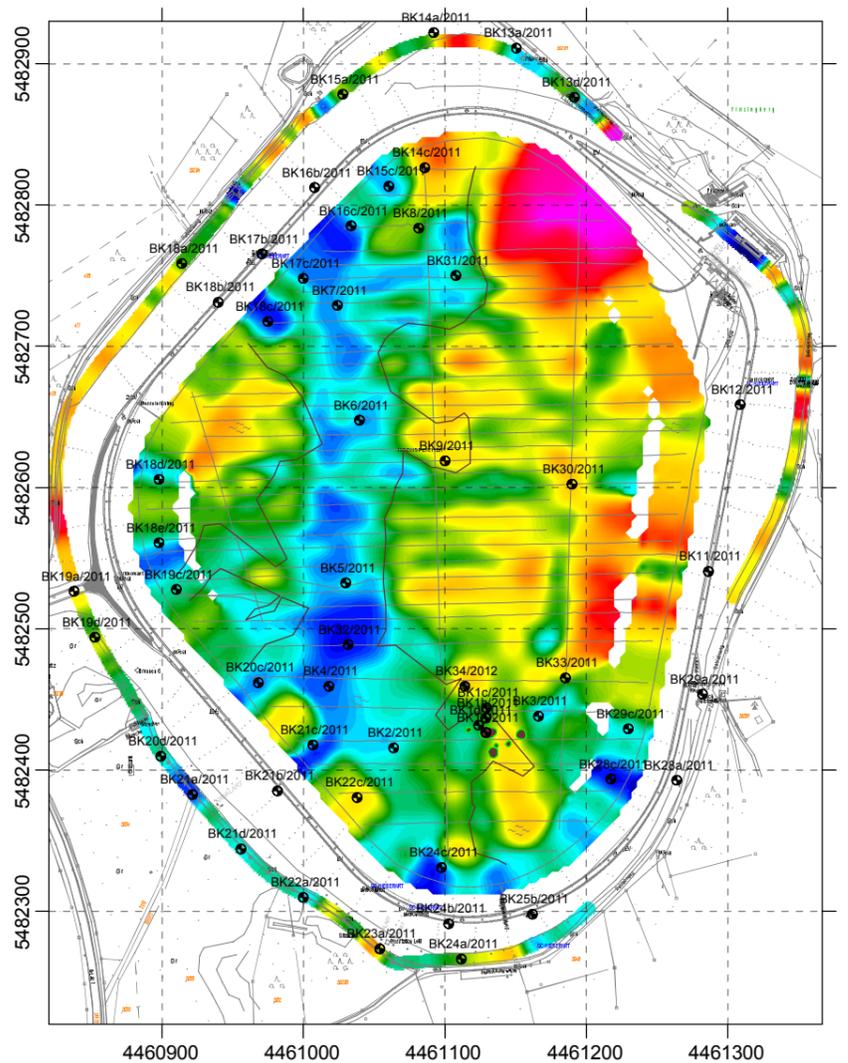
Horizontalschnitt bei ca. 547.5 m NN (Tiefe ca. 13.5 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 545.0 m NN (Tiefe ca. 16.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 543.0 m NN (Tiefe ca. 18.0 m u. Beckensohle)



**Legende**

— Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert

● BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung

● Erdfall

**Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in [ $\Omega$ m]



Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN



**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: **PSW Happurg, Sanierung Oberbecken**  
**Seismische Refraktionstomographie und**  
**geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)**

Auftraggeber: **E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau**  
**Luitpoldstraße 27**  
**84034 Landshut**

Bearbeiter:  
**Dipl.-Geophys.**  
**J. Schwabe**

Titel: **Geoelektrische Horizontalschnitte aus Profilen**  
**E1-E25, E204-E216, E301-E303, und Dammfüße,**  
**Tiefenniveaus 549.5 m - 543.0 m ü. NN**

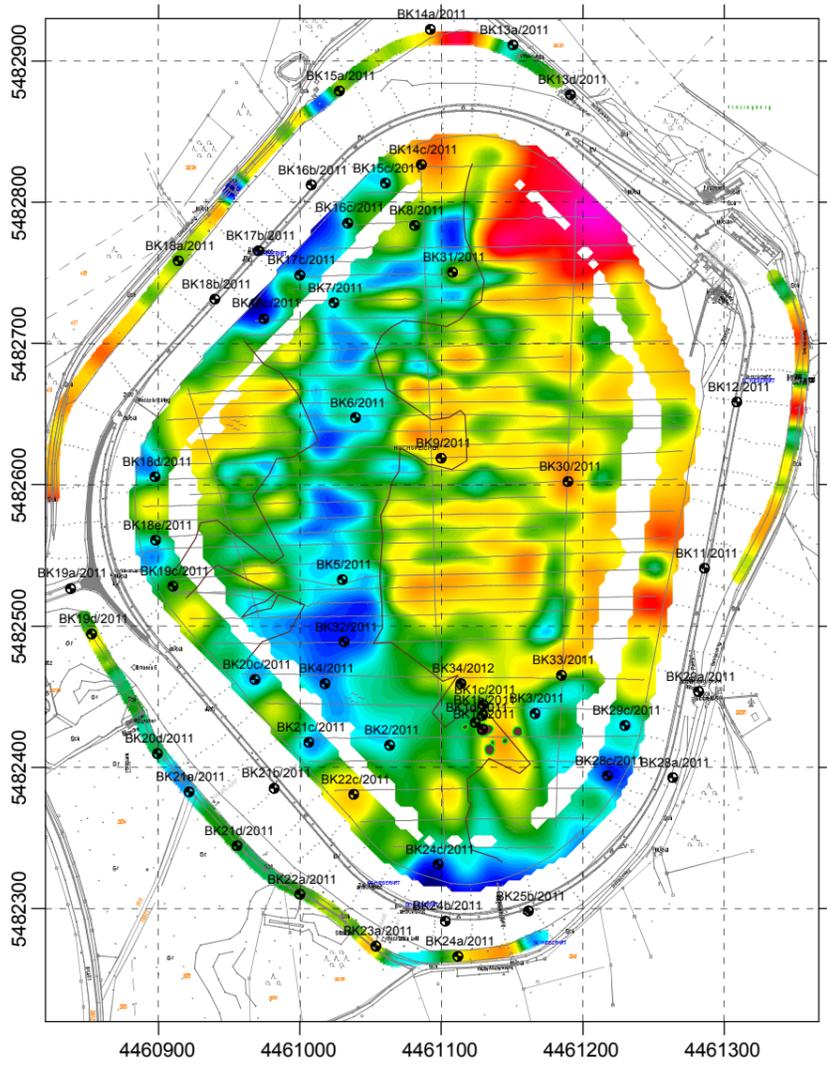
Maßstab:  
**1 : 5000**

angef.: Schw.

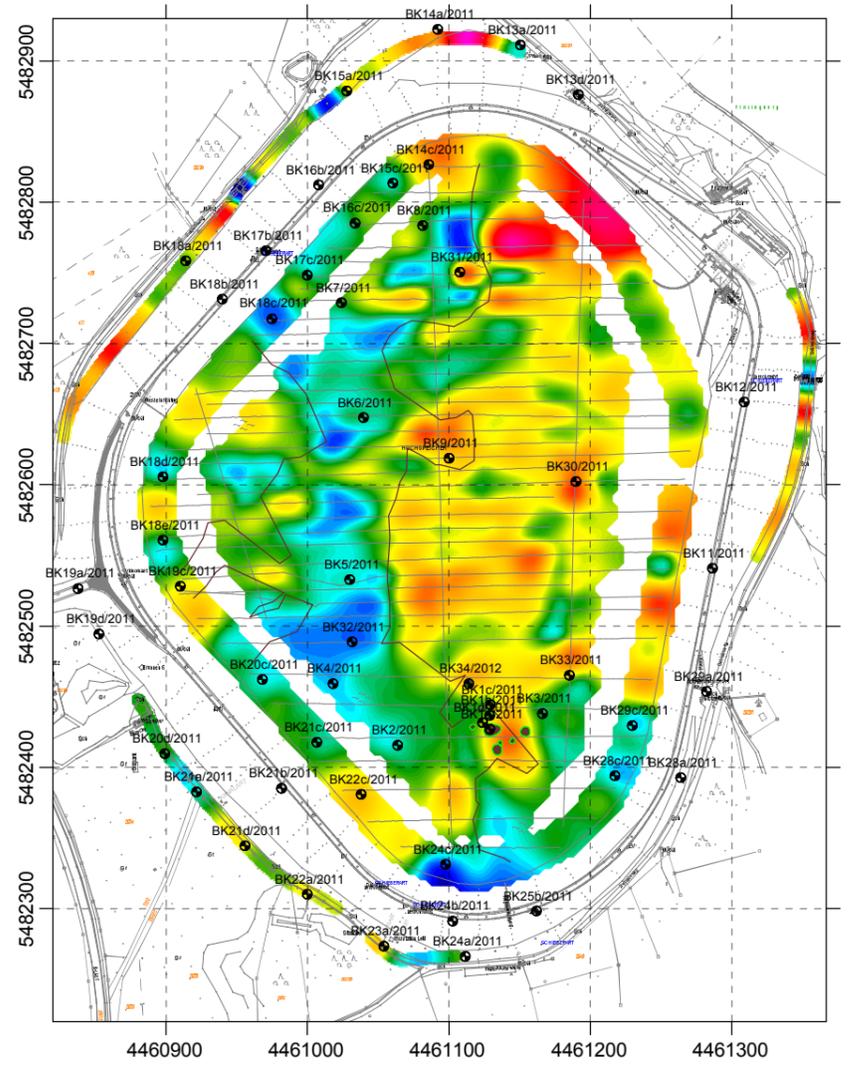
Datum: 29.11.2011

Anlage: **8.2.3**

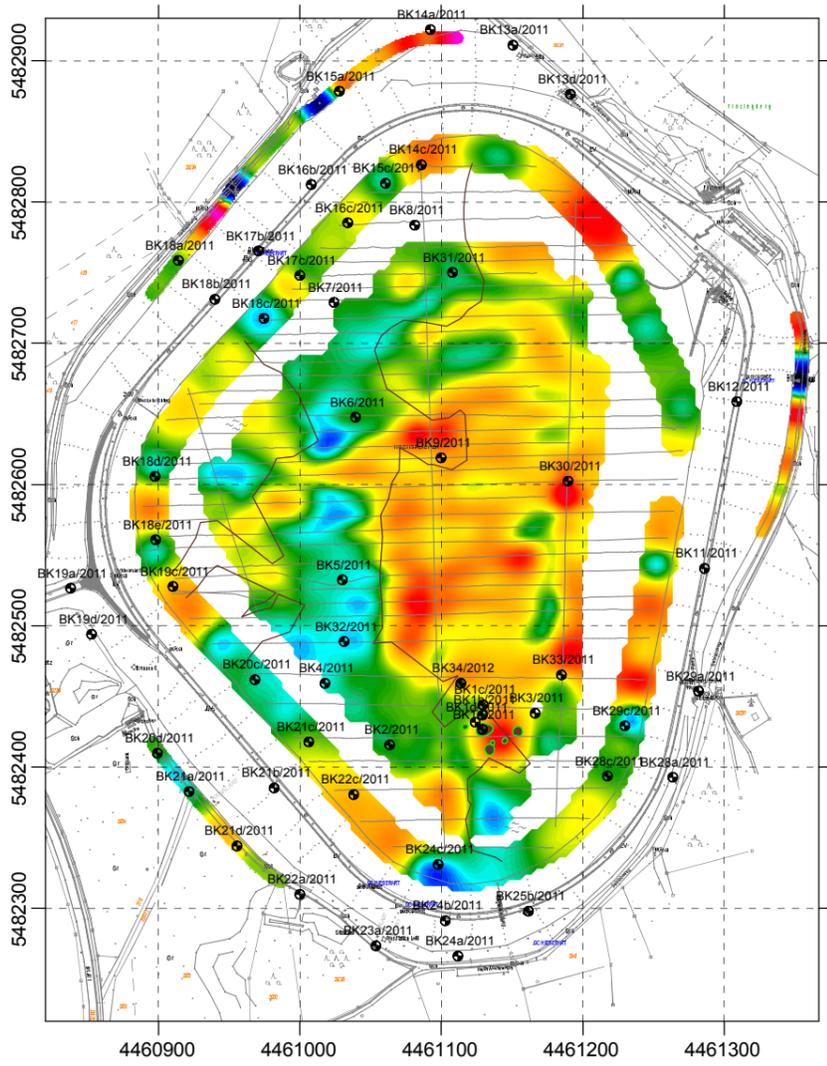
Horizontalschnitt bei ca. 540.0 m NN (Tiefe ca. 21.0 m u. Beckensohle)



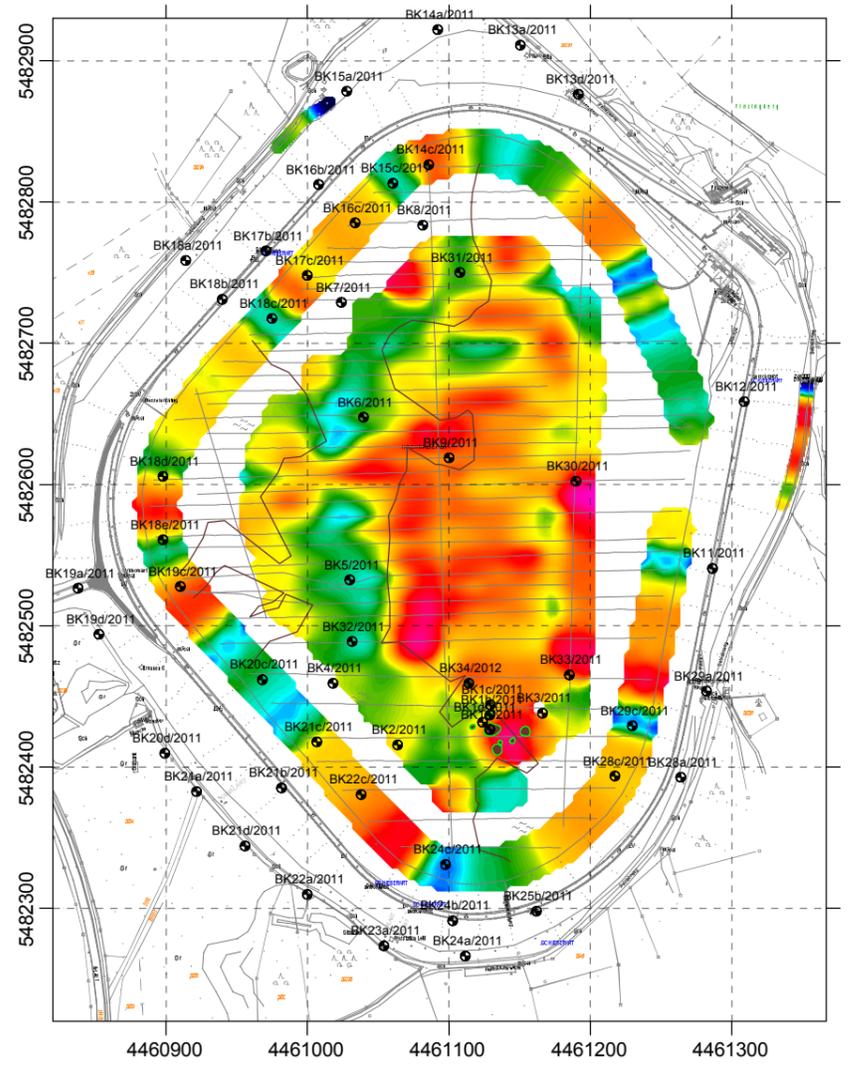
Horizontalschnitt bei ca. 537.0 m NN (Tiefe ca. 24.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 534.0 m NN (Tiefe ca. 27.0 m u. Beckensohle)



Horizontalschnitt bei ca. 531.0 m NN (Tiefe ca. 30.0 m u. Beckensohle)



**Legende**

- Störzone, Lage und Ausbildung aus alten Unterlagen entnommen und daher nicht einwandfrei gesichert
  - BK 15a/2011 Kernbohrung mit Bezeichnung
  - Erdfall
- Spezifischer elektr. Widerstand**  
 $\rho_s$  in  $[\Omega m]$
- 

