

## **Geologische und geophysikalische Trassenerkundung eines Donaudükers im Vorfeld einer Gasleitungsverlegung zwischen Rumänien und Bulgarien**

Christoph Donié

*Dr. Donié Geo-Consult GmbH, Am Hang 3, D-76307 Karlsbad*

### **Abstract**

Within the frame of the interconnector gas pipeline construction between Romania and Bulgaria in 2016 a Danube crossing (culvert) was planned with two parallel pipelines of approximately 2.1 km length each using HDD technology. After several attempts to cross under the river had failed, an intensive exploration of the pipeline route with geological and geophysical methods was initiated. The aim was to improve knowledge about the general subsoil conditions, the tectonic structures and karst phenomena in the area of the planned HDD lines, as major problems were to be expected during construction in these sections. Through an overall interpretation of all the complementary results of the various exploration procedures, the complex underground situation could be analyzed, and a detailed geological model created. Despite the extremely difficult geological conditions the HDD measure was successfully carried out based on this detailed subsoil investigation results.

### **Veranlassung**

Im Rahmen der Instandsetzung des bestehenden grenzüberschreitenden Gasversorgungsnetzwerkes zwischen Marten (Bulgarien) und Comasca (Rumänien) sollten 2016 zwei parallele Rohrleitungen mit einer Länge von jeweils ca. 2,1 km und einem Durchmesser von 500 mm im HDD-Verfahren (Horizontal Directional Drilling) unter der Donau hindurch verlegt werden. Nachdem drei Jahre zuvor der Versuch einer Donauquerung im HDD-Verfahren geologisch bedingt gescheitert war, sollte nun die Donauquerung in einer deutlich größeren Tiefe erfolgen, in der etwas günstigere geologische Randbedingungen erhofft wurden. Insofern konnten vorhandene Baugrunddaten aus der ersten Kampagne nur eine unzureichende Basis für die geplante Baumaßnahme liefern, als die Erkundungstiefe von 30 m auf bis zu 100 m deutlich erhöht wurde. Daher wurden umfangreiche geologisch-geophysikalische Baugrunduntersuchungen veranlasst, die sich in dieser Form bei zahlreichen vorausgegangenen HDD-Projekten immer wieder bewährt hatten. Ziel war es, neben der Feststellung der generellen Baugrundsituation die im Bereich der projektierten HDD-Trassen zu erwartenden tektonisch stark beanspruchten Zonen bzw. Strukturen zu erfassen. Dabei handelte es sich im Einzelnen um eine bekannte geologische Störung, die im Trassenverlauf nahe dem bulgarischen Donauufer vermutet wurde, deren Begleitstörungen, offene Spalten und Kluftzonen sowie insbesondere auf der bulgarischen Seite bekannte Karstphänomene.

In derartigen geologischen Untergrundverhältnissen waren größere Probleme bei der Bauausführung infolge massiver Spülungsverluste zu erwarten.

## **Geologie**

Der Untergrund im Bereich der HDD-Trassen setzt sich aus Sedimentgesteinen der Kreidezeit (vorwiegend Kalkstein) und quartären Ablagerungen zusammen.

Der Kalkstein, nach Bohrkernanalyse fossilienhaltig, oolitisch, bereichsweise gipsartig, ist im Allgemeinen stark bis sehr stark verwittert. Klüfte und Spalten sind teilweise „offen“ (in Abhängigkeit von ihrer Lage zum Grundwasser luft- oder wassergefüllt), teilweise mit toniger oder kalzitischer Füllung. Lokal wurde sehr stark verwitterter, zerrütteter bis völlig zerlegter Kalkstein (Kalksteinbruchstücke) in toniger Matrix festgestellt. Dabei könnte es sich möglicherweise um eine Verwerfungsbrekzie handeln, die durch starke tektonische Beanspruchung entstanden ist. Insbesondere auf der bulgarischen Seite der Donau begünstigt der tektonisch bedingte hohe Zerlegungsgrad des Kalksteins Karsterscheinungen.