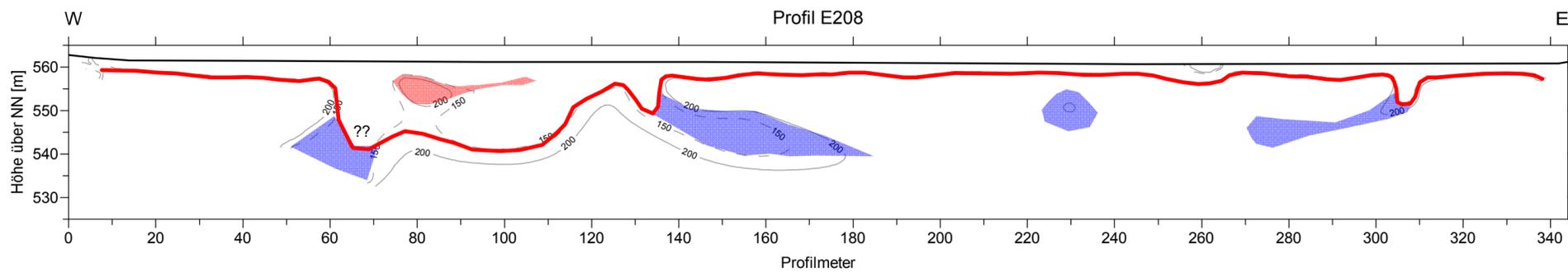
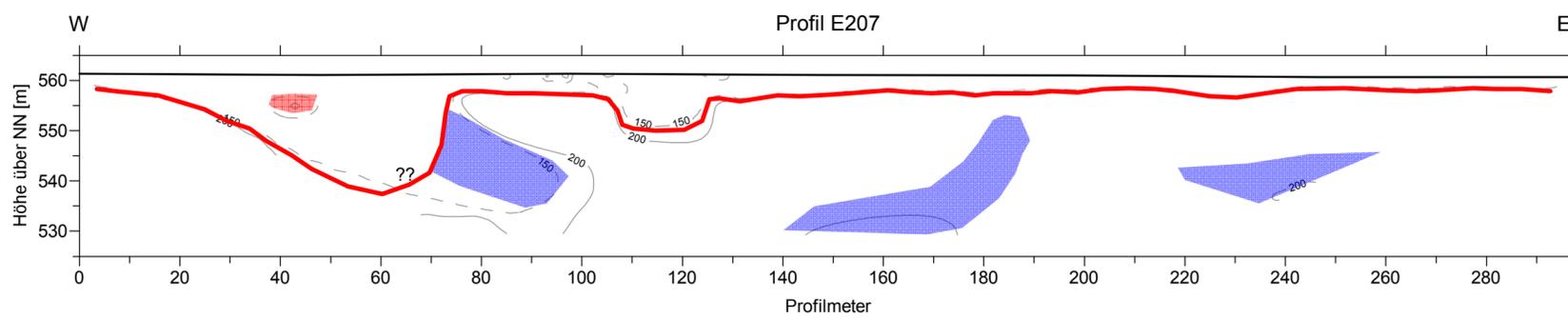
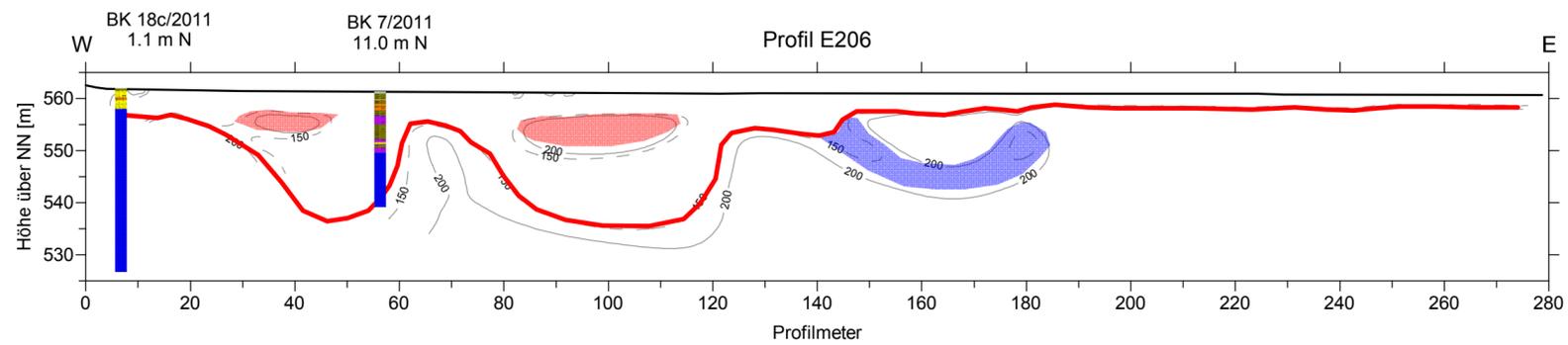
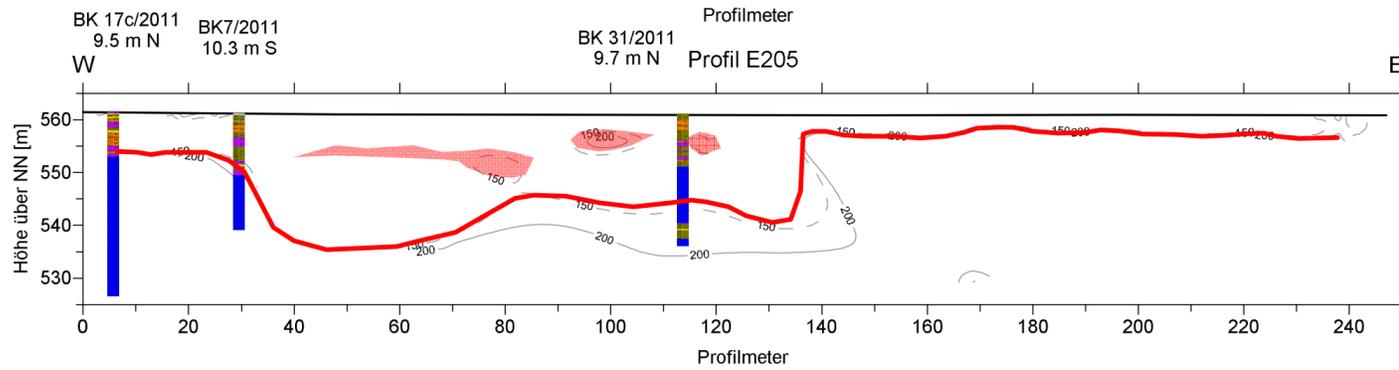
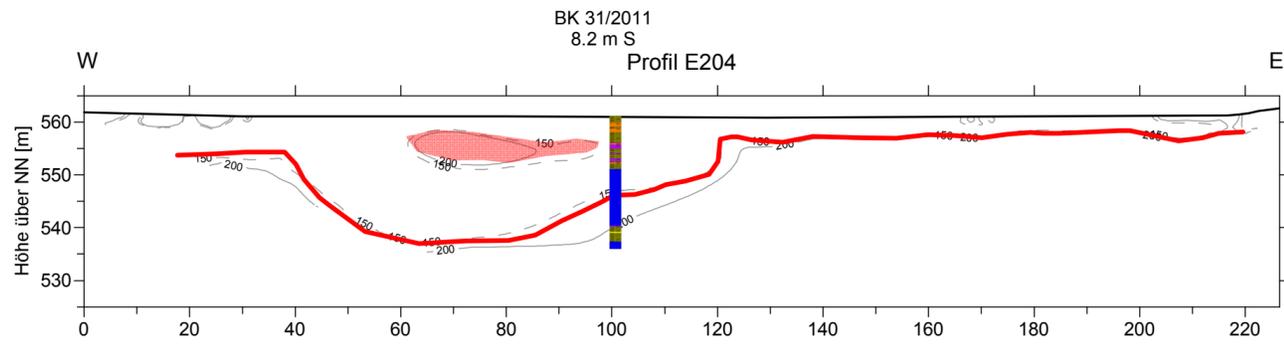
Bezugssystem: Gauß-Krüger, 4. Streifen (3°-Streifen), Höhen in m ü. NN



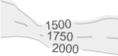
**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.B.H.  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

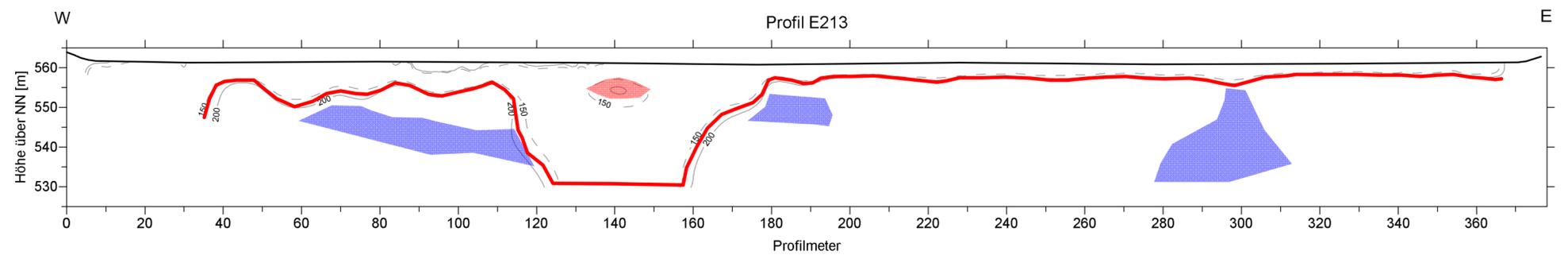
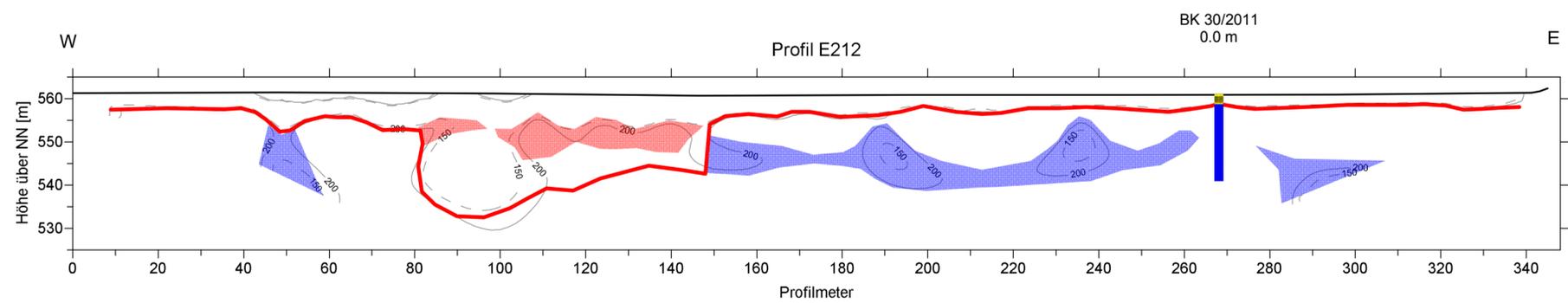
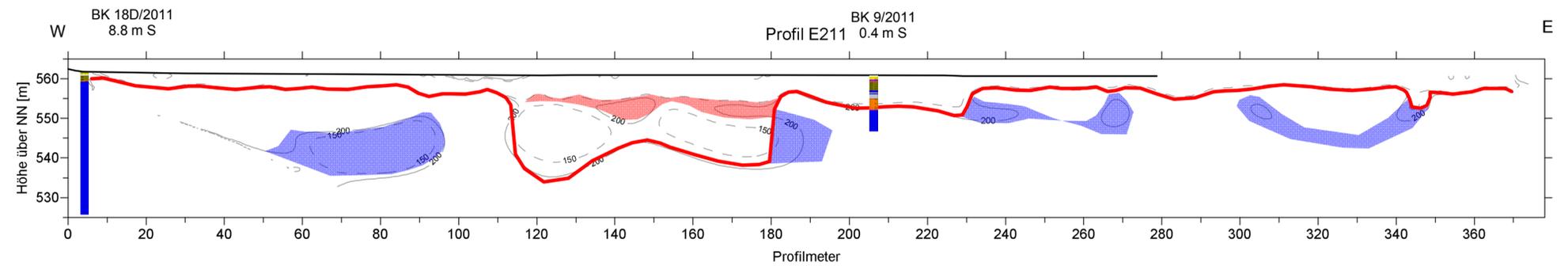
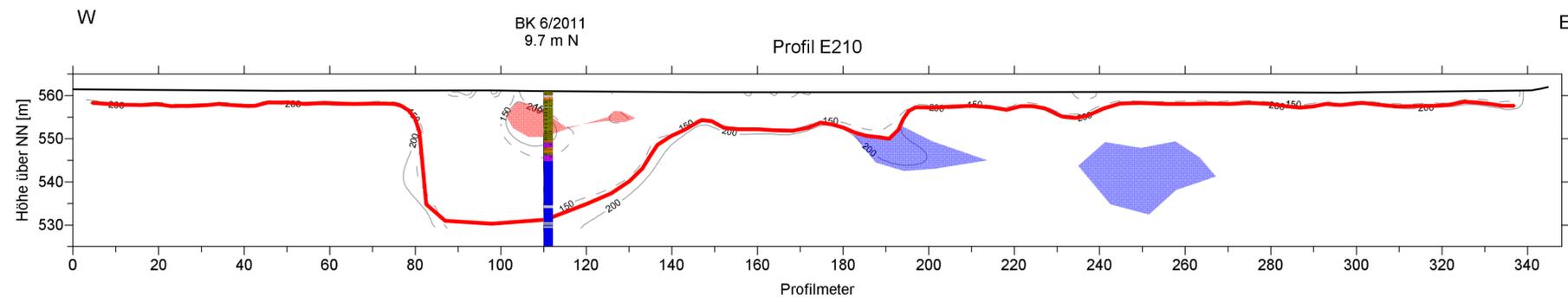
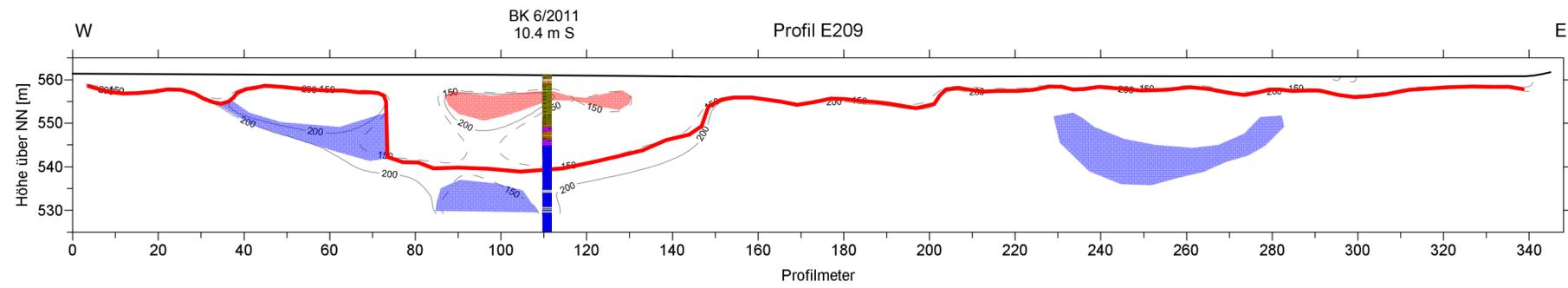
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktions-tomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel:	Geelektrische Horizontalschnitte aus Profilen E1-E25, E204-E216, E301-E303, und Dammfüße, Tiefenniveaus 540.0 m - 531.0 m ü. NN	Maßstab: 1 : 5000
angef.: Schw.	Datum: 29.11.2011	Anlage: 8.2.4



### Legende

-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
-  Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
-  Isoohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
-  BK 14c/2011 1.0 m N Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
-  Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
-  Kalkstein erbohrt

 <b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
<b>Objekt:</b> PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)		
<b>Auftraggeber:</b> E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	<b>Bearbeiter:</b> Dipl.-Geophys. J. Schwabe	
<b>Titel:</b> Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E204 bis E208		<b>Maßstab:</b> 1 : 1000
<b>angef.:</b> Schw.	<b>Datum:</b> 16.12.2011	<b>Anlage:</b> 9,1



### Legende

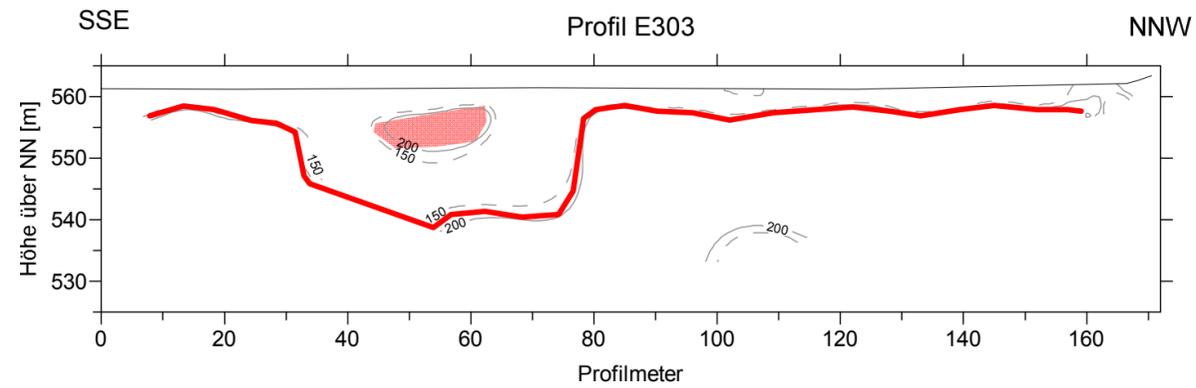
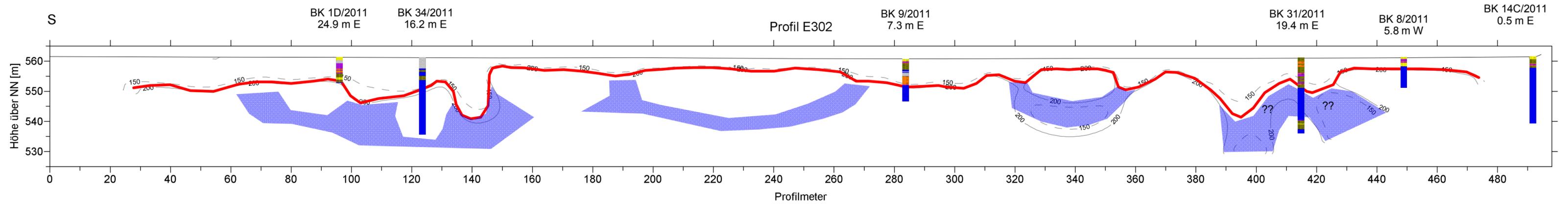
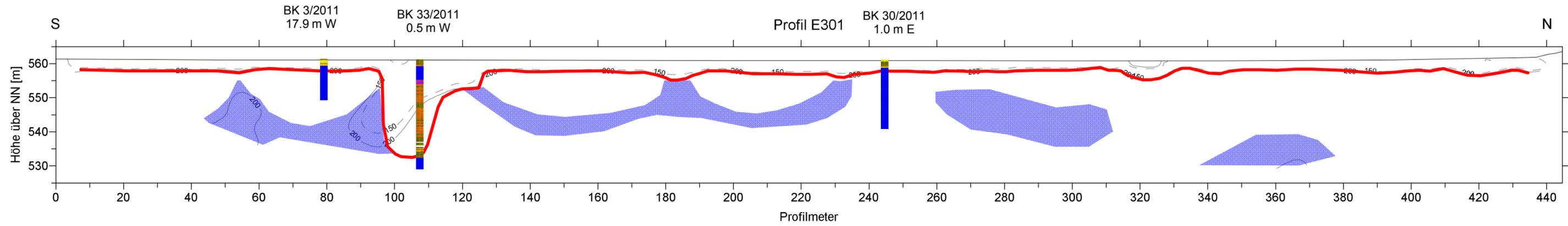
- Felslinie aus Komplexinterpretation
- Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
- Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
- Gradientenzone mit seismischen Geschwindigkeiten von 1500 m/s bis 2000 m/s
- Isohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150 Ωm und 200 Ωm
- BK 14c/2011 1.0 m N Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil
- Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt
- Kalkstein erbohrt

**Geophysik GGD**

Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.  
Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)		Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut		Maßstab: 1 : 1000
Titel: Komplexinterpretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E09 bis E213		Anlage: 9.2
angef.: Schw.	Datum: 16.12.2011	





**Legende**

-  Felslinie aus Komplexinterpretation
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinvorkommen (Blöcke, Schollen) oberhalb der Felslinie
-  Hinweise auf Lockermaterial unterhalb der Felslinie bzw. Verwitterungszone
-  Isohmen der Geoelektrik mit Widerständen von 150  $\Omega$ m und 200  $\Omega$ m

BK 14c/2011 Bohrung mit Name, Entfernung und Richtung senkrecht zum Profil  
1.0 m N

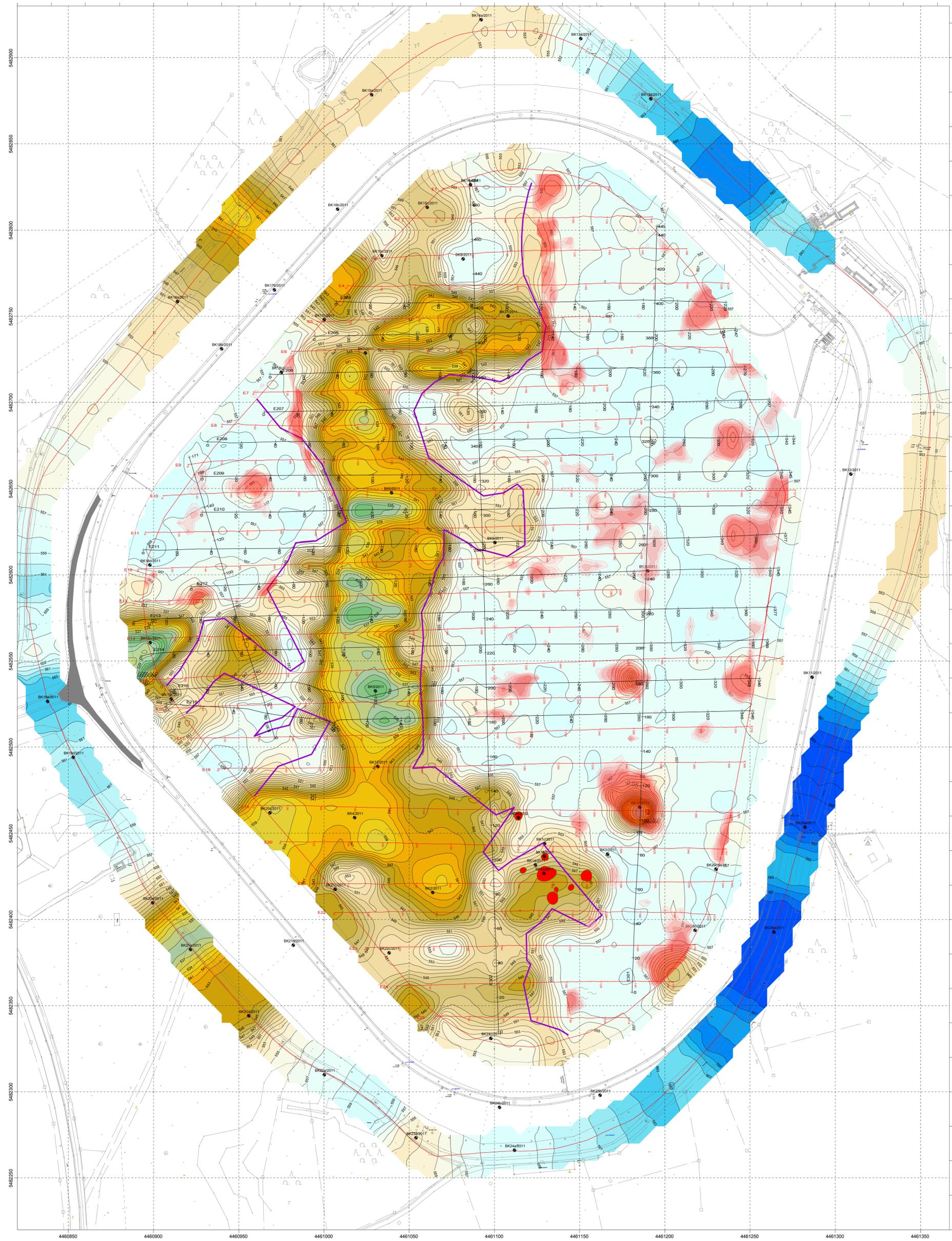


Lockermaterial wie Schluff, Ton, Sand, Kies und Steine erbohrt

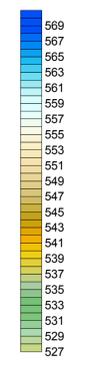


Kalkstein erbohrt

 <b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Happurg, Sanierung Oberbecken Seismische Refraktionstomographie und geoelektrische Sondierungskartierung (Phase2)	
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Titel: Komplexintepretation der geophysikalischen Ergebnisse der Profile E301 bis E303		Maßstab: 1 : 1000
angef.: Schw.	Datum: 16.12.2011	Anlage: 9.4



Höhe der interpretierten Felsoberfläche in m NN

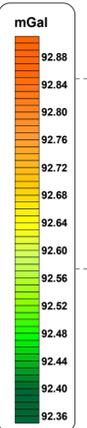
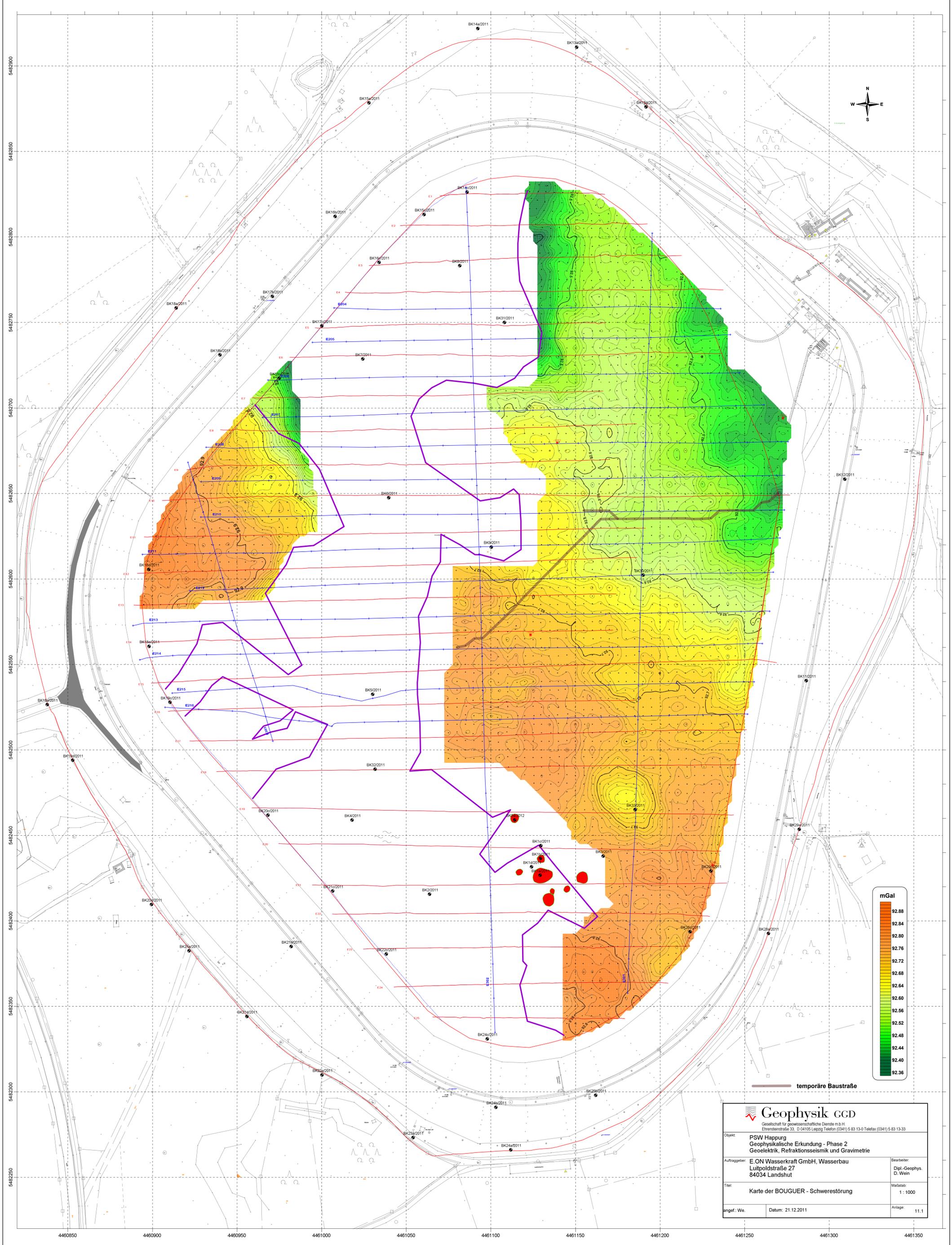


**Legende**

-  geophysikalisches Messprofil (rot - Geoelektrik, blau - Refraktionsseismik, im Becken überwiegend lagegleich)
-  Messprofile Geoelektrik Phase 2
-  Bohrung mit Name
-  Umriss der Störzonen nach Altunterlagen
-  Erdfälle 2011
-  500M Dammsstationierung
-  lokale Schwereminima aus Lokalfeld Griffin 8s (dg < -0.01 mGal)



 <b>Geophysik cGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.</small> <small>Eisensteinstraße 53, D 64155 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Haggung Geophysikalische Erkundung Geoelektrik & Refraktionsseismik (Phase 2)	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. J. Schwabe
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Maßstab: 1 : 1000
Titel:	Karte der Felsoberfläche nach Komplexinterpretation (Phase 2)	Anlage: 10
angef.: Schw.	Datum: 20.12.2011	

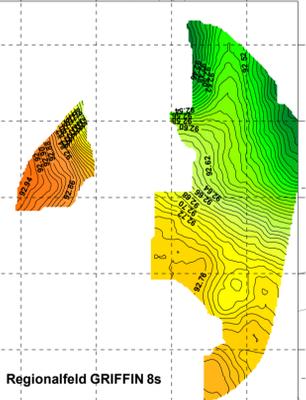
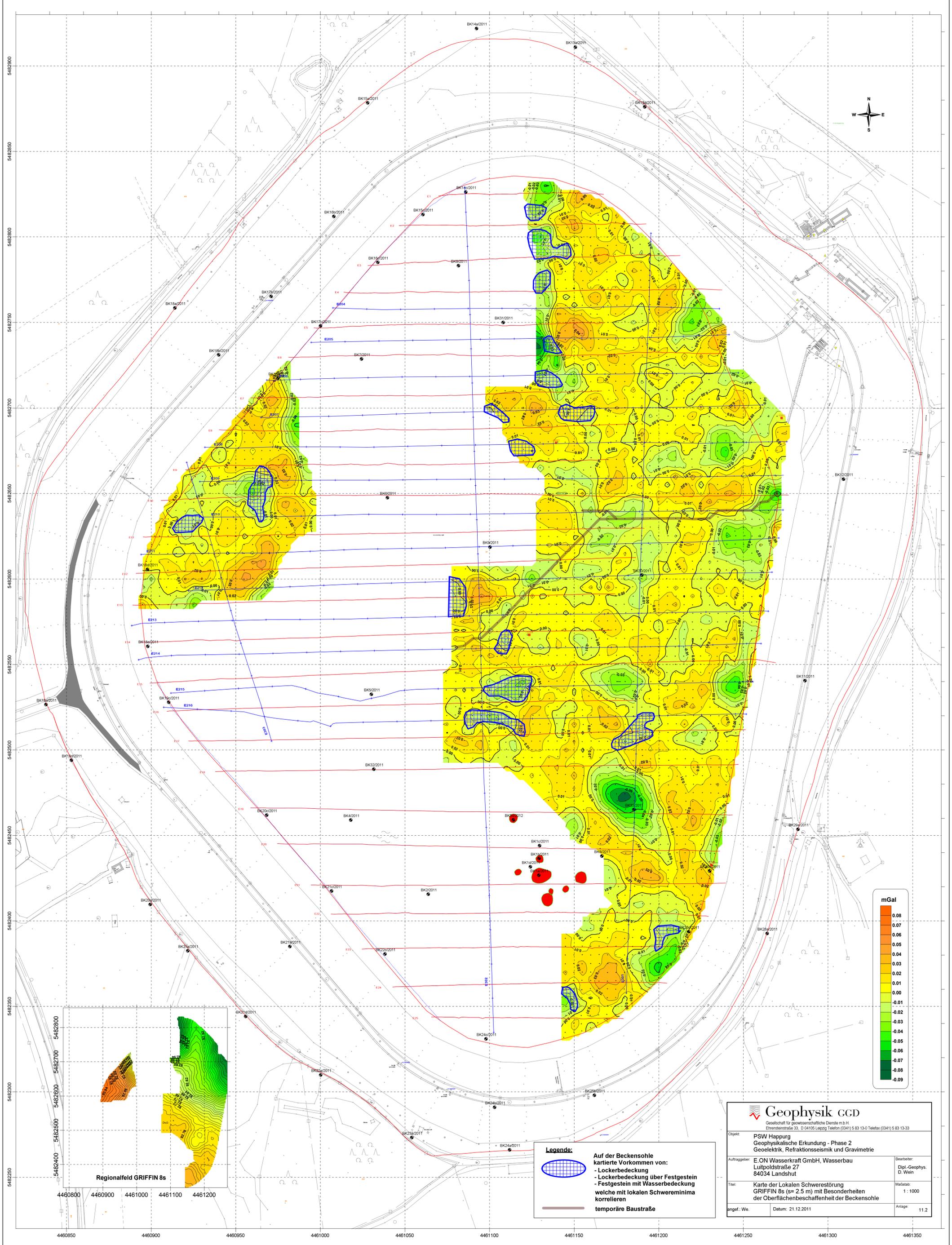


temporäre Baustraße

<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrenreiterstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Happurg Geophysikalische Erkundung - Phase 2 Geelektrik, Refraktionsseismik und Gravimetrie	Bearbeiter:
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Dipl.-Geophys. D. Wein
Titel:	Karte der BOUGUER - Schwerestörung	Maßstab:
angef. We.	Datum: 21.12.2011	Anlage:
		11.1

4460850 4460900 4460950 4461000 4461050 4461100 4461150 4461200 4461250 4461300 4461350

5482300 5482350 5482400 5482450 5482500 5482550 5482600 5482650 5482700 5482750 5482800 5482850 5482900



**Legenda:**

-  Auf der Beckensohle kartierte Vorkommen von:
  - Lockerbedeckung
  - Lockerbedeckung über Festgestein
  - Festgestein mit Wasserbedeckung
 welche mit lokalen Schwereminima korrelieren
-  temporäre Baustraße

**Geophysik GGD**  
 Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste mbH  
 Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33

Objekt: PSW Happurg  
 Geophysikalische Erkundung - Phase 2  
 Geoelektrik, Refraktionsseismik und Gravimetrie

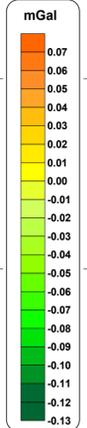
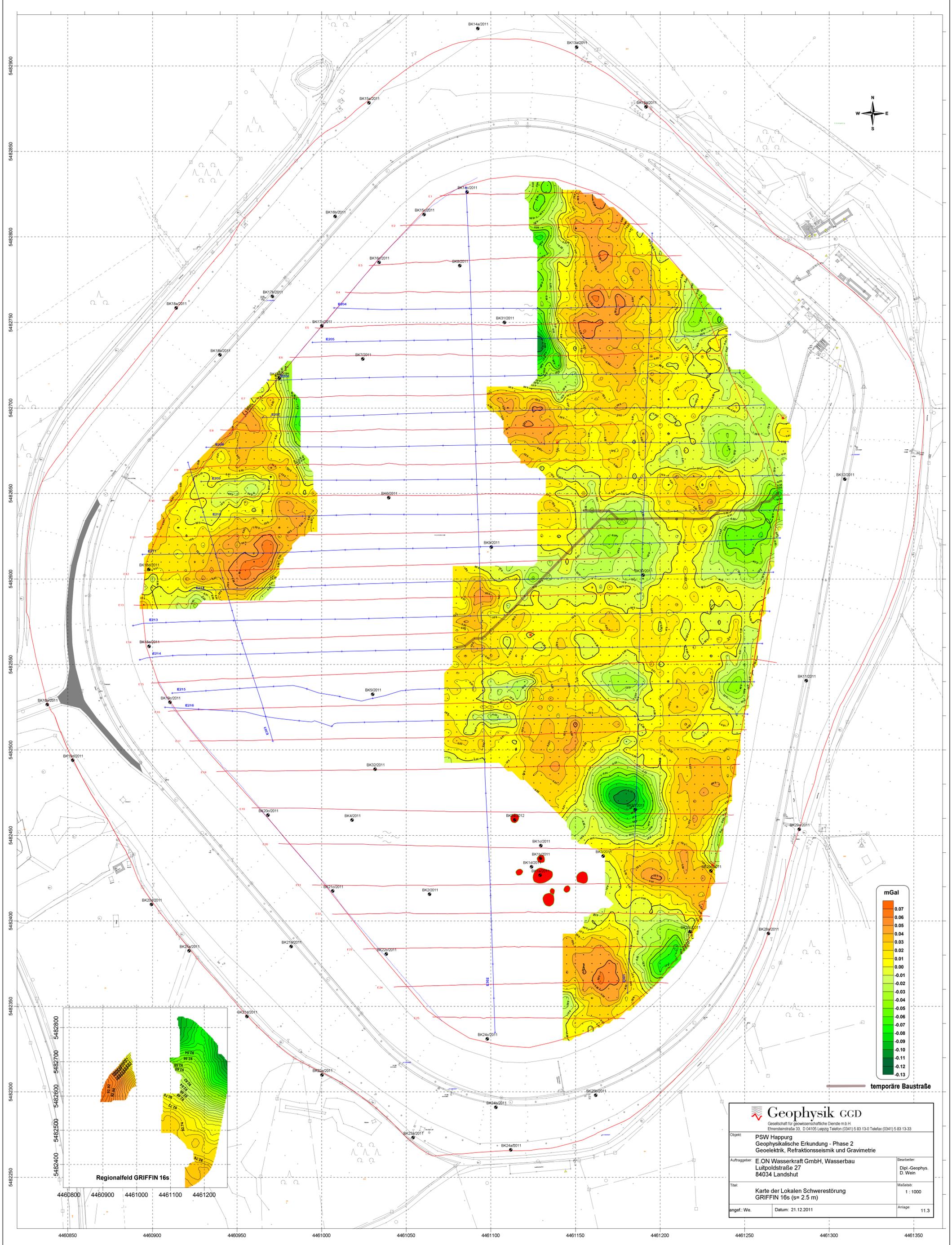
Auftraggeber: E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau  
 Luitpoldstraße 27  
 84034 Landshut

Bearbeiter: Dipl.-Geophys. D. Wein

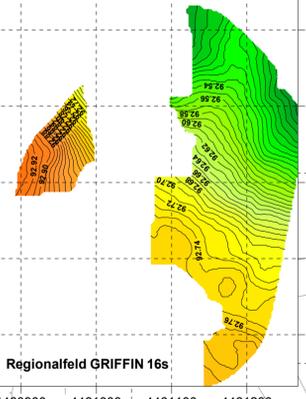
Titel: Karte der Lokalen Schwerestörung  
 GRIFFIN 8s (s= 2.5 m) mit Besonderheiten  
 der Oberflächenbeschaffenheit der Beckensohle

Maßstab: 1 : 1000

angef.: We. Datum: 21.12.2011 Anlage: 11.2

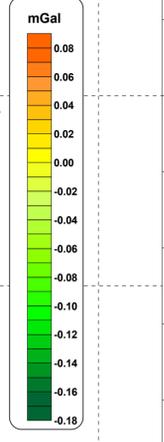
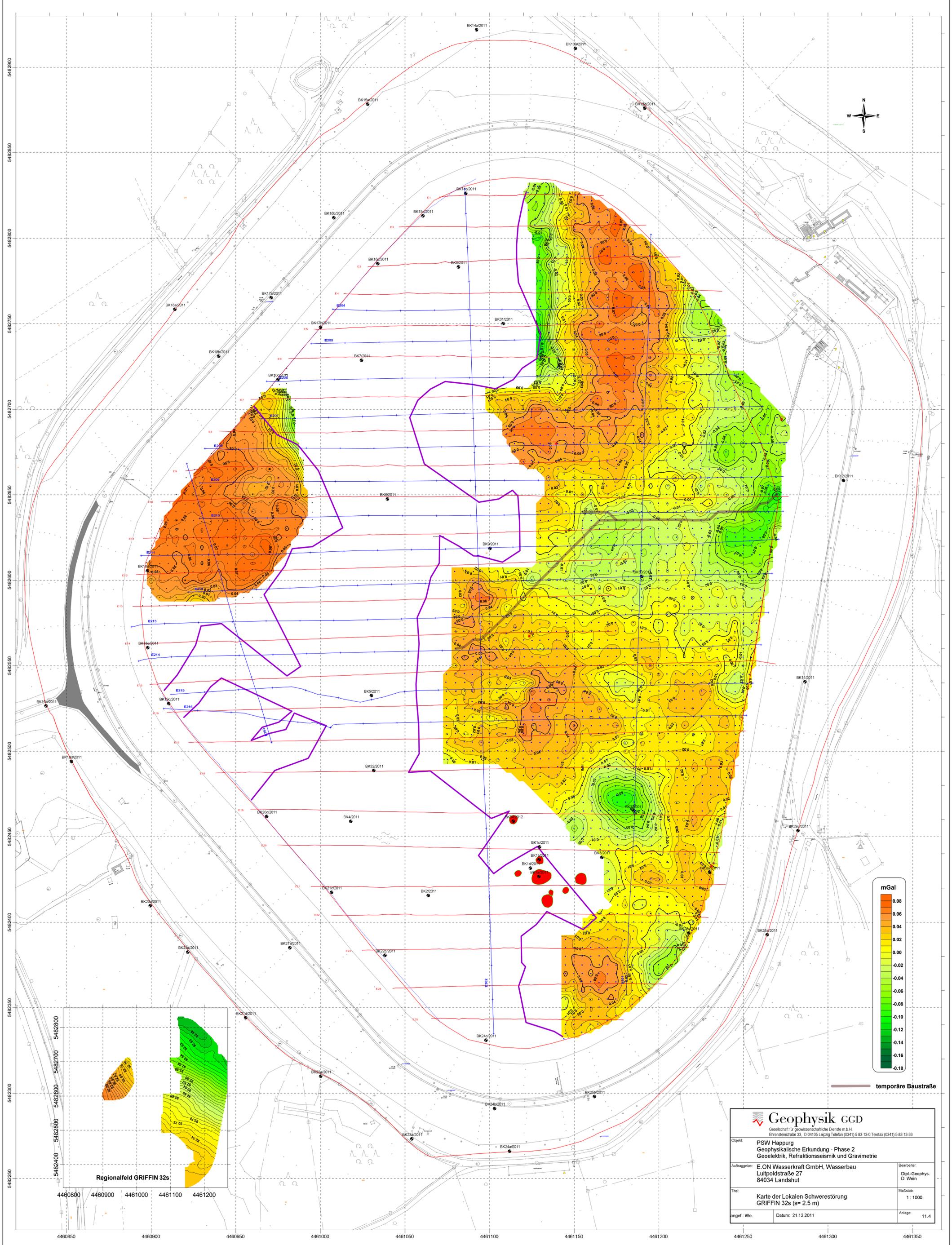