Eine große SE-NW orientierte Verwerfungszone, die südliche Begrenzung des sogenannten Dobrich-Vetrino-Blocks, verläuft im NE, nahe dem Untersuchungsgebiet. Im Bereich der Donau ändert die Verwerfungslinie ihre Richtung und streicht hier von S nach N-NE. Auf rumänischer Seite finden sich zahlreiche annähernd senkrecht zu dieser Hauptstörung verlaufende Verwerfungen, deren tektonische Einwirkungen möglicherweise bis in das Untersuchungsgebiet hineinreichen.

Quartäre Ablagerungen im Untersuchungsgebiet treten als Niederterrassenschotter und Schwemmlandböden (vorwiegend schluffig und sandig, seltener tonig) sowie fluviatile Ablagerungen (Sand und Kies mit tonigen Einlagerungen) in Erscheinung. Untergeordnet wird auf der bulgarischen Seite auch Löss angetroffen.

Insgesamt stellt die beschriebene geologische Untergrundsituation im Bereich der Donau-Querung für über 2 km lange HDD-Leitungstrassen eine große Herausforderung dar.

## **Untersuchungskonzept**

Als Basis für die Ausführungsplanung der HDD-Maßnahmen sollte eine umfassende Erkundung des Untergrundes mit Aufschlussbohrungen, boden- und felsmechanischen Laborversuchen sowie geophysikalischen Erkundungsmethoden durchgeführt werden. Problematisch war allerdings die Tatsache, dass die geologisch-geophysikalischen Baugrunduntersuchungen erst unmittelbar vor der Baustelleneinrichtung, also der Vorbereitung der Bauausführung, beauftragt wurden, auch wenn dies in diesem Business mittlerweile gängige Praxis ist.

Die durchgeführten Bohrungen lieferten punktuelle Informationen über den Untergrundaufbau bis deutlich unterhalb des geplanten Verlegeniveaus der projektierten Pipelines. Aufgrund der Schifffahrt und der starken Strömung in der Nähe des bulgarischen Ufers sowie des hohen zeitlichen Aufwands für Ponton-Bohrungen waren für Bohrungen auf der Donau Grenzen gesetzt, zumal der Start der eigentlichen HDD-Maßnahme unmittelbar bevorstand. Daher wurden nur in der Nähe zum rumänischen Ufer zwei Aufschlussbohrungen auf der Donau niedergebracht. Um die Informationslücken zwischen den Bohrungen

zu schließen sowie besonders kritische Abschnitte zu lokalisieren, wurde zeitgleich eine sehr aufwendige geophysikalische Erkundungskampagne gestartet.

Basis der geophysikalischen Untersuchungen waren umfangreiche tomographische Geoelektrikmessungen auf Längs- und Querprofilen entlang der geplanten Trasse. Ergänzt wurde die Geoelektrik durch eine seismische Erkundung, die zu Land weitgehend auf den gleichen Profilen wie die geoelektrischen Messungen erfolgte. Diese zweite Methode wurde eingesetzt, um die ausschließlich indirekten Baugrundinformationen zwischen den Aufschlussbohrungen und das daraus abzuleitende geologische Modell durch einen zweiten physikalischen Parameter abzusichern. Dabei stand insbesondere die Differenzierung des Kalksteins, der auf weiten Strecken der HDD-Baumaßnahmen zu durchbohren war, im Vordergrund. Außerdem ließen sich anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elastischen Wellen dynamische Parameter der verschiedenen Schichten analysieren.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

#### Geotechnik und Vermessung

- Durchführung von 17 Erkundungsbohrungen (Endteufe: 50 m bis 100 m)
- Bohrkernaufnahme durch einen erfahrenen Geologen aus der Region
- Probenahmen aus den Bohrkernen
- Laborversuche: Ermittlung geotechnisch relevanter boden- und felsmechanischer Parameter (z.B. einaxiale Druckfestigkeit, Abrassivität, Porosität etc. im Festgestein, Kornverteilung, Plastizität, Durchlässigkeit, Scherfestigkeit etc. im Lockergestein)
- Bestimmung verschiedener Indices anhand der Bohrkern: RQD-rock quality designation, SCR-solid cone recovery, TCR-total core recovery
- Installation von PVC-Casings in den Erkundungsbohrungen
- Topographische Aufnahme der Messprofile (GPS und terrestrische Vermessung)
- Bathymetrische Messungen auf der Donau auf einer Fläche von ca. 80 m x 550 m (Echolot)