temporäre Baustraße

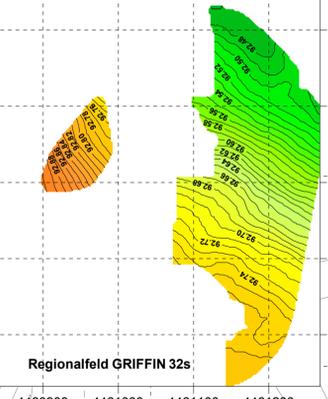


Regionalfeld GRIFFIN 16s

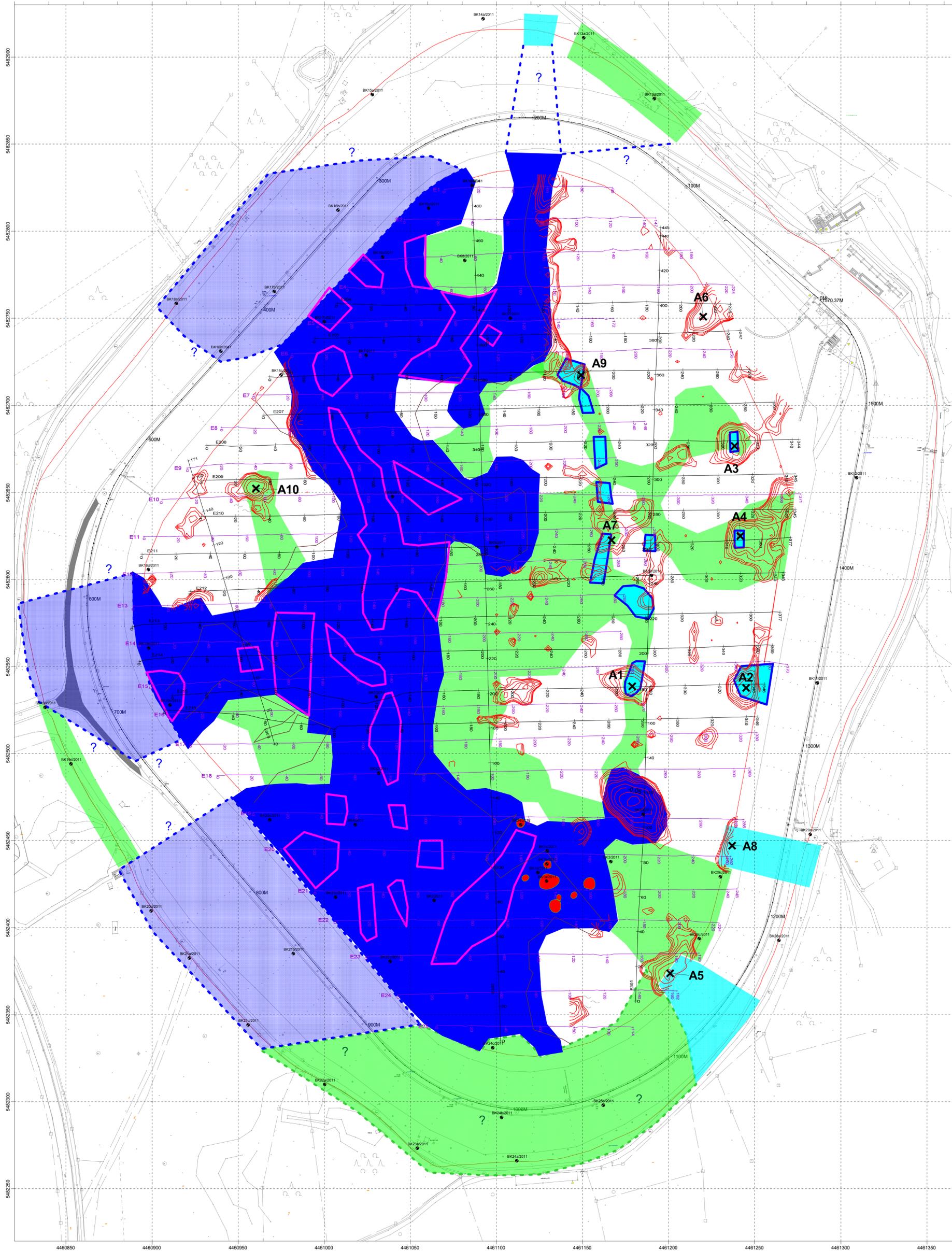
<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.          Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	PSW Happurg Geophysikalische Erkundung - Phase 2 Geoelektrik, Refraktionsseismik und Gravimetrie	Bearbeiter:
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut	Dipl.-Geophys. D. Wein
Titel:	Karte der Lokalen Schwerestörung GRIFFIN 16s (s= 2.5 m)	Maßstab:
angef.: We.	Datum: 21.12.2011	Anlage:
		11.3



temporäre Baustraße

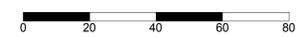


<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H.</small> <small>Ehrensteinstraße 33, D 04105 Leipzig Telefon (0341) 5 83 13-0 Telefax (0341) 5 83 13-33</small>		
Objekt:	<b>PSW Happing</b> <b>Geophysikalische Erkundung - Phase 2</b> <b>Geoelektrik, Refraktionsseismik und Gravimetrie</b>	
Auftraggeber:	<b>E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau</b> <b>Luitpoldstraße 27</b> <b>84034 Landshut</b>	Bearbeiter: Dipl.-Geophys. D. Wein
Titel:	<b>Karte der Lokalen Schwerstörung</b> <b>GRIFFIN 32s (s= 2.5 m)</b>	
Maßstab:	1 : 1000	
Anlage:	11.4	
angef.: We.	Datum: 21.12.2011	



**Legende**

-  Störzone nach Komplexinterpretation
-  Interpolierte Störzone, Verlauf unsicher (keine Messdaten unter Dammkörper)
-  Hinweise auf Lockermaterial bzw. Verwitterung unterhalb der Felslinie
-  Verdacht auf enfestigte Bereiche außerhalb der vermuteten Störzone
-  Enfestigte Bereiche außerhalb der Störzone in Oberflächennähe mit Verdacht auf lokal stark verminderte Kalksteinmächtigkeit
-  Hinweise auf isolierte Kalksteinkörper (Blöcke, Schollen) innerhalb der Störzone
-  Bohrung mit Name
-  Umriss der Störzone nach Altunterlagen
-  Erdfälle 2011
-  Messprofile (Geoelektrik / teilw. Seismik) Phase 1
-  Messprofile Geoelektrik Phase 2
-  lokale Schwereminima aus Lokalfeld Griffin 8s (dg < -0.01 mGal)
-  **A1** Vorgeschlagener Ansatzpunkt für Kontrollbohrung mit Anomaliebezeichnung entspr. Kapitel 4



<b>Geophysik GGD</b> <small>Gesellschaft für geowissenschaftliche Dienste m.b.H. Ehrenstraße 33, D 04105 Leipzig   Telefon (0341) 5 83 13-0   Telefax (0341) 5 83 13-33</small>	
Objekt:	PSW Happung Geophysikalische Erkundung Geoelektrik, Refraktionsseismik & Gravimetrie (Phase 2)
Auftraggeber:	E.ON Wasserkraft GmbH, Wasserbau Luitpoldstraße 27 84034 Landshut
Titel:	Geophysikalische Faktenkarte (Phase 2)
angef.: Schw.	Datum: 20.12.2011
	Blatt: 12
	Maßstab: 1 : 1000
	Arbeitsnr.: Digi-Geophys. J. Schwabe

**Pumpspeicherkraftwerk Happurg · Sanierung Oberbecken  
Untergrundsanieerung im Bereich der Störzone**

**Baugrund- und Sanierungsgutachten**

**Anlage 9**

**Ergebnisse der Baugrunderkundung 2011  
Geophysikalische Untersuchungen**

**Anlage 9.3**

Ergebniszwischenbericht der Test- und Kalibrierungsmessungen  
zur geophysikalischen Erkundung der Verkarstungssituation des  
Baugrundes des Oberbeckens des PSW Happurg,  
aufgestellt am 21.08.2011 durch die Bo-Ra-tec GmbH, Weimar



---

**Ergebniszwischenbericht**

**der Test- und Kalibrierungsmessungen  
zur geophysikalischen Erkundung der Verkarstungssituation  
des Baugrundes des Oberbeckens des PSW Happurg**

**- Bauvorhaben: PS 71.027 -**

---

**Auftraggeber (AG):** E.ON Generation Fleet / E.ON Wasserkraft GmbH, Landshut

**Auftragnehmer (AN):** Bo-Ra-tec GmbH, Weimar  
Geophysik Support, Steinbach

Weimar / Steinbach, d. 21.08.2011

Dr. T. Richter  
Geschäftsführer  
Bo-Ra-tec GmbH



K. Lorenz  
Geschäftsführer  
Geophysik Support



---

***Inhaltsverzeichnis***

	<b>Seite</b>
<b>1.    <i>Veranlassung und Aufgabenstellung</i></b>	<b>3</b>
<b>2.    <i>Erkundungskonzept und Messverfahren</i></b>	<b>4</b>
<b>3.    <i>Umfang und Durchführung der Messungen</i></b>	<b>8</b>
<b>4.    <i>Ergebnisdarstellung</i></b>	<b>14</b>
<b>4.1    <b>Seismische Tomographie</b></b>	<b>14</b>
<b>4.2    <b>Bohrloch-Radar-Messungen</b></b>	<b>17</b>
<b>5.    <i>Referenzbeispiele</i></b>	<b>21</b>
<b>5.1    <b>Seismik</b></b>	<b>22</b>
<b>5.2    <b>Geo-Radar</b></b>	<b>23</b>
<b>6.    <i>Zusammenfassung, Ausblick und Weiterführung der Untersuchungen</i></b>	<b>27</b>
 <b><i>Abbildungsverzeichnis</i></b>	 <b>30</b>
 <b><i>Anlagenverzeichnis</i></b>	 <b>31</b>
 <b><i>Anlagen</i></b>	
 <b><i>Anhang 1 Technische Verfahrensbeschreibung der Radar- und Bohrloch-Radar-Technologie</i></b>	
 <b><i>Anhang 2 Technische Verfahrensbeschreibung der seismischen Tomographie</i></b>	



## **1. Veranlassung und Aufgabenstellung**

In Verbindung mit der Sanierung des Oberbeckens des Pumpspeicherwerkes (PSW) Happurg wurden zahlreiche Erdfälle registriert. Die Schadensfälle weisen ein lokales Absenken der Beckensohle um mehrere Meter in Radien bis 10 m auf. Solche Erdfälle traten auch bereits zu früherer Zeit auf. Aus geologischen und geophysikalischen Untersuchungen ist bekannt, dass den Westteil des Speicherbeckens eine mächtige, etwa Nord-Süd streichende Störungszone durchsetzt. Sie hat stellenweise eine Breite von bis zu 100 m. Obwohl bereits umfangreiche Erkenntnisse zur Ausbildung der Störungszone vorlagen, wurden vorlaufend zu den geplanten Sanierungsarbeiten umfangreiche geophysikalische Oberflächenmessungen ausgeführt. Dabei handelt es sich um 2D-geoelektrische Tomographie und Refraktionsseismik. Die Messungen erfolgten entlang von Ost-West verlaufenden Parallelprofilen auf der Beckensohle und auf zwei Ringprofilen (luft- und wasserseitig des Dammes). Ziel dieser flächenhaft angelegten Untersuchungen war es, den Bereich der Störungszone sowohl lateral wie vertikal möglichst genau einzugrenzen. Mit den vorliegenden Ergebnissen konnte diese Zielstellung erreicht werden. Die Anlage und der Abstand der Messprofile sowie die Messkonfigurationen und –parameter erlauben generelle Aussagen zur Abgrenzung der Störungszone und des angrenzenden Kalksteingebirges. Informationen über singuläre Auflockerungszonen und offene Hohlräume, die im Untergrund des Oberbeckens existieren und partiell während der gegenwärtig laufenden Sanierungsarbeiten zu weiteren Erdfällen geführt haben, können aus diesen geophysikalischen Übersichtsmessungen nicht gewonnen werden. Dazu ist eine weiterführende Detailerkundung der am stärksten gefährdeten Bereiche des Oberbeckens notwendig, die nur durch eine Kombination aus Bohrerkundung und geophysikalischen Zwischenfeldmessungen zielführend sein kann. In telefonischen Diskussionen mit Herrn Prof. Moormann (IGS – Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart) wurden bereits ausführlich die Randbedingungen und Grenzen des Einsatzes der modernen Verfahren der Oberflächen- und Bohrlochgeophysik erörtert. Durch einen Vor-Ort-Termin auf der Baustelle am 21.06.2011 und dem Meinungsaustausch mit dem verantwortlichen Ingenieurgeologen, Herrn Dr. Hanisch (Jorge-Consult Hannover), konnte die im Vorfeld getroffene Entscheidung zur prinzipiellen Vorgehensweise bei der Detailerkundung innerhalb der 2. Erkundungsphase bestätigt und untersetzt werden.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Baugrund unterhalb der Dammaufstandsflächen im südlichen und nördlichen Kreuzungsbereich der Störungszone in den Bereichen des Ringdammes, in denen nach den bisherigen Erkundungsergebnissen geophysikalische Anomalien nachgewiesen wurden, detaillierter zu untersuchen. Der Fokus dieser geophysikalischen Spezialuntersuchungen richtet sich sowohl auf eine weitere Eingrenzung und Präzisierung des geologisch-strukturellen Baugrundaufbaus als auch auf die Gewinnung einer möglichst belastbaren Aussage hinsichtlich der Existenz von weiteren, bisher unerkannten Auflockerungszonen und Hohlräumen im Einflussbereich der Dammaufstandsflächen des Ringdammes, die zu einer Gefährdung der Standsicherheit des Erdbauwerkes führen können.

Die sehr stark gestörten, heterogenen Baugrundverhältnisse in Verbindung mit dem hydrogeologischen Regime innerhalb der nord-süd-streichenden Störungszone stellen auch an die Verfahren der geophysikalischen Zwischenfelderkundung hohe Anforderungen hinsichtlich



der technischen Durchführbarkeit in Verbindung mit den geforderten Aussagen der Baugrunddetailerkundung. Das innerhalb der ersten und zweiten Bohrerkundungsphase existente Bohrraster ist für diese Detailerkundung zu weitmaschig, um die eingangs erläuterte Aufgabenstellung lösen zu können. Aus diesem Grund wurde in Absprache mit dem AG und Herrn Prof. Moormann eine vorlaufende Test- und Kalibriermessphase vereinbart. Das Ziel dieser Messungen bestand darin, die Eignung sowie die Grenzen, Auflösung und Randbedingungen des Einsatzes der geophysikalischen Verfahren der Zwischenfelderkundung unter den konkreten Bedingungen vor Ort als Grundlage für eine effiziente Planung der geophysikalischen Detailerkundung zu bestimmen. Gegenstand dieses Zwischenberichtes ist die Dokumentation der Ergebnisse der in der 31. KW durchgeführten Testmessungen. Sie bilden die Grundlage für den im Kapitel 6 dargelegten Ausblick und für entsprechende Empfehlungen.

## ***2. Messverfahren und Erkundungskonzept***

In Abhängigkeit von den konkreten petrophysikalischen Bedingungen eines Untersuchungsgebietes sind prinzipiell folgende geophysikalischen Verfahren für die Hohlraum-, Karst- und Störungserkundung besonders geeignet: Geo-Radar-Technologie, geoelektrische Tomographie, Seismik und Gravimetrie. Für alle Verfahren existieren sowohl Technologien der Anwendung von der Oberfläche aus als auch in bzw. zwischen Bohrlöchern. Die Entscheidung darüber, eine Hohlraumerkundung von der Oberfläche aus oder durch Messungen in Bohrungen durchzuführen, hängt neben den eingangs erwähnten petrophysikalischen Parametern der anstehenden Materialien maßgeblich von den geforderten minimalen Nachweisgrenzen eines Hohlraumes ab, d. h. von seiner Dimension (Durchmesser), der maximal zu erzielenden Erkundungstiefe und dem Zustand des Hohlraumes (offen luft- oder wasser- oder mit Karstsedimenten gefüllt, verbrochen). Im Leistungs- und Kostenangebot vom 24.06.2011 wurde bereits darauf hingewiesen, dass der weitere Einsatz oberflächengeophysikalischer Verfahren für die Baugrunderkundung im Bereich der Dammaufstandsflächen nicht zielführend ist. Im Kapitel 5.2 dieses Ergebniszwischenberichtes soll allerdings ergänzend zu den Referenzbeispielen der Bohrloch-Radar-Technologie auf einige Randbedingungen des Einsatzes der Oberflächengeophysik hingewiesen werden. Dies erfolgt deshalb, weil das westlich und östlich der Störungszone unter der Dichtschicht anstehende „intakte“ Karstgebirge im oberflächennahen Bereich bis maximal 10 m unter GOK noch zu einem späteren Zeitpunkt hinsichtlich der Existenz von offenen, luftgefüllten Hohlräumen bzw. signifikanten Auflockerungszonen untersucht werden soll.

Eine hinreichend sichere Lösung der im Kapitel 1 beschriebenen Aufgabenstellung innerhalb der Störungszone und hier speziell im Kreuzungsbereich der nördlichen und südlichen Dammaufstandsflächen ist nur über spezielle Messungen in und zwischen Bohrlöchern möglich. In der Praxis hat sich eine Kombination aus Reflexions- und Durchstrahlungsmessungen (Crosshole-Messungen und/oder tomographische Verfahren) bewährt. Diese Technologien geophysikalischer Bohrloch-Spezialmessverfahren gehören heute zu den Routineverfahren für Baugrunduntersuchungen o. g. Aufgabenstellung. Bei den Zwischenfelderkundungen sind sowohl seismische, elektrische und elektromagnetische (Bohrloch-Radar) Durchstrahlungsmessungen möglich. Alle Verfahren und Technologien werden durch die AN angeboten und in der Praxis für vielfältige Aufgabenstellungen eingesetzt. Elektrische Zwischenfelderkun-



dungen scheiden im vorliegenden Falle auf Grund ihres zu geringen Auflösungsvermögens aus. Für Untersuchungen in Karstgebieten ist die Bohrloch-Radar-Technologie normalerweise besser geeignet als seismische Durchstrahlungsmessungen. Dies begründet sich aus dem markant größeren Anomaliekontrast der elektrischen Eigenschaften eines intakten, unverwitterten und unverkarsteten Kalksteins einerseits im Verhältnis zu einer Verkarstungszone andererseits. Der spezifische elektrische Widerstand eines unverwitterten Kalksteins ist gewöhnlich sehr hoch und liegt im Kiloohmbereich. Dies trifft auf den im Untersuchungsgebiet anstehenden Kalkstein mit hoher Wahrscheinlichkeit zu. Ein verkarsteter Bereich ist im Fall einer bindigen Karstfüllung sehr gut leitfähig, d. h. sehr niederohmig. Sein spezifischer elektrischer Widerstand liegt im Bereich von nur wenigen Ohmmetern oder Zehnerohmmetern. Falls ein Karsthohlraum offen ist, ist dieser im wassergesättigten Bereich ebenfalls sehr niederohmig. Bei Luftfüllung wird er dagegen auf Grund der Wirkung der Luft als Isolator extrem hochohmig. Auch im letztgenannten Fall ist ein luftgefüllter Hohlraum durch die Bohrloch-Radar-Technologie nachweisbar, weil der elektrische Widerstandskontrast gegenüber einem unverkarsteten Kalkstein trotzdem noch sehr markant ist. Zusätzlich zum Leitfähigkeitskontrast liegt auch der Laufzeitkontrast der Radarwellen in einem kompakten Kalkstein gegenüber einem luft- bzw. wassergefüllten Hohlraum bei ca. 1:3 bzw. 3:1 und ist damit messtechnisch sicher erfassbar. Für seismische Durchstrahlungsmessungen dagegen ist der Kontrast der zu messenden Laufzeiten der elastischen oder seismischen Wellen zwischen einem unverwitterten / unverkarsteten Kalkstein und einer Verkarstungszone häufig etwas geringer.

Ein weiterer Vorteil der Bohrloch-Radar-Technologie liegt darin begründet, dass neben der Laufzeit der Radarwellen auch die Amplitude und damit die Dämpfung der Radarwellen genau erfasst werden kann. Da in Verkarstungszonen mit bindigen Karstfüllungen die Radarwellen im Vergleich zu einem unverwitterten / unverkarsteten Kalkstein extrem gedämpft werden, ist auch bei Messung dieses zweiten Parameters ein sehr hoher Anomaliekontrast und damit eine sichere Detektion garantiert. Bei seismischen Durchstrahlungsmessungen kann in der Regel mit einem vertretbaren Aufwand nur die Laufzeit der elastischen Wellen exakt gemessen werden.

Sowohl für seismische als auch elektromagnetische Durchstrahlungsmessungen gilt eine physikalische Nachweisgrenze der Ortung von Hohlräumen, die je nach Hohlraumfüllung ein Verhältnis zwischen Bohrlochabstand und Größe des nachzuweisenden Hohlräume von 5/1 bis 7/1 nicht überschreiten darf. Entsprechend dieser objektiv physikalischen Randbedingungen müssen die Abstände der Bohrlöcher für die Untersuchungen so gewählt werden, dass unter Bezug auf die konkrete Aufgabenstellung ein minimal nachzuweisender Hohlraum einer bestimmten Dimension noch auflösbar ist.

Auf technologische Details der Bohrloch-Radar-Messtechnologie soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Dem Zwischenbericht ist im Anhang 1 eine Kurzfassung der technischen Verfahrensbeschreibung der Radar- und Bohrloch-Radar-Technologie beigelegt.

Trotz der beschriebenen Vorteile der Bohrloch-Radar-Technologie zur Störungs- und Karsterkundung in Sulfat- und Karbonatgesteinen wird der Einsatz dieser Verfahren für die hier zu lösende Teilaufgabenstellung aus physikalischen Gründen nicht oder nur begrenzt möglich sein. Die Geologie der Bohrungen in den zu untersuchenden Teilabschnitten der Dammauf-



standsflächen weisen im Bereich der Störungszone zumindest bis zur Hangendgrenze des in einer Teufe von ca. 20 m unter GOK aufgeschlossenen Kalksteins sehr heterogene und vor allem sehr bindige, elektrisch gut leitfähige Sedimente aus. Diese Sedimente werden aus der Erfahrung von Messungen unter analogen Bedingungen die Energie der Radarwellen so stark absorbieren, dass sowohl eine Erkundung im Reflexions- wie auch Crosshole- oder tomographischen Modus nicht oder nur begrenzt möglich sein wird. Da die Bohrungen in der Regel bis mehrere Meter in den liegenden Kalkstein geteuft wurden, wäre die Bohrloch-Radar-Technologie lediglich in diesen liegenden Abschnitten der Erkundungsbohrlöcher sinnvoll. Ob eine Hohlraum- oder Verkarstungsgefahr von dem unmittelbar liegenden Kalksteinhorizont unterhalb der Störungszone ausgeht, kann hier ohne zusätzliche Kenntnisse nicht prognostiziert werden. Falls dies der Fall sein sollte, könnten diese Bereiche mittels Bohrloch-Geo-Radar untersucht werden.

Obwohl der Schwerpunkt der Testmessungen entsprechend des Angebotes vom 24.06.2011 und unter Bezug auf das vorab skizzierte Erkundungskonzept auf der seismischen Tomographie liegt, wurde nach Auswahl der Bohrungen für die Testmessungen die Entscheidung getroffen, zusätzliche Messungen mit den Verfahren der Bohrloch-Radar-Technologie durchzuführen. In den Bohrprofilen der für die Testmessungen ausgewählten Bohrungen BK 2/2011, BK 32/2011 und BK 35/2011 wurden länger aushaltende Kalksteinbereiche aufgeschlossen, die hinsichtlich ihrer Teufenlage in den einzelnen, relativ eng beieinander liegenden Bohrungen stark schwanken. Obwohl die beobachteten Erdfälle im Oberbecken des PSW vermutlich durch Zusammenbrüche von Auflockerungsbereichen oder Hohlräumen, die in dem mit Karstsedimenten gefüllten Bereich der Störungszone liegen, entstanden sind, sind die ursprünglichen Ursachen in der Verkarstung des anstehenden Kalksteins im Untersuchungsgebiet zu suchen. Dieser fachliche Gesichtspunkt bildete die Grundlage für die Entscheidung, in und zwischen den ausgewählten Bohrungen zusätzliche Bohrloch-Radar-Messungen durchzuführen. Die aufgeschlossenen, länger aushaltenden Kalksteinbereiche in den Bohrungen waren fachliche Grundlage und Rechtfertigung dieser Entscheidung. Die Messungen verfolgten dabei das Ziel, zusätzliche Informationen zu evtl. offenen Karststrukturen zwischen den Bohrungen bzw. zu Karststrukturen um die vermessenen Bohrungen zu gewinnen.

Um gesicherte Aussagen zur beschriebenen Teilaufgabenstellung im Bereich der mit Karstsedimenten gefüllten Störungszone treffen zu können, bietet der Einsatz der Bohrlochseismik in Form tomographischer Messungen die einzige Alternative. Auf eine Detaildarstellung technologischer und messtechnischer Grundlagen der Bohrlochseismik soll innerhalb dieses Kapitels nicht näher eingegangen werden. Dem Anhang 2 zu diesem Zwischenbericht ist analog zu den Verfahren der Radar- und Bohrloch-Radar-Technologie eine technische Verfahrenskurzbeschreibung beigelegt.

Aus den bisherigen Erläuterungen und den im Anhang beigelegten technischen Verfahrensbeschreibungen sind die erzielbaren Aussagen aus seismischen und elektromagnetischen (Radar) Zwischenfelderkundungen sowie die Grenzen und Anforderungen für die Anwendung dieser Spezialverfahren deutlich geworden. Bezogen auf die zu lösende Aufgabenstellung wurde deshalb für die Phase der Testmessungen das folgende Konzept vorgeschlagen und nachfolgend realisiert:



In dieser ersten Phase sollten die Grenzen der seismischen und elektromagnetischen Zwischenfelderkundung sowohl hinsichtlich der Machbarkeit der Messdurchführung unter den Bedingungen des Untersuchungsgebietes als auch hinsichtlich der erzielbaren Ergebnisse und der Auflösung im Rahmen von Test- und Eignungsmessungen geprüft werden. Diese Testmessungen sind vor allem deshalb wichtig, weil die Ausgangsbedingungen auch für die Anwendung der Bohrloch-Seismik auf Grund von zwei Bedingungen im Untersuchungsgebiet nicht ideal sind:

- ▶ Lage aller Messungen im wasserungesättigten Bereich. Dies kann die Nutzenergie stark dämpfen.
- ▶ sehr große Bohrlochabstände des Bohrregimes der ersten und zweiten Erkundungsphase (minimal ca. 30 m)

Die Testmessungen verfolgten damit das Ziel zu prüfen, ob eine seismische Zwischenfelderkundung unter diesen Randbedingungen physikalisch überhaupt möglich ist. Des Weiteren ist ein Nachweis von offenen Einzelhohlräumen einer minimalen Dimension von 1 m bei Bohrlochabständen von 30 m und mehr objektiv sowohl mit den Verfahren der Bohrloch-Radar-Technologie als auch mit seismischen tomographischen Messungen nicht möglich. Crosshole- und tomographische Messungen würden bei diesen großen Bohrlochabständen nur größere inhomogene Bereiche zwischen den Bohrungen (z. B. größere Kalksteinblöcke in der Durchstrahlungsebene zwischen den Bohrungen) auflösen und damit zwar zu einer weiteren Verdichtung der Kenntnisse aus der geophysikalischen Übersichtserkundung von der Oberfläche in Bezug auf tiefere Baugrundbereiche, nicht aber zum Nachweis und zur Ortung von Einzelhohlräumen beitragen.

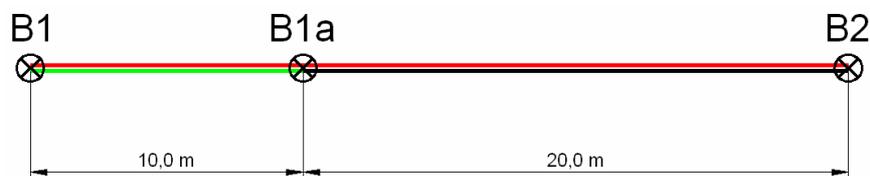
Wenn zusätzliche Aussagen zur Hohlraumfreiheit in der Durchstrahlungsebene gewonnen werden sollen, müssen die Bohrabstände in jedem Fall verringert werden. Um den Informationsinhalt seismischer und elektromagnetischer Zwischenfelderkundungen (Crosshole- und tomographische Messungen) unter den konkreten und sehr schwierigen Baugrundbedingungen im Bereich der Störungszone und den zu untersuchenden Dammaufstandsflächen zu bestimmen, wurde seitens der AN folgendes Testmessprogramm vorgeschlagen (s. a. Abb. 2\_1 – Seite 8):

- ▶ Auswahl einer Durchstrahlungsebene (Bohrlochpaar) durch den AG mit einem möglichst geringem Bohrlochabstand von ca. 30 m
- ▶ Teufen einer zusätzlichen Bohrung B1a zwischen den beiden bestehenden Bohrungen B1 und B2 im Verhältnis von ca. 1:3
- ▶ Durchführung von seismischen Messungen zwischen den Bohrungen 1 – 2, 1 – 1a und 1a – 2

Mit diesen Messkonfigurationen sollen nach Auswertung der Daten belastbare Aussagen zur Machbarkeit sowie zu den Ergebnissen und den Grenzen der Auflösung seismischer und elektromagnetischer Zwischenfelderkundungen im Hinblick auf die geforderten Aussagen getroffen werden. Erst wenn diese gesicherten Ergebnisse aus der Testmesskampagne vorliegen, kann das weitere Detailerkundungskonzept so festgelegt und optimiert werden, dass alle nachfolgenden Untersuchungen aussage- und kosteneffizient im Hinblick eines maximal



möglichen Erkenntnisgewinns aus den geophysikalischen Spezialmessungen geplant werden können. Dies erfordert gewiss eine weitere Verdichtung der in der ersten und zweiten Erkundungsphase geteufte Bohrungen. Es erscheint allerdings aus der Erfahrung der Bearbeitung ähnlich schwieriger Aufgabenstellungen realistisch, dass sich diese Verdichtung der Untersuchungen unter Einbeziehung der Kenntnisse aller Fachbereiche für dieses Bauvorhaben nur auf bestimmte Abschnitte konzentrieren kann, während andere Bereiche weniger dicht oder gar nicht weiter untersucht werden müssen. Um dies optimal festlegen zu können, sind gemeinsame Diskussionen und eine interdisziplinäre Auswertung des bisherigen Kenntnisstandes unter Einbeziehung der Ergebnisse der Test- und Kalibrierungsmessungen unbedingt erforderlich.



Crosshole-/Tomographieebenen

- B1 - B2
- B1 - B1a
- B1a - B2

Abb. 2\_1: Schematische Skizze der Lage der 3 Erkundungsbohrungen für das Testmessprogramm

### 3. Umfang und Durchführung der Messungen

Entsprechend des innerhalb des Leistungs- und Kostenangebotes vom 24.06.2011 vorgeschlagenen und mit dem AG abgestimmten Erkundungskonzeptes wurden im Vorfeld der Untersuchungen geeignete Bohrungen der ersten und zweiten Bohrerkundungsphase ausgewählt, in denen die Test- und Kalibriermessungen durchgeführt werden sollten. Da dieses Testmessprogramm zusätzlich zu dem Erkundungsbohrprogramm der zweiten Phase in die laufenden Untersuchungen integriert werden musste, orientierte sich die Auswahl der Bohrungen an den bereits bzgl. der Bohransatzpunkte festgelegten Bohrungen. Es wurden mehrere Bohrungen in die nähere Wahl einbezogen. Letztlich wurden für die Testmessungen die bereits geteufte Bohrungen BK 5/2011 (Bohrung der ersten Phase) und BK 32/2011 (Bohrung der zweiten Phase) ausgewählt. Da der horizontale Abstand dieser beiden Bohrungen mit ca. 44 m zu groß war, wurde die zusätzliche Zwischenbohrung BK 35/2011 im Abstand von 10 m zur Bohrung BK 32/2011 geteuft. In der Anlage 3\_1 sind diese Bohrungen in einem maßstäblichen Ausschnitt des Lageplanes (Ursprung: Fichtner GmbH & Co. KG, Stuttgart) für die geotechnischen Untersuchungen eingezeichnet.



---

Alle nachfolgend beschriebenen Messungen wurden im Zeitraum zwischen dem 02. und 04.08.2011 durchgeführt.

Die seismischen tomographischen Messungen wurden in den Bohrlochpaaren BK 5/2011 – BK 35/2011 sowie BK 35/2011 – BK 32/2011 realisiert. In Anlage 3\_1 sind die Messebenen eingezeichnet. Das ursprüngliche Ziel der Untersuchungen bestand darin, die beiden Messebenen zwischen den Bohrungen entlang der gesamten Bohrlochlängen tomographisch zu untersuchen. Die ungünstigen messtechnischen Voraussetzungen in den Bohrungen verhinderten die Umsetzung dieser Zielstellung. Die beiden Bestandsbohrungen BK 5/2011 und BK 32/2011 waren als 2<sup>te</sup> Grundwassermessstellen ausgebaut. Im unteren Bohrlochabschnitt erfolgte der Schutzausbau beider Bohrungen deshalb mehrere Meter als Filterstrecke (BK 5/2011: 5 m / BK 32/2011: 10 m). Da sich der Ruhegrundwasserspiegel (GWS) deutlich unterhalb des Niveaus der Endteufen der Bohrungen befand, lagen alle Bohrungen im wasserungesättigten Bereich, d. h. sie waren luftgefüllt. Bedingt durch die eingebauten Filterstrecken und durch die hohe Wasserwegsamkeit im verkarsteten Kalkstein war es (trotz umfangreicher Bemühungen) nicht möglich, die Bohrungen komplett mit Wasser aus einem externen Wassertank zu befüllen. Die Füllung mit Wasser als Grundlage für die notwendige Ankopplung der seismischen Quelle (Sparker) und der Empfänger (Hydrophone) ist aber die wesentliche Voraussetzung für die Durchführung von seismischen Messungen. Obwohl die dritte, zusätzliche Bohrung BK 35/2011 komplett mit HDPE-Vollrohr ausgebaut und auch unten verschlossen wurde, lief auch in dieser Bohrung das Wasser weg. Im Ergebnis dieser sehr unzureichenden Bedingungen für die Durchführung von seismischen Zwischenfeldmessungen konnten nur Messungen in den tieferen Niveaus der drei Bohrlöcher realisiert werden.

Zusätzlich zu diesen stark eingeschränkten Teufenmessbereichen muss darauf hingewiesen werden, dass die Qualität der aufgezeichneten seismischen Records u. a. infolge Unruhe durch die starken Wasserzuläufe beim Befüllen der Bohrungen (notwendig auch während der Messungen selbst infolge der starken Wasserverluste) sehr eingeschränkt war, was wiederum die Auswertung der Messdaten stark erschwerte. Im Kapitel 4 (Ergebnisdarstellung) soll darauf noch näher eingegangen werden.

Für das seismische Messprogramm wurde eine deutsche Seismikapparatur vom Typ SUMMIT der Fa. DMT Essen genutzt. Hersteller der Quelle (Sparker) und Empfängersonde (Hydrophonkette) war die deutsche Fa. *Geotomographie Neuwied*. Die Abbildungen 3\_1 bis 3\_4 zeigen das seismische Messsystem im Feldeinsatz. Die Abb. 3\_5 bis 3\_7 vermitteln einen Eindruck von den Einsatzbedingungen im Oberbecken des PSW Happurg.



**Abb. 3\_1:** Seismik Equipment (Überblick)



**Abb. 3\_2:** Hochspannungseinheit für Betrieb des Sparkers



**Abb. 3\_3:** Sparker (seismische Quelle)



**Abb. 4\_4:** Seismische Registriereinheit

**Abb. 3\_5:** Sparker in Bohrung BK 05/2011**Abb. 3\_6:** Wasserwagen zum Befüllen der Bohrungen**Abb. 3\_7:** Durchschallung zwischen BK 32/2011 und BK 35/2011

Da alle Bohrungen bis auf die Zwischenbohrung BK 35/2011 als 2“-Pegel ausgebaut waren, waren auch die Radarmessungen infolge des Sondendurchmessers von 40 mm bzw. 48 mm nur eingeschränkt bzw. gar nicht und mit einem relativ hohen Risiko des Verlustes der ca. 5 m langen Bohrloch-Radar-Messsonden durch Verklemmen derselben durchführbar. Trotz dieses Risikos wurde die Entscheidung zur Durchführung des folgenden Messprogramms, dass in Anlage 3\_1 ebenfalls graphisch dargestellt wurde, getroffen:

- ▶ Reflexionsmessungen in den Bohrungen BK 32/2011, BK 35/2011 und BK 2/2011
- ▶ Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011

Eine ursprünglich beabsichtigte Reflexionsmessung in der Bohrung BK 5/2011 wurde aus Sicherheitsgründen verworfen, weil sich bereits der Sparker mit einer relativ geringen Länge bei den seismischen Messungen mehrfach verklemmte. Aus diesem Grund wurde alternativ auf die Bohrung BK 2/2011 ausgewichen, die in den Bohrkernen zwei mehrere Meter lange



Kernstrecken im Kalkstein aufschließen konnte. Allerdings konnte auch diese Bohrung nicht bis zum erbohrten Ende vermessen werden, weil die Bohrung nur bis 22 m unter GOK ausgebaut und in dieser Teufe mit einer Bodenkappe verschlossen war.

Die Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011 konnte ebenfalls nicht vollständig durchgeführt werden, weil sich die Sendesonde in BK 32/2011 während der ausfahrenden Messung vom Bohrlochende zum Bohrlochmund in einer Teufe von ca. 15 m verklemmte. Nach umfangreichen Bemühungen konnte diese Sonde wieder gelöst werden. Die Messung wurde danach allerdings abgebrochen, um einen Verlust der Sonde zu vermeiden.

Die Tatsache, dass die Bohrungen nicht bzw. nur sehr eingeschränkt mit Wasser zu befüllen waren, spielte für den Einsatz der Bohrloch-Radar-Technologie keine Rolle. Bohrloch-Radar-Messungen sind uneingeschränkt sowohl in wassergefüllten als auch wasserfreien Bohrungen möglich, ohne dass dadurch die Messdaten negativ beeinflusst werden. Eine mechanische oder hydraulische Ankopplung der Messsonden an das Gestein als Voraussetzung einer guten Energieübertragung in das Gestein ist bei der elektromagnetischen Wellenausbreitung nicht erforderlich.