#### Messprogramm Geophysik

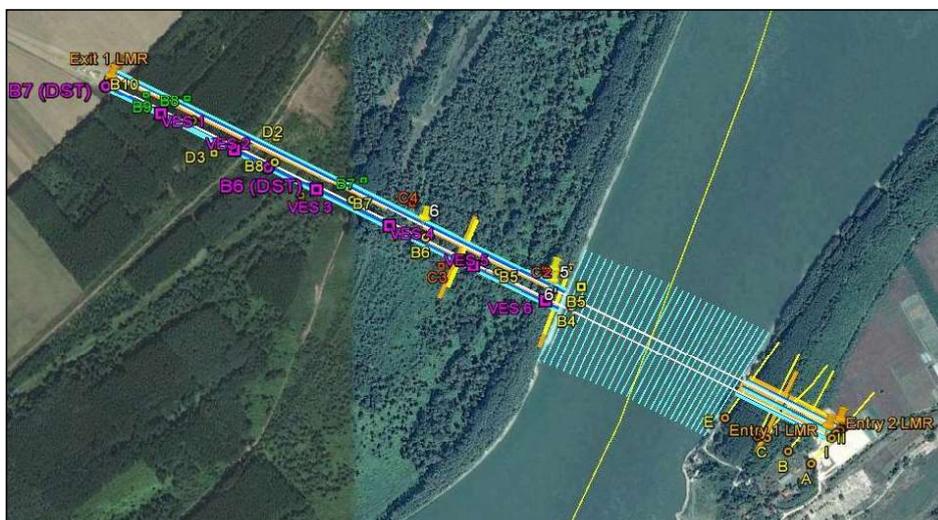
- Geoelektrik auf dem Land: Messungen in Pol-Pol-Anordnung auf Längs- und Querprofilen entlang der geplanten Trasse auf rumänischer und bulgarischer Uferseite, 5.510 Profilmeter
- Geoelektrik auf dem Wasser: Messung von 34 uferparallelen Profilen à 450 m auf der Donau (Länge wegen Erkundungstiefe von 100 m und Schaffung eines Informationskorridors auf einer Breite von 80 m erforderlich) in Schlumberger-Anordnung, 15.300 Profilmeter
- Seismik: Standard Refraktionsseismik (SRS), Refraktionsseismische Tomographie (SRT), Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), 4.700 Profilmeter
- Downholemessungen: Bohrlochseismik in mit PVC-Casing ausgebauten und Wasser gefüllten Bohrungen (7 Stück)

### Auswertung und Ergebnisinterpretation

- Geoelektrik: Auswertung mit Hilfe von 1D- und 2D-Inversions-algorithmen, Berechnung geoelektrischer Schnitte parallel und senkrecht zur geplanten Trasse, Erstellung eines geologischen Modells in Form von geologischen Längsschnitten auf Basis der 1D-Inversionen, 2D-Inversionen und Kalibrierung an Bohrungen
- Seismik: Datenanalyse und Berechnung seismischer Untergrundmodelle (Vertikalschnitte), Analyse der dynamischen Parameter (Poisson-Zahl, Youngs Modul, Schermodul)
- Zusammenführung der Ergebnisse aus Geoelektrik und Seismik und Optimierung der geologischen Untergrundmodelle/geologische Längsschnitte
- Seismische Erdbeben-Risikoanalyse für die projektierten Pipelines auf Basis der ermittelten dynamischen Gesteinsparameter und des geologischen Untergrundmodells im Bereich der Trasse. Diese Analyse erforderte nicht nur die im Zuge der Baugrunderkundung generierten Daten, sondern basierte auch auf den Ergebnissen jahrzehntelanger seismischer Erhebungen in der Region.