Mittels der Verfahren der Bohrloch-Radar-Technologie wurde der nachfolgend gelistete Messumfang in und zwischen den Bohrungen realisiert:

- ▶ Crosshole-Messung BK 32/2011 – BK 35/2011 →  $527,5 \text{ mNN} \leq z \leq 547 \text{ mNN m}$
- ▶ Reflexionsmessungen: BK 2/2011 →  $542 \text{ mNN} \leq z \leq 561 \text{ mNN /}$   
BK 32/2011 →  $528,5 \text{ mNN} \leq z \leq 559,5 \text{ mNN /}$   
BK 35/2011 →  $528,5 \text{ mNN} \leq z \leq 560,5 \text{ mNN}$

Die Bohrloch-Radarmessungen wurden mit Messsystemen der schwedischen Fa. *MALA Geo-Science* realisiert. Für die Messungen konnte allerdings nur das 100 MHz-Antennensystem eingesetzt werden. Die für diese Aufgabenstellung auf Grund der deutlich höheren Auflösung wesentlich besser geeigneten 250 MHz-Antennen konnten infolge des zu geringen Durchmessers der PVC-Schutzrohre (2“) bei einem Sondendurchmesser von 48 mm nicht eingesetzt werden. Die Abbildungen 3\_8 bis 3\_10 vermitteln einen visuellen Eindruck vom verwendeten Bohrloch-Radar-Messsystem.

Die Abbildungen 3\_8 und 3\_9 zeigen die für die Messungen verwendeten Bohrloch-Radar-Antennen einer Mittenfrequenz von 100 MHz. Die Abbildungen 3\_10 und 3\_11 vermitteln einen Eindruck von der Durchführung entsprechender Bohrloch-Radar-Reflexionsmessungen unter Verwendung einer Messwinde (Abb. 3\_10) und Crosshole- bzw. tomographischen Messungen (Abb. 3\_11), dokumentiert während der Messungen für ein anderes Erkundungsprojekt.



**Abb. 3\_8:** 22 MHz- (links) und 100 MHz- (rechts) Bohrloch-Radar-Antennensonden



**Abb. 3\_9:** 100 MHz-Bohrloch-Radar-Sonden in Reflexionskonfiguration



**Abb. 3\_10:** Bohrloch-Radar-Reflexionsmessung unter Nutzung einer Kabelwinde



**Abb. 3\_11:** Bohrloch-Radar-Messung im Cross-hole-Modus zwischen zwei Bohrungen (BK 2 und BK 3)

Zusätzlich zu dem vorab dargestellten Messumfang der seismischen und Bohrloch-Radarmessungen wurden in allen vier Bohrungen Bohrloch-Abweichungsmessungen zur exakten Bestimmung des Bohrloch-Verlaufes im Vollraum (Azimut und Neigung) durchgeführt. Die Kenntnis des Bohrlochverlaufes im Vollraum stellt eine wichtige Voraussetzung für die Auswertung der Crosshole-Messungen und tomographischen Aufnahmen dar, da die genaue



Lage der Sende- und Empfangspunkte und die daraus resultierenden Abstände zueinander in die Berechnung der Durchschallungsparameter „Geschwindigkeit“ und „Dämpfung“ eingehen. Für die Messungen wurde ein vollelektronisches Multishot-Messsystem der schwedischen Fa. *FLEXIT* eingesetzt.

#### **4. Ergebnisdarstellung**

##### **4.1 Seismische Tomographie**

Im Untersuchungsgebiet ist im interessierenden Teufenbereich kein durchgehender Grundwasserspiegel ausgebildet.

Für die Bohrlochseismik werden zur Energieerzeugung und zur Ankopplung der seismischen Empfänger (Hydrophone) wassergefüllte Bohrungen benötigt. Aufgelockertes Störungsmaterial und stark geklüftetes Gestein wirkt im trockenen Zustand sehr energiedämpfend. Auch die Hinterfüllung der verrohrten Bohrungen bildet im trockenen Untergrund nicht immer eine gute Verbindung zum umgebenden Gestein. Das Hauptproblem stellt deshalb die Energieabsorption dar. Da wegen dieser Besonderheiten nicht von vornherein der Erfolg seismischer Messungen zwischen Bohrungen zu garantieren ist, wurden Testmessungen ausgeführt.

Ziele der Tests waren:

- Bis zu welchem Bohrungsabstand kann noch hinreichend Nutzenergie registriert werden?
- Mit welcher Zeitgenauigkeit können die ersten Einsätze der P-Wellen bestimmt werden?
- Welchen Einfluss haben die petrophysikalischen Randbedingungen auf das Auflösungsvermögen der Tomographie und die dazu benötigte Messgeometrie?

Es wurden 2 Messebenen untersucht:

- ▶ Ebene 1 liegt zwischen den Bohrungen BK 05/2011 und BK 35/2011 (Entfernung 33,95 m).
- ▶ Ebene 2 liegt zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011 (Entfernung 9,91 m).

Die Bohrungen BK 5/2011 und BK 32/2011 waren nur als Sendebohrungen geeignet, da sie sehr schnell trocken fielen und ständig Wasser nachgefüllt werden musste. Die davon ausgelösten Störschwingungen sind sendeseitig nicht so beeinträchtigend wie Nachfüllstörungen in einer Empfangsbohrung. Deshalb war die nur für die Messungen abgeteufte Bohrung BK 35/2011 für beide Ebenen die Empfangsbohrung.

Diese Bohrung ist mit Vollrohren ausgebaut und mit einer Bodenkappe versehen. Leider waren die Verschraubungen offensichtlich nicht dicht. Deshalb verlor diese Bohrung ebenfalls





---

Die Testmessungen erbrachten folgende Ergebnisse:

Test 1 (Funktionstest des Messequipments)

Das Messsystem lief störungsfrei.

Test 2 am 03.08.2011 Messungen von BK 5/2011 zu BK 35/2011

Die Entfernung von 33,95 m zwischen den Bohrungen ist offensichtlich zu weit. Die Energiedämpfung ist so stark, dass keine verwertbaren Seismogramme mit qualitativ hinreichenden Nutzenergieanteilen gewonnen werden konnten. In Anlage 4.1\_1 ist das Seismogrammbeispiel 1 aufgenommen worden, um dies anschaulich zu belegen. Das Schwingungsbild zeigt für alle 24 Kanäle nur hochfrequente Störschwingungen. Die einzelnen Schwingungszüge wurden auf ein einheitliches durchschnittliches Amplitudenniveau normiert, um die Vergleichbarkeit zu verbessern. Außer allgemeinem Hintergrundrauschen treten offenbar nur Störungen durch abfließendes Wasser auf.

Das Seismogrammbeispiel 2 der Anlage 4.1\_1 ist ebenfalls bei den Messungen von BK 5/2011 zu BK 35/2011 kurze Zeit später entstanden. Es zeigt deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt die obersten Hydrophone (Kanäle 19 bis 24) bereits trocken liegen.

Die Bearbeitung aller 66 Seismogramme des Testes 2 (Verstärkung, Frequenzspektren, Filterung, Normierung, automatische Verstärkungskontrolle, Normierung) ergab vergleichbare Bilder ohne verwertbare Nutzinformation.

Test 3 am 04.08.2011 Messungen von BK 32/2011 zu BK 35/2011

Bei den Testmessungen in dieser Ebene wurden erst einige Seismogramme gewonnen, bei denen der Anregungspunkt sehr tief in BK 32/2011 lag. In beiden Bohrungen wurde während dessen kein Wasser nachgefüllt, um relativ ungestörte Aufzeichnungen zu gewinnen. Das Seismogrammbeispiel 3 der Anlage 4.1\_1 zeigt ein solches Seismogramm. Es hat eine für tomographische Auswertung noch hinreichende Qualität. Dies ist jedoch das beste Seismogramm der gesamten Testserie.

Da das Wasser in BK 32/2011 sehr schnell ablief, mussten die nachfolgenden Messungen bei ständigem Wasserzulauf erfolgen. Die Messungen endeten, als der zweite Wasserwagen leer war.

Der ständige Wasserzulauf (und –ablauf) störte die Messungen sehr. Die Seismogrammbeispiele 4 bis 6 (Anlage 4.1\_2) zeigen zur Geschwindigkeitsbestimmung gerade noch nutzbare Seismogramme.

Die Rohmessdaten wurden erheblich verstärkt und gefiltert, um die ersten Einsätze der Nutzwellen identifizieren zu können. Aus den Einsatzzeiten und den geradlinigen Laufwegen (Entfernungen zwischen Sendepunkt des Sparkers und dem jeweiligen Empfangshydrophon) wurden die Geschwindigkeiten der P-Wellen zwischen diesen Punkten bestimmt. Es handelt sich dabei um „Scheingeschwindigkeiten“, die in erster Näherung der Geschwindigkeit im Gestein entsprechen. Der exakte Laufweg (unter Berücksichtigung der Strahlenbrechung) und somit



die exakte Ausbreitungsgeschwindigkeit ist nur mit Hilfe tomographischer Auswertung bestimmbar. Dafür konnten aus oben genannten Gründen jedoch nicht genug Daten gewonnen werden. Deshalb sind nur diese geradlinig bestimmten Geschwindigkeiten zu einer Aussage über die Verhältnisse zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011 nutzbar.

In Anlage 4.1\_3 sind die so berechneten Geschwindigkeiten zwischen drei unterschiedlichen Anregungspunkten und den Empfängern in BK 35/2011 dargestellt. Aus geometrischen Gründen spiegeln die Geschwindigkeiten die Verhältnisse an der Empfangsbohrung BK 35/2011 stärker wider, als an der Sendebohrung BK 32/2011.

Generell ist das Geschwindigkeitsniveau sehr niedrig. Nur in Tiefen  $> 32$  m weisen sie auf relativ kompakten Kalkstein hin. Sie entsprechen auch den mit Refraktionsseismik in diesem Teufenbereich bestimmten Geschwindigkeiten. Von 32 m bis 24 m Tiefe nimmt die Entfestigung des Kalksteins stetig zu. Die zwischen 24 m und 10 m bestimmten Geschwindigkeiten sind sehr niedrig und relativ gleichförmig. Gering verdichtetes, extrem trockenes Lockergestein weist analoge Geschwindigkeitswerte auf.

Hinsichtlich der Testziele sind folgende Aussagen möglich:

- a) Unter den vorliegenden Verhältnissen (trockenes Störungsmaterial mit unregelmäßigen starken luftgefüllten Kluftscharen) können nur Bohrungen mit Abständen von maximal 10 m für seismische Tomographie genutzt werden.
- b) Voraussetzung ist jedoch, dass die Bohrungen unbedingt dicht ausgebaut sind und kein Wasserverlust auftritt. Nur dann kann die notwendige Seismogrammqualität und damit die Genauigkeit der Zeitbestimmung (erste Einsätze der Nutzwelle) für eine tomographische Auswertung gewährleistet werden.
- c) Eine Erhöhung der Quellenenergie durch Verwendung von Sprengzündern statt eines Sparkers ist nicht sinnvoll, da bei Beschädigung der Verrohrung ebenfalls wieder Wasserverlust eintritt und Zündersprengung wegen der Energieankopplung auch im Wasser stattfinden muss.
- d) Aus der Streuung der ermittelten Geschwindigkeitswerte lässt sich ableiten, dass Anregungspunktintervall und Hydrophonpunktintervall maximal 0,5 m betragen dürfen, um ein hohes Auflösungsvermögen zu erzielen.
- e) Die Tiefenlage der Grenze zum kompakten, ungestörten Kalkstein kann bei einem Bohrungsabstand von 10 m immer sicher bestimmt werden.

## 4.2 Bohrloch-Radar-Messungen

Die Ergebnisse der Bohrloch-Radar-Reflexionsmessungen sind in den Anlagen 4.2\_1 bis 4.2\_3 graphisch dargestellt. Die Anlagen enthalten in einheitlicher Darstellung im zentralen Bereich das bearbeitete Radargramm der Messung in Form eines Teufenschnittes. Die senk-



rechte Achse entspricht der Bohrlochtiefe. Die horizontale Achse widerspiegelt die Erkundungstiefe im Gestein / Sediment radial um die Bohrlochachse. Links neben dem Radarogramm wurde das Bohrprofil aus den Ergebnissen der Kernbemusterung (übernommen von der Fa. *Abt Wasser- und Umwelttechnik GmbH, Mindelheim*) sowie eine vereinfachte geologische Legende der aufgeschlossenen Schichten (rechts neben dem Radarogramm) eingefügt.

In den bearbeiteten Radarogrammen der Dipol-Reflexionsmessungen wurde der Ersteinsatz oder die direkte Welle rot markiert. Dieser Ersteinsatz entspricht der kürzesten Laufzeit des Radarsignals von der Sende- zur Empfangssonde durch das Gestein / Sediment unmittelbar an der Peripherie des Bohrloches. Des Weiteren wurden in den Radarogrammen der Messungen in den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011 einzelne Radar-Reflexionssignale (magenta markiert) eingezeichnet, die allerdings nicht sehr markant und damit nur als unsicher bewertet werden können. Im Radarogramm der Messung in Bohrung 2/2011 konnte eine solche Reflexionsstruktur nicht ausgegliedert werden.

Die Radar-Reflexionsmessungen lassen in Bezug auf die Aufgabenstellung und hinsichtlich der Einsatzbedingungen der Bohrloch-Radar-Technologie im Untersuchungsgebiet folgende Aussagen zu:

- a) Die maximalen Erkundungsreichweiten sind im Bereich der mit Karstsedimenten gefüllten Störungszone auf Grund des heterogenen Gesteinsaufbaus stark eingeschränkt und beschränken sich in der Regel auf wenige Meter radial um das Bohrloch. Die Ursache für diese begrenzte Erkundungstiefe resultiert in erster Linie aus dem erhöhten bindigen, elektrisch gut leitfähigen Anteil der Sedimente. Diese bindigen Sedimente führen zu einer starken Dämpfung der Radarwellen. Diese Aussage bestätigt somit die eingangs des Kapitels 2 getroffene Aussage, dass Geo-Radar-Messungen innerhalb der mit bindigen Karstsedimenten gefüllten Störungszone wenig zielführend und nur eingeschränkt einsetzbar sind. In diesen Abschnitten kommt es zu einer Totalabsorption der Radarwellenenergie derart, dass selbst die direkte Welle nicht mehr nachgewiesen werden kann. Reflexionen, die von Karststrukturen einschließlich Karsthohlräumen ausgehen, können hier nicht mehr geortet werden. Aus diesem Ergebnis der Totalabsorption der Radarwellenenergie kann abgeleitet werden, dass nicht nur im unmittelbaren Bohrloch selbst, sondern auch in der weiteren Bohrlochumgebung stark bindige Sedimente anstehen müssen. Solche Bereiche totaler Radarwellenenergiedämpfung wurden in den Radarogrammen der Anlagen 4.2\_1 und 4.2\_2 gelb schraffiert markiert.
- b) Trotz dieser vorab getroffenen Aussage zeigen die Radarogramme der Anlagen 4.2\_1 bis 4.2\_3 in einzelnen Teufenabschnitten, in denen lt. Bohrprotokoll bindige Karstfüllsedimente erbohrt wurden, Radarsignale und auch Reflexionsstrukturen im näheren Umfeld der Bohrung bis maximal ca. 5 m. Besonders deutlich ist das in den Radarogrammen der Bohrungen BK 2/2011 (Teufenbereich zwischen 543,5 mNN und 550,5 mNN) sowie BK 35/2011 (Teufenbereich zwischen 552 mNN und 559 mNN) ersichtlich. Diese Tatsache lässt den Schluss zu, dass zwar in der Bohrung bindige Karstfüllungen erbohrt wurden, jedoch im näheren und „weiteren“ Gesteinsumfeld der Bohrung bis zu der oben angegebenen Entfernung von mindestens 5 m der Anteil am Festgestein (Kalkstein) deutlich zunimmt. Damit besteht die Möglichkeit, über die maximal erzielbare Erkun-



dungstiefe um die Bohrlochachse eine quantitative Abschätzung des Verkarstungszustandes des Gebirges innerhalb der mit Karstsedimenten gefüllten Störungszone vorzunehmen.

- c) Innerhalb der Kernstrecken, die kompakten bzw. verkarsteten Kalkstein ausweisen, sind die Einsatzbedingungen für Radar-Reflexionsmessungen in der Regel am besten. Insbesondere in den Radargrammen der Bohrungen 32/2011 (Teufenbereiche zwischen 534 mNN und 545,5 mNN bzw. 528 mNN und 531,5 mNN) sowie 35/2011 (Teufenbereiche zwischen 532,5 mNN und 538 mNN bzw. 528,5 mNN bis 531 mNN) konnten mit dem 100 MHz-Antennensystem maximale Erkundungsreichweiten bis 10 m nachgewiesen werden. Diese Aussage korreliert wiederum mit den im Kapitel 2 getroffenen Prognosen und lässt den Schluss zu, dass in diesen Bohrlochabschnitten radial um das Bohrloch relativ kompakter, wenig verkarsteter Kalkstein anstehen muss. Die in Bohrung 35/2011 magenta markierte Reflexionsstruktur (Teufenbereich 532 mNN und 537 mNN) lässt auf Grund des Signalbildes (Diffraktionshyperbel) evtl. sogar den Schluss zu, dass es sich um einen Karsthohlraum handeln kann. Eine Aussage, ob dieser offen luftgefüllt oder mit bindigen Sedimenten verfüllt ist, kann allein aus den Reflexionsmessungen nicht abgeleitet werden.
- d) Es gibt allerdings innerhalb dieser Kernstrecken im Kalkstein einzelne Fenster, die anhand der Radarergebnisse den Schluss zulassen, dass der im Bohrloch als kompakt und wenig verkarstet angesprochene Kalkstein in der weiteren Umgebung zum Bohrloch deutlich stärker verkarstet anstehen muss. Zwei dieser Fenster liegen in den Teufenbereichen zwischen 531,5 mNN und 534 mNN (Bohrung BK 32/2011) bzw. zwischen 531 mNN und 533 mNN (Bohrung BK 35/2011). Durch diese Aussage aus den Geo-Radarmessungen wird die punktuelle Aussage der Bohrkernbemusterung in eine räumliche Aussage korrigiert, präzisiert und erweitert.
- e) Die Ergebnisse der Reflexionsmessungen in einzelnen Bohrlochabschnitten belegen anhand der erzielten Eindringtiefen, dass auch zwischen Bohrlochbereichen, in denen primär bindige Karstfüllungen aufgeschlossen wurden, sowohl partiell Durchstrahlungsmessungen als auch tomographische Untersuchungen möglich sind. In jedem Fall sind diese weitestgehend in den als Kalksteinkernstrecken ausgewiesenen Bohrlochabschnitten möglich, in denen die maximale Erkundungsreichweite der Bohrloch-Radarmessungen größer 5 m ist. Eine Durchstrahlung zwischen Bohrungen mit einem Abstand von ca. 10 m als Voraussetzung für den geophysikalischen Nachweis von offenen Karsthohlräumen ist hier sicher möglich.

Mit dieser Aussage kann unmittelbar auf die Ergebnisse der Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011 übergeleitet werden, die in Anlage 4.2\_4 graphisch dargestellt wurden. Die Anlage enthält im zentralen Bildteil das Durchstrahlungsrادargramm zwischen den beiden Bohrungen. Die senkrechte Achse markiert die Bohrlochtiefe. Auf der horizontalen Achse ist die Laufzeit des Radar-Durchstrahlungssignals in Nanosekunden aufgetragen. Rechts und links vom Radargramm ist wiederum das Bohrprofil dargestellt.