### **Ablauf der geologisch-geophysikalischen Erkundung und Ergebnisse**

Da bei einer Pipelineverlegung im HDD-Verfahren die Platzverhältnisse für den Rohreinzug eine entscheidende Rolle spielen, war der Eintrittspunkt der Horizontalbohrungen und somit der Start der Baumaßnahme zwingend auf der bulgarischen Seite. Auf der rumänischen Seite waren die Platzverhältnisse günstiger, d.h. die Produktrohre konnten verschweißt und für den Rohreinzug in voller Länge ausgelegt werden

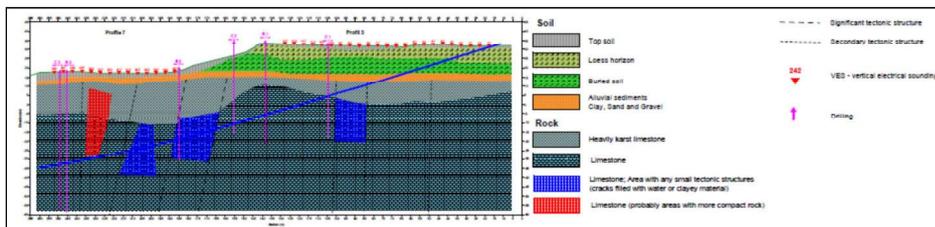


**Abb. 1:**  
*Untersuchungsgebiet mit den geplanten Pipeline-trassen (weiß), den geophysikalischen Erkundungsprofilen (gelb/türkis) und Bohransatzpunkten*

Daher wurde die geologisch-geophysikalische Erkundungskampagne auf der bulgarischen Seite begonnen. Zur Feststellung bekanntermaßen vorhandener größerer Strukturen wie z.B. offene Spalten oder Karsthohlräume, die wegen möglicher totaler Spülungsverluste ein großes Problem für das Horizontalspülbohrverfahren darstellen, erfolgten die geophysikalischen Untersuchungen in diesem Bereich entlang von vier Längs- und fünf Querprofilen. Aufgrund der Tatsache, dass Aufschlussbohrungen im Vorfeld von HDD-Maßnahmen wegen der Gefahr von Ausbläsern (Austritt / Verlust der Bohrspülung an die Geländeoberfläche) in der Regel mit einem Mindestabstand von 5 m (in der Praxis oftmals deutlich

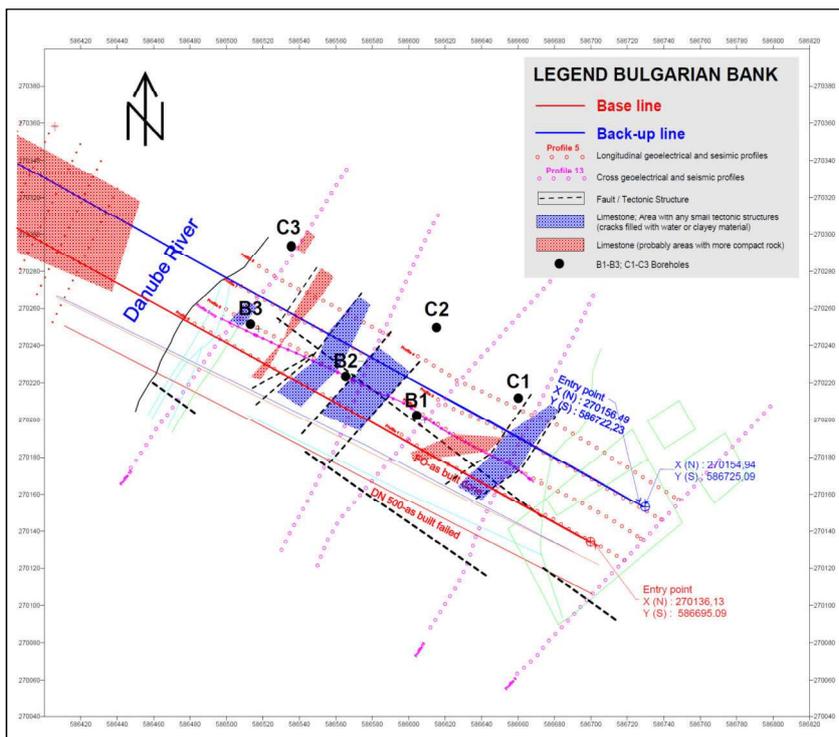
weiter entfernt) wechselweise beiderseits einer projektierten Leistungs- bzw. Pipelinetrasse niederbracht werden, lieferten die exakt auf den Pipelinetrassen durchgeführten geophysikalischen Messungen – wenn auch indirekt – die einzigen Untergrundbefunde im unmittelbaren Trassenverlauf.