Bei Crosshole-Messungen wird die Laufzeit der direkten Welle, die von der Sendesonde durch das Gestein zur Empfängersonde läuft, als Funktion der Bohrlochtiefe aufgezeichnet. Im Radargramm der Anlage 4.2.\_4 ist diese direkte Welle rot markiert. Befinden sich in der Gesteinsebene zwischen Sender- und Empfängerbohrung offene, luftgefüllte Karsthohlräume, so führt das zu einer deutlichen Laufzeitverkürzung oder Geschwindigkeitserhöhung der Radarwellen. Um eine gesicherte Aussage zur Hohlraumfreiheit in der Durchstrahlungsebene treffen zu können, muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen im unverkarsteten Kalkstein entweder durch eine in situ – Messung in einem ungestörten Kalksteinsbereich oder durch Labormessungen an kompakten Kalksteinkernen bestimmt werden. Diese notwendige Kalibrierung wurde auf Grund der stark eingeschränkten Messbedingungen während der Testmessungen im Untersuchungsgebiet nicht durchgeführt, so dass aus den Ergebnissen der einzigen Crosshole-Messung eine quantitative Aussage zur Hohlraum- und Karstsituation zwischen den beiden Bohrungen zunächst nicht abgeleitet werden kann. Im Rahmen von evtl. weiterführenden Untersuchungen würde diese Kalibrierung selbstverständlich als Grundlage für die Interpretation von Crosshole-Messungen durchgeführt werden. Bestimmt wurde allerdings aus der durchgeführten Crosshole-Messung die mittlere Radarwellengeschwindigkeit in der durchstrahlten Ebene zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011. Sie liegt im Mittel bei 95 m/μs und repräsentiert in dem Teufenbereich zwischen 527,5 mNN und 537,5 mNN, in dem bis auf ein Fenster zwischen 532 mNN und 533,5 mNN auswertbare Durchstrahlungssignale gemessen werden konnten, einen relativ kompakten, wenig verkarsteten Kalkstein (Die aus der Literatur entnommene, laborativ bestimmte Radarwellengeschwindigkeit eines kompakten, unverkarsteten Kalksteins schwankt im Mittel zwischen 100 m/μs und 115 m/μs.) Diese aus der Crosshole-Messung bestimmte in situ-Radarwellengeschwindigkeit wurde auch für die Teufenberechnung der Reflexionsmessungen in den Radargrammen der drei Bohrungen BK 2/2011, BK 32/2011 und BK 35/2011 zugrunde gelegt (s. Anlagen 4.2\_1 bis 4.2\_3).

In jedem Fall lassen die Ergebnisse der Crosshole-Messung die Aussage zu, dass Durchstrahlungsmessungen zwischen Bohrungen mit einem Abstand von ca. 10 m in den Kalksteinbereichen möglich und auch sinnvoll sind. Das Durchstrahlungsradargramm zeigt insbesondere in den Teufenbereichen zwischen 527,5 mNN und 532 mNN sowie 533,5 mNN und 537,5 mNN, in denen in beiden Bohrungen kompakter Kalkstein aufgeschlossen wurde, markante und sicher auswertbare Ersteinsätze der Radarsignale.

Dazwischen liegt allerdings eine Zone im Teufenbereich zwischen 532 mNN und 533,5 mNN, in dem das Radarsignal vollständig zusammenbricht und ein Ersteinsatz nicht mehr registriert werden konnte. In beiden Bohrungen wurde allerdings kompakter, unverwitterter Kalkstein erbohrt. Aus dem Radarergebnis der Crosshole-Messung kann somit sicher abgeleitet werden, dass sich zwischen beiden Bohrungen eine markante Karststruktur bzw. ein Karsthohlraum befinden muss. Da der Ersteinsatz des Radarsignals infolge der starken Dämpfung der Radarwellen nicht mehr aufgezeichnet werden konnte, kann mit hoher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass ein evtl. Karsthohlraum nicht mehr offen, sondern mit bindigen Karstsedimenten verfüllt sein muss. Dieses Beispiel der Testmessung belegt somit sehr deutlich, dass mit Crosshole- und tomographischen Bohrloch-Radar-Messungen Aussagen zur Existenz von offenen oder verfüllten Karsthohlräumen in den Durchstrahlungsebenen zwischen Bohrungen, die innerhalb des Kalksteins verlaufen, sicher möglich sind.



Diese Aussage kann nicht unmittelbar auf Bereiche extrapoliert werden, die innerhalb der mit Karstsedimenten verfüllten Störungszone verlaufen. In der Regel wird in diesen Bereichen eine Durchstrahlung auf Grund der sehr hohen Dämpfung der Radarwellen nicht mehr möglich sein. Damit ist auch keine Aussage zu evtl. existierenden Hohlräumen in diesen Durchstrahlungsebenen möglich. Alternativ können allerdings seismische tomographische Messungen diese für das Geo-Radar ungeeigneten Bereiche recht gut kompensieren.

Zusammenfassend zu den Ergebnissen der Bohrloch-Radar-Testmessungen kann die abgesicherte Aussage getroffen werden, dass diese Technologie zumindest partiell und ergänzend zu seismischen tomographischen Messungen auch im Bereich der Störungszone angewendet werden kann und sich vor allem auf die Kernstrecken konzentrieren sollte, in denen während des Bohrprozesses Kalkstein aufgeschlossen wurde. Obwohl der Einsatz der Bohrloch-Radar-Technologie innerhalb der Störungszone nur eingeschränkt möglich ist, muss er anhand der Ergebnisse der Testmessungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Der sinnvolle Einsatz innerhalb der Störungszone im Kreuzungsbereich der Dammaufstandsflächen ist im weiteren Verlauf zwischen AG und AN zu besprechen und abzustimmen.

In jedem Fall ist die Bohrloch-Radar-Technologie für die Hohlraum- und Karsterkundung im kompakten und verkarsteten Kalkstein außerhalb der Störungszone ideal zur Ortung von Karststrukturen und Karsthohlräumen einsetzbar. Durch die Nutzung des höherfrequenten 250 MHz-Antennensystems kann die Auflösung der Karststrukturen im Vergleich zu dem während der Testmessungen verwendeten 100 MHz-Antennensystem deutlich verbessert werden. Der Einsatz der 250 MHz-Antenne (Durchmesser 48 mm) war infolge des 2“-Schutzrohrbaus der Bohrungen während der Testmesskampagne nicht möglich. Die Leistungsfähigkeit des Einsatzes der Bohrloch-Radar-Technologie für die Karst- und Hohlraumerkundung soll anhand von ausgewählten Referenzbeispielen, die im Kapitel 5.2 beschrieben werden, weiterführend erläutert werden.

## **5. Referenzbeispiele**

Im Kapitel 3 dieses Zwischenberichtes wurde ausführlich auf die sehr ungünstigen bzw. sogar begrenzenden messtechnischen Bedingungen während der Test- und Kalibrierphase in Bezug auf den Einsatz der modernen Verfahren der geophysikalischen Zwischenfelderkundung eingegangen. Insbesondere die im Kapitel 4.1 dargestellten Ergebnisse der seismischen tomographischen Messungen zeigen die Grenzen der Verfahren auf, wenn die messtechnischen Bedingungen eine qualitativ gute Datenregistrierung nicht erlauben. Da infolge der ungünstigen messtechnischen Voraussetzungen die Leistungsfähigkeit der im Erkundungskonzept beschriebenen Verfahren der geophysikalischen Zwischenfelderkundung insbesondere für die seismische Tomographie im Rahmen der Testmessungen nicht aufgezeigt werden konnte, sollen in Abstimmung mit dem AG in den nachfolgenden beiden Unterkapiteln 5.1 und 5.2 die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten dieser geophysikalischen Bohrloch-Messverfahren, für deren Einsatz es unter den schwierigen Baugrundbedingungen des Oberbeckens des PSW Happurg keine Alternative gibt, anhand von ausgewählten Referenzbeispielen überzeugend aufgezeigt werden. Die AN haben sehr weitreichende, langjährige Erfahrungen und umfangreiche Referenzen beim Einsatz dieser geophysikalischen Spezialverfahren im

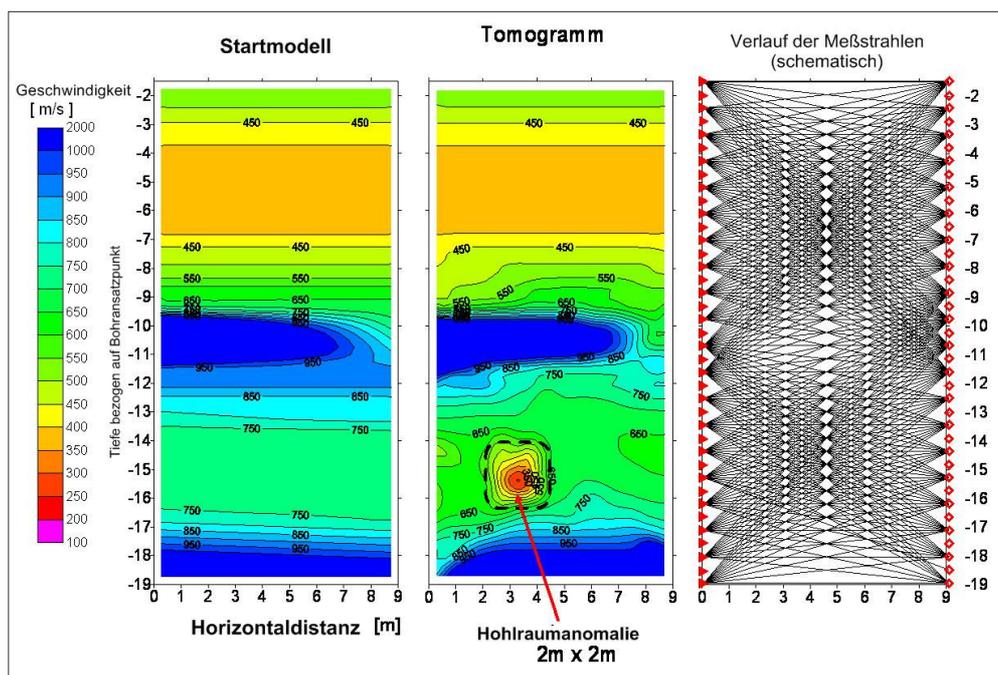


Tunnel-, Berg- und Ingenieurbau sowie für die Lösung von speziellen Aufgabenstellungen in anderen Praxisbereichen. Diese Erfahrungen incl. weiterer Referenzen können, sollen und werden in die gemeinsame Beratung zwischen AG und AN zu den Möglichkeiten der geophysikalischen Detailerkundung und der Weiterführung der Untersuchungen bei der Sanierung des Oberbeckens des PSW Happurg einfließen.

## 5.1 Seismik

Für total trockenen Untergrund sind kaum Beispiele bekannt. Das in der Verfahrensbeschreibung zur seismischen Tomographie angeführte Beispiel zur Ortung eines Hohlraumes im Braunkohlentiefbau kommt vom Geschwindigkeitsniveau und der Aufgabenstellung der vorliegenden Aufgabe recht nah. Dieses Objekt ist vom Verfasser (K. Lorenz) gemessen und ausgewertet worden.

Da der Hohlraum ein Entwässerungsstollen war ist, war auch hier kein Grundwasser vorhanden. Es wurde in wassergefüllten Bohrungen gearbeitet.



**Abb. 5\_1:** Beispiel für den tomographischen Nachweis eines Hohlraumes (Entwässerungsstollen für den Braunkohlentiefbau) bei guten petrophysikalischen Kontrasten und günstigen geometrischen Verhältnissen

Ziel der seismischen Tomographie war hier nicht nur die Hohlraumortung, sondern auch der Nachweis des Verschlusses des Hohlraumes nach Injektion von Verfüllungsmaterial. Beide Nachweise sind gelungen. Der Erkundungsbohrabstand war gering (9 m). Die Tomographie wurde notwendig, weil die markscheiderischen Rissunterlagen verloren gegangen oder ungenau waren und es deshalb zu zahlreichen Fehlbohrungen kam.



## 5.2 Geo-Radar

Für die Bohrloch-Radar-Technologie wurde ein Referenzbeispiel einer Baugrunderkundung für ein neues Brückenbauwerk, dass in jüngster Vergangenheit komplett durch die Fa. *Bo-Ra-tec* gemessen, ausgewertet und interpretiert wurde, ausgewählt. Dieses Referenzbeispiel veranschaulicht in einer sehr geschlossenen Weise die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit des Einsatzes der Bohrloch-Radar-Technologie zur Karst-, Hohlraum- und Störungserkundung anhand des Vergleiches der mit den unterschiedlichen Messkonfigurationen (Reflexions-, Crosshole- und tomographische Messungen) erzielbaren Ergebnisse und Auflösungen. Zur Veranschaulichung sollen die Anlagen 5.2\_1 bis 5.2\_5 dienen, auf die in der nachfolgenden Erläuterung Bezug genommen werden soll. ■

Wie bereits im einleitenden Kapitel 2 erläutert, kann die Bohrloch-Radar-Technologie sowohl in Form von Radar-Reflexionsmessungen aus einem Bohrloch als auch von Crosshole- und/oder tomographischen Messungen zwischen zwei Bohrungen eingesetzt werden. In Bezug auf die verfahrenstechnischen Details sei auf die im Anhang 1 zu dem Zwischenbericht beigefügte technische Verfahrenskurzbeschreibung der Radar- und Bohrloch-Radar-Technologie verwiesen.

Dipol-Radar-Reflexionsmessungen in einem Bohrloch ermöglichen die Erkundung geologischer Strukturen im Vollraum um eine Bohrung bis zu der maximal möglichen Erkundungstiefe, die von den gesteinsphysikalischen Bedingungen des bohrlochumgebenden Gesteins oder Sediments abhängt. Im kompakten Kalkstein können in der Regel Erkundungreichweiten von mehreren Dekametern und unter günstigen Bedingungen sogar weit darüber hinaus erzielt werden. In der Anlage 5.2\_1 ist das Ergebnis einer Bohrloch-Radar-Reflexionsmessung für das oben erläuterte Referenzobjekt dargestellt. Die Anlage enthält im oberen Teil die bearbeiteten Reflexionsradargramme der Messung in der Bohrung 18 mit dem 100 MHz- (links) und 250 MHz-Antennensystem (rechts). Im unteren Teil der Anlage sind beide Radargramme noch einmal dargestellt. Allerdings wurden markante Reflexionsstrukturen rot markiert. Die vertikalen Achsen kennzeichnen die Bohrlochtiefe in m NHN, die horizontalen Achsen die Doppellaufzeit der Radarwellen sowie die für eine Radarwellengeschwindigkeit von 85,2 m/μs (in situ aus den tomographischen Messungen bestimmt) resultierende radiale Entfernung der Radarstrukturen um die Bohrlochachse.

Diese beiden Reflexionsradargramme zeigen in sehr klarer Weise so genannte Radarreflexionen, die durch Reflexionen an diversen Strukturen im Gestein verursacht werden. Die maximalen Erkundungstiefen betragen im vorliegenden Beispiel ca. 15 m mit dem 100 MHz- und ca. 10 m mit dem 250 MHz-Antennensystem. In Karstgesteinen handelt es sich bei den georteten Strukturen im Wesentlichen um Reflexionen an Karstklüften und Karsthohlräumen. Die lateral lang aushaltenden Reflexionen (rote Markierung) werden in der Regel von Klüften im Kalkstein verursacht. Bei Diffraktionsstrukturen, in der Anlage magenta markiert, bzw. bei diffusen Reflexionsbildern ist die Wahrscheinlichkeit der Zuordnung zu einem Karsthohlraum

■ Die Verwendung und Nutzung des Geo-Radar-Referenzbeispiels einschließlich der graphischen Darstellungen der Ergebnisse in den Anlagen 5.2\_1 bis 5.2\_5 ist nur für den internen Gebrauch und im Rahmen der Bearbeitung des BV „Sanierung Oberbecken PSW Happurg“ gestattet. Jegliche Weitergabe, Vervielfältigung und Veröffentlichung ohne Einverständnis des AN ist untersagt.



deutlich höher. Da es sich bei den Bohrloch-Radar-Reflexionsmessungen um ungerichtete Messungen im Vollraum handelt, kann aus einem Radargramm keine azimutale Richtungs- und Ordnung der im Radargramm georteten Karststruktur erfolgen. Durch die Vermessung von mehreren Bohrungen (mindestens drei) ist über eine Komplexauswertung aller drei Reflexionsmessungen über ein geometrisches Ortungsverfahren eine Richtungs- und Ordnung nachgewiesener Strukturelemente möglich.

Bei Radar- als auch seismischen Reflexionsmessungen handelt es sich um ein Grenzflächenverfahren. Eine Reflexion an einer geologischen Schichtgrenze oder auch anthropogenen Struktur tritt dann auf, wenn ein Kontrast der gesteinsphysikalischen Parameter an der Grenzfläche existiert. Reflexionsmessungen können deshalb in der Regel keine Aussage zur Größe und Dimension eines Karsthohlraumes, sondern nur zu dessen Existenz geben. Aussagen über Dimensionen von Karststrukturen können nur über Zwischenfeldmessungen in Form von Crosshole- und/oder tomographischen Messungen gewonnen werden.

Die Anlagen 5.2\_2 und 5.2\_3 zeigen im rechten Anlagenteil zwei ausgewählte Ergebnisse von Crosshole-Messungen. Dargestellt sind die Kurven der Radarwellengeschwindigkeit in  $\text{m}/\mu\text{s}$  und der Radarwellendämpfung in  $\text{dB}/\text{m}$ . Aus dem Kurvenverlauf ist deutlich zu erkennen, dass das durchstrahlte Zwischenfeld des Karstgebirges dieses Baugrundes heterogen aufgebaut ist. Im Kapitel 4.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass Crosshole-Messungen kalibriert werden müssen, wenn quantitative Aussagen zum Verkarstungsgrad und zur Hohlräumssituation des durchstrahlten Zwischenfeldes abgeleitet werden sollen. Dies ist selbstverständlich im erläuterten Referenzprojekt im Vorfeld der Messungen erfolgt. Der in den beiden Anlagen eingezeichnete grün schraffierte Bereich kennzeichnet die Schwankungsbreite der Radarwellengeschwindigkeit des kompakten, unverwitterten und unverkarsteten Kalksteins aus dem Untersuchungsgebiet, der zwischen  $96 \text{ m}/\mu\text{s}$  und  $106 \text{ m}/\mu\text{s}$  schwankt. Bestimmt wurden diese Geschwindigkeiten im Labor an mehreren ausgewählten Kalksteinkernen des Untersuchungsgebietes über die Bestimmung der komplexen dielektrischen Eigenschaften mittels eines Netzwerkanalysators. Der rot schraffierte Bereich kennzeichnet die gemittelte Schwankungsbreite der realen Radarwellengeschwindigkeiten, bestimmt aus allen durchgeführten Crosshole-Messungen im Bereich des Baugrundes des Brückenwiderlagers. Diese realen Geschwindigkeiten des gemittelten Schwankungsbereiches, die zwischen  $74,9 \text{ m}/\mu\text{s}$  und  $82,1 \text{ m}/\mu\text{s}$  liegen, bewegen sich deutlich unter denen eines kompakten, unverkarsteten Kalksteins. Sie verdeutlichen, dass das Karstgebirge im Untersuchungsgebiet als deutlich verkarstet angesprochen werden muss. Anhand der Messkurven wird deutlich, dass die Radarwellengeschwindigkeiten in Teilbereichen noch deutlich unterhalb der unteren Grenze dieses gemittelten Schwankungsbereiches liegen. Radarwellengeschwindigkeiten kleiner  $70 \text{ m}/\mu\text{s}$  weisen in der Regel auf offene, wassergefüllte Karsthohlräume hin. Im wasserungesättigten Bereich steigen die Radarwellengeschwindigkeiten bei Existenz von offenen Karsthohlräumen auf Grund der höheren Geschwindigkeit der Radarwellen in Luft (Lichtgeschwindigkeit:  $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ) auf deutlich über  $100 \text{ m}/\mu\text{s}$  an.

Durch die zusätzliche Einbeziehung des zweiten Messparameters, der Amplitude bzw. der daraus berechenbaren Radarwellendämpfung, können relativ gesicherte Aussagen zum Verfüllungszustand einer Karststruktur getroffen werden. Aus der gemeinsamen Auswertung beider Parameter kann die Aussage abgeleitet werden, ob ein nachgewiesener Karsthohlraum



offen luftgefüllt (hohe Geschwindigkeit / geringe Dämpfung), offen wassergefüllt (geringe Geschwindigkeit / geringe Dämpfung) oder verfüllt mit bindigen Karstfüllsedimenten (geringe Geschwindigkeit / hohe Dämpfung) vorliegt.

Aus den Crosshole-Berechnungskurven der Radarwellengeschwindigkeit und der Radarwellendämpfung können somit relativ sichere Aussagen zum Verkarstungsgrad und zur Teufe der Karststruktur im durchstrahlten Zwischenfeld abgeleitet werden. Es ist allerdings nicht möglich, Aussagen zu den Dimensionen eines Karsthohlraumes und zu dessen Lage im durchstrahlten Zwischenfeld relativ zu den Bohrungen zu geben. Diese Aussage ist nur über eine tomographische Vermessung der Ebene zwischen zwei Bohrungen möglich.

Die Anlage 5.2\_4 zeigt das Ergebnis der vier tomographischen Aufnahmen des Baugrundes des künftigen Widerlagers der Brücke. Deutlich zu erkennen sind Zonen mit hohen Radarwellengeschwindigkeiten (blau koloriert) und Zonen mit niedrigen Radarwellengeschwindigkeiten (rot koloriert). Die Zonen niedriger Radarwellengeschwindigkeiten korrelieren in Bohrlochnähe im Wesentlichen mit aufgelockerten Bereichen oder aufgeschlossenen Hohlräumen, die während des Teufens der Bohrungen festgestellt wurden. Diese anomalen Zonen zeigen in den Einzeltomographien der aneinander angrenzenden Messungen eine sehr gute Übereinstimmung, was die Stabilität und Datensicherheit dieser Messungen belegt. Das Beispiel zeigt des Weiteren sehr deutlich, dass die aus den tomographischen Messungen gewonnenen räumlichen Aussagen zur Verkarstungssituation des Baugrundes wesentlich umfassender sind als die punktuell-lineare Aussage aus den fünf Bohrungen. Im Vergleich zu den Kurven der Crosshole-Messungen sind in den Tomogrammen die Dimensionen und die Lage der als zweidimensional anzunehmenden Karststrukturen einer Tomographieebene deutlich abschätzbar und sichtbar. Dies ermöglicht unter Einbeziehung der Laufzeit- und Amplitudenwerte bzw. der daraus berechneten Geschwindigkeits- und Dämpfungswerte aus den Crosshole-Messungen eine Abschätzung des Hohlraumanteiles in der Schnittebene zwischen den jeweiligen Bohrungspaaren. In der Anlage 5.2\_5 ist diese Hohlraumabschätzung für den Widerlagerbereich der Brücke in der Achse der durchgeführten tomographischen Messungen graphisch und tabellarisch dargestellt. In diese Berechnung gingen alle markanten Anomalien der Radarwellengeschwindigkeiten (Nr. 1 bis 12) ein.

Abschließend soll auf einen weiteren Unterschied der aus Crosshole- und tomographischen Messungen zu gewinnenden Aussagen hingewiesen werden. Diese Erläuterung bezieht noch einmal die Anlagen 5.2\_2 und 5.2\_3 ein. Die negative Radarwellengeschwindigkeitsanomalie in der Crosshole-Messung zwischen 374 m NHN und 377 m NHN spiegelt sich exakt im links neben der Messkurve abgebildeten Tomogramm als Flächenellipse niedriger Radarwellengeschwindigkeit wider (Anlage 5.2\_2). In ungünstiger Konstellation kann eine Verkarstungszone oder ein Karsthohlraum durch eine alleinige Crosshole-Messung aber ggf. nicht aufgelöst werden. Ein Beispiel zeigt die Anlage 5.2\_3. Im Teufenbereich zwischen ca. 372 m NHN und 380 m NHN ist im Tomogramm eine sehr markante Karststruktur extrem niedriger Radarwellengeschwindigkeit zu erkennen, die zwischen 372 m NHN und 377 m NHN nahe der Bohrung B 13 und im oberen Abschnitt weiter in Richtung Bohrung B 13 verläuft. Im gleichen Teufenbereich (373 m NHN bis 377 m NHN) wurde nahe der Bohrung B 12 eine Zone kompakten, unverwitterten Kalksteins mit hohen Radarwellengeschwindigkeiten nachgewiesen. In der neben dem Tomogramm abgebildeten Geschwindigkeitsmesskurve bewegt sich die Ra-



darwellengeschwindigkeit aber nur innerhalb der gemittelten Schwankungsbreite der Geschwindigkeiten aller Crosshole-Messungen. Dieses Beispiel zeigt, dass die im Tomogramm nachgewiesene Karststruktur nahe der Bohrung B 13 durch eine alleinige Crosshole-Messung nicht aufgelöst werden kann, weil sich die niedrigen Radarwellengeschwindigkeiten innerhalb der Karststruktur nahe der Bohrung B 13 mit den sehr hohen Geschwindigkeiten im unverkarsteten Kalkstein nahe der Bohrung B 12 gegenseitig zu einer resultierenden mittleren Geschwindigkeit kompensieren. Diese Situation stellt allerdings einen Sonderfall dar. In der Regel ist es ausreichend, sinnvoll und auch aus Kostengründen effizient, wenn der zu untersuchende Baugrund zunächst mittels „einfachen“ Crosshole-Untersuchungen vermessen wird. Nur in den Bereichen, wo anhand der Crosshole-Messungen markante Anomalien auf große Karststrukturen oder Karsthohlräume hindeuten, sollten zur Eingrenzung und Abschätzung derselben verdichtende tomographische Messungen durchgeführt werden. Insofern stellt das vorgestellte Referenzbeispiel eine Baugrundsituation extrem starker Verkarstung dar, an der die Einsatzmöglichkeiten und Leistungsfähigkeit der Verfahren der Bohrloch-Radar-Technologie allerdings zusammenhängend und komplex ideal erläutert werden können.

Zu Beginn des Kapitels 2 wurde mit Verweis auf eine evtl. zusätzliche Vermessung des oberflächennahen Baugrundes des Oberbeckens außerhalb der Störungszone mit dem Ziel des Nachweises von oberflächennahen Karsthohlräumen bis zu einer Teufe von ca. 10 m unter GOK auf den möglichen Einsatz von weiteren Oberflächenmessverfahren verwiesen. Diese Möglichkeit soll hier noch einmal näher erläutert werden.

Für die Oberflächenverfahren Geoelektrik und Gravimetrie (Potentialverfahren) ist ein gesicherter Nachweis eines Hohlraumes nur dann möglich, wenn das Verhältnis der Teufenlage zum Durchmesser des Hohlraumes 3 : 1 im Mittel nicht übersteigt. Die Auflösung im Hinblick auf eine sichere Ortung von Einzelhohlräumen nimmt mit zunehmender Teufenlage derselben deutlich ab.

Für die beiden Wellenverfahren Seismik und Radar ist die Teufenlage an sich nicht so kritisch. Die Auflösung wird bei diesen Verfahren maßgeblich von den Frequenzen der nutzbaren elastischen bzw. elektromagnetischen Wellen bestimmt. Die für eine hohe Auflösung notwendige Einkopplung hochfrequenter elastischer Wellen ist nur dann gewährleistet, wenn direkt auf dem Kalkstein angeregt werden kann. Schon bei relativ geringer Lockergesteinsbedeckung ist die Eindringtiefe hochfrequenter elastischer Wellen infolge ihrer starken Dämpfung in der Schicht der Lockergesteinsbedeckung begrenzt.

Den Einsatz der Geo-Radar-Technologie von der Oberfläche in Bezug auf die Erzielung der erforderlichen Erkundungsreichweite limitieren nur bindige Bedeckungen über dem Kalkstein selbst. Selbst eine geringmächtige bindige und damit elektrisch gut leitfähige Deckschicht im Meterbereich kann den Einsatz der Geo-Radar-Technologie von der Oberfläche unmöglich machen, obwohl der im Liegenden anstehende Kalkstein optimale Ausbreitungsbedingungen der Radarwellen und Erkundungsreichweiten im Dekameterbereich ermöglichen würde. Optimale Bedingungen würden für das sehr schnell und flächenhaft messende Radarverfahren dann gegeben sein, wenn die bindige Basisabdeckung des Oberbeckens zumindest entlang der zu vermessenden Profile vor den Messungen beseitigt wird.



Eine gesicherte Aussage zur Hohlraumfreiheit des oberflächennahen Baugrundes unterhalb der Beckensohlenbasisabdichtung außerhalb der Störungszone mittels geophysikalischer Oberflächenmessungen erfordert in jedem Fall eine flächenhafte Erkundung auf Längs- und Querprofilen mit geringen Messprofilabständen und hoch auflösende, auf das jeweils einzusetzende Prospektionsverfahren zugeschnittene Messkonfigurationen:

- ▶ Geo-Radar: optimale Antennenfrequenz im höherfrequenten Bereich;
- ▶ Seismik: geringe Aufstellungsweiten der Geophon- und Anregungspunkte  $\leq 1$  m;
- ▶ Geoelektrik: Schlumberger-Konfiguration mit Elektroden-spacing zwischen 1 m und 2 m;
- ▶ Gravimetrie: geringer Messpunktstand zwischen 1 m und 2 m.

## **6. Zusammenfassung, Ausblick und Weiterführung der Untersuchungen**

Das gemeinsam mit dem AG abgestimmte Testmessprogramm zur Kalibrierung der geophysikalischen Spezialverfahren zur Erkundung des Verkarstungszustandes des Baugrundes im Einflussbereich des Oberbeckens des PSW Happurg über seismische und elektromagnetische Zwischenfeldmessungen konnte zwar inhaltsmäßig realisiert werden, allerdings erlauben die Ergebnisse keine umfassenden Aussagen zu den Grenzen der Verfahren unter den schwierigen Baugrundverhältnissen im Untersuchungsgebiet. Der Grund dieser einschränkenden Aussage resultiert aus den extrem ungünstigen messtechnischen Voraussetzungen für die Anwendung der modernen Bohrloch-Messverfahren. Insbesondere die seismischen tomographischen Messungen konnten nur stark eingeschränkt durchgeführt werden, weil die grundlegende Voraussetzung für die Anwendung dieser Technologie nicht sichergestellt werden konnte. In den für die Messungen ausgewählten Bohrungen war eine Befüllung mit Wasser nicht oder nur ganz beschränkt möglich. Durch die fehlende Ankopplung der seismischen Quelle und der Empfänger (Hydrophone) an das Gestein konnte die notwendige seismische Energie nicht in das Gestein abgestrahlt bzw. von den Hydrophonen empfangen werden, so dass die Datenqualität für eine komplette tomographische Vermessung der während der Testmessungen geplanten Tomographieebenen nicht sichergestellt werden konnte.

Ergänzend zu den seismischen tomographischen Messungen wurden allerdings zusätzlich Bohrloch-Radar-Messungen in drei (Reflexionsmessungen) und zwischen zwei Bohrungen (Crosshole-Messung) durchgeführt, mit denen zusätzliche Erkenntnisse zum Einsatz dieser Technologie für die Lösung der Aufgabenstellung gewonnen werden konnten. Allerdings waren die Voraussetzungen für den Einsatz der Bohrloch-Radar-Technologie auch nicht optimale, da die Bohrungen als 2“-Grundwasserpegel ausgebaut waren und Messungen mit dem höher auflösenden 250 MHz-Antennensystem (Sondendurchmesser: 48 mm) objektiv nicht möglich waren.

Trotz dieser stark einschränkenden Bedingungen für die Anwendung der hoch auflösenden Spezialverfahren der Bohrlochgeophysik konnten anhand der Ergebnisauswertung einige grundlegende Erkenntnisse zum erfolgreichen Einsatz dieser Technologien unter den schwierigen Baugrundbedingungen des Untersuchungsgebietes gewonnen werden. Das Fazit dieser Messungen und der während der Messung und Auswertung/Interpretation gesammelten Er-



kenntnisse und Erfahrungen stützt die gesicherte Aussage, dass die angewendeten geophysikalischen Spezialverfahren auch unter den extrem schwierigen geologisch-hydrologischen Bedingungen erfolgreich zur Lösung der im Kapitel 1 fixierten Aufgabenstellung eingesetzt werden können. Insbesondere die im Kapitel 5 vorgestellten und erläuterten Referenzbeispiele des Einsatzes der seismischen Tomographie und der Verfahren der Bohrloch-Radar-Technologie unter vergleichbaren Bedingungen verdeutlichen die Leistungsfähigkeit dieser geophysikalischen Spezialverfahren für Aufgabenstellungen der Karst-, Hohlraum- und Störungserkundung. Eine entscheidende Forderung besteht allerdings darin, dass die messtechnischen Voraussetzungen für eine sichere Anwendung dieser Technologien geschaffen werden.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist es für die AN auf Grund der fehlenden fachlichen Kenntnisse und Zusammenhänge zum Projekt nicht möglich, den Umfang und den Fokus der geotechnisch notwendigen Erkundungsarbeiten richtig einzuschätzen. Aus diesem Grund können zwar allgemeine Aussagen zu den Möglichkeiten des Einsatzes der während der Test- und Kalibrierungsmessungen verwendeten geophysikalischen Bohrloch-Messverfahren gegeben werden. Eine Korrelation zur Lösung der geotechnisch relevanten Aufgabenstellungen unter Einbeziehung der geophysikalischen Verfahren ist nur über eine gemeinsame, interdisziplinäre Diskussion unter Einbeziehung des kompletten, gegenwärtigen Kenntnisstandes zum Sanierungsprojekt möglich. Diese Diskussion sollte sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- a) Darlegung und Diskussion des zwingend erforderlichen Erkundungsbedarfs zur Gewährleistung einer sicheren Wiederaufnahme des Betriebs des PSW aus geotechnischer Sichtweise;
- b) Kenntnissgabe der bisherigen Ergebnisse der bohrtechnischen Erkundung sowie der Ergebnisse des geotechnischen Messprogramms innerhalb der ersten und zweiten Phase;
- c) Vorstellung des zeitlichen Rahmenplanes für die Sanierung des Oberbeckens als Grundlage für die Terminierung geophysikalischer Erkundungsarbeiten;
- d) Darlegung und Erläuterung der zwingend erforderlichen messtechnischen Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz der geophysikalischen Verfahren der Zwischenfeldererkundung sowie evtl. Oberflächenmessverfahren, um die vom AG geforderte Erkundungszielstellung erreichen zu können;
- e) Detaillierte Diskussion und Bewertung der Ergebnisse der geophysikalischen Erkundung von der Oberfläche unter Einbeziehung der während der Messungen eingesetzten Messparameter und Messkonfigurationen.

Dieser letzte Punkt ist vor allem für eine geophysikalisch fachkundige und effiziente Bearbeitung von besonderer Wichtigkeit. Als AN und Geophysiker können wir als Bindeglied zu den geotechnischen Erfordernissen nur dann optimal fungieren, wenn wir die bisherigen geophysikalischen Oberflächenmessungen und die nachgewiesenen Anomaliebereiche richtig bewerten können. Dazu ist es zwingend erforderlich, dass wir Kenntnis von der Messtechnologie und den Messparametern der durchgeführten Oberflächenmessungen erhalten. Ein Einblick in



---

die Ergebnisberichte der 2D-geoelektrischen tomographischen und der refraktionsseismischen Messungen bildet dafür eine wichtige Voraussetzung und Grundlage.

Das übergeordnete Ziel der gemeinsamen Beratung sollte darin bestehen, ein fachlich fundiertes und kosteneffizientes geophysikalisches Erkundungskonzept zu erstellen, welches zusammen mit allen bisher und zukünftig noch durchzuführenden Erkundungs- und Aufschlussarbeiten die Gefahr eines plötzlichen Versagens des Ringdammes minimiert.

**Abbildungsverzeichnis**

	<b>Seite</b>	
<b>Abb. 2_1</b>	Schematische Skizze der Lage der 3 Erkundungsbohrungen für das Testmessprogramm	8
<b>Abb. 3_1</b>	Seismik Equipment (Überblick)	10
<b>Abb. 3_2</b>	Hochspannungseinheit für Betrieb des Sparker	10
<b>Abb. 3_3</b>	Sparker (seismische Quelle)	10
<b>Abb. 3_4</b>	Seismische Registriereinheit	10
<b>Abb. 3_5</b>	Sparker in Bohrung BK 05/2011	11
<b>Abb. 3_6</b>	Wasserwagen zum Befüllen der Bohrungen	11
<b>Abb. 3_7</b>	Durchschallung zwischen BK 32/2011 und BK 35/2011	11
<b>Abb. 3_8</b>	22 MHz- (links) und 100 MHz- (rechts) Bohrloch-Radar-Antennensonden	13
<b>Abb. 3_9</b>	100 MHz-Bohrloch-Radar-Sonden in Reflexionskonfiguration	13
<b>Abb. 3_10</b>	Bohrloch-Radar-Reflexionsmessung unter Nutzung einer Kabelwinde	13
<b>Abb. 3_11</b>	Bohrloch-Radar-Messung im Crosshole-Modus zwischen zwei Bohrungen (BK 2 und BK 3)	13
<b>Abb. 5_1</b>	Beispiel für den tomographischen Nachweis eines Hohlraumes (Entwässerungsstollen für den Braunkohlentiefbau) bei guten petrophysikalischen Kontrasten und günstigen geometrischen Verhältnissen	22



---

## Anlagenverzeichnis

- Anlage 3\_1** Ausschnitt aus dem Lageplan (Fichtner GmbH & Co. KG, Stuttgart) mit den verwendeten Bohrungen sowie den durchgeführten seismisch-tomographischen und den Bohrloch-Radar-Messungen
- Anlage 4.1\_1** Beispiele für Seimsogrammqualität
- Anlage 4.1\_2** Beispiele zur Geschwindigkeitsbestimmung verwendeter Seismogramme
- Anlage 4.1\_3** Geschwindigkeiten für geradlinige Laufwege (Beispiele)
- Anlagen 4.2\_1 bis 4.2\_4** Ergebnisdarstellungen der Bohrloch-Radar-Testmessungen
- Anlage 4.2\_1** Bearbeitetes Radargramm der Reflexionsmessung in der Bohrung BK 2/2011
- Anlage 4.2\_2** Bearbeitetes Radargramm der Reflexionsmessung in der Bohrung BK 35/2011
- Anlage 4.2\_3** Bearbeitetes Radargramm der Reflexionsmessung in der Bohrung BK 32/2011
- Anlage 4.2\_4** Bearbeitetes Radargramm der Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen BK 32/2011 und BK 35/2011
- Anlagen 5.2\_1 bis 5.2\_5** Referenzbeispiele Bohrloch-Radar-Anwendung im Karst
- Anlage 5.2\_1** Bearbeitete Dipol-Reflexionsradargramme (100 MHz / 250 MHz) mit georteten Karststrukturen
- Anlage 5.2\_2** Gegenüberstellung der Ergebnisse der Tomographie und der Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen BK 11 und B 12
- Anlage 5.2\_3** Gegenüberstellung der Ergebnisse der Tomographie und der Crosshole-Messung zwischen den Bohrungen B 12 und B 13
- Anlage 5.2\_4** Geschlossene Darstellung der Radarwellengeschwindigkeiten der Radar-Tomographien zwischen den Bohrungen BK 11 – B 12 – B 13 – B 15 und B 14
- Anlage 5.2\_5** Hohlraumabschätzung aus markanten Niedriggeschwindigkeitsanomalien der tomographischen Messungen zwischen den Bohrungen BK 11 – B 12 – B 13 – B 15 und B 14



## ***Anlagen***