Nach einer aufwendigen Auswertung der geoelektrischen Messungen wurden detaillierte geologische Längsschnitte erstellt. Hierbei wurden nicht nur die in Bohrungen nachgewiesenen Schichten und deren Schichtgrenzen verfolgt. Vielmehr wurden auch geophysikalisch erfasste und geologisch interpretierte Schwächezonen wie z.B. markante Klüfte, Spalten oder Klüftzonen dargestellt (siehe Abb. 2). Durch die Seismik wurden insbesondere markante Schichtgrenzen und der in Bohrungen beschriebene Verwitterungsgrad des Kalksteins bestätigt.



**Abb. 2:** Geologischer Längsschnitt auf der bulgarischen Seite (exemplarisch)

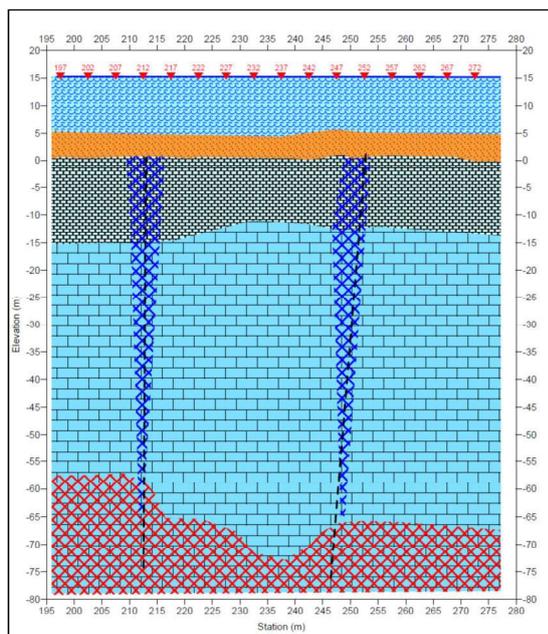
Aus den Ergebnissen der modellierten geologischen Längsschnitte ließ sich eine Art „tektonisches Modell“ ableiten, anhand dessen die markantesten Problemzonen im Startbereich auf der bulgarischen Seite aufgezeigt werden konnten (siehe Abb. 3). Hinsichtlich einer HDD-Maßnahme sind zwar sämtliche „offenen“ Klüfte und Spalten problematisch, doch massive Klüftungsbereiche sowie Kreuzungen größerer offener Spalten – verstärkt durch Karstphänomene – können den Grenzbereich der Anwendbarkeit des HDD-Verfahrens markieren und sogar ein Scheitern der Baumaßnahme zur Folge haben.



**Abb. 3:** Tektonisch bedingte Problembereiche am bulgarischen Ufer

Bei dem gewählten Erkundungs-Procedere wurden die auf Tektonik zurückzuführenden Auffälligkeiten aus der Geoelektrik (1D-Inversionen in enger Abfolge in Verbindung mit 2D-Inversionen) abgeleitet. Da neben tektonisch bedingten Strukturen auch der Verwitterungsgrad des Kalksteins eine große Rolle für den Erfolg, zumindest aber für eine effiziente Ausführung einer HDD-Maßnahme spielt, waren die zusätzlichen Erkenntnisse aus der aufwendigen seismischen Erkundung sehr hilfreich. Hierdurch ließ sich über recht markante Wechsel der seismischen Geschwindigkeit eine gute Aufteilung in einen Drei-Schichten-Fall vornehmen: 1) Deckschichten, 2) verwitterter Kalkstein, 3) unverwitterter Kalkstein. Diese rein physikalische Einteilung anhand von bekannten seismischen Geschwindigkeiten unterschiedlicher Gesteine in der Region wurde kalibriert und bestätigt durch die Bohrkernsprache und entsprechende felsmechanische Parameter aus dem Labor. Somit stand über die markant unterschiedlichen Widerstandsbereiche der mittels 1D-Geoelektrik bestimmten und verfolgten geologischen Schichten und deren Grenzen hinausgehend ein zusätzlicher Befund zur geotechnischen Einschätzung zur Verfügung. Ebenfalls nützlich waren die Ergebnisse der punktuell als MASW-Seismik ausgewerteten Daten der refraktionsseismischen Messungen, da diese Befunde analog einer geologischen Sondierung indirekt Aufschluss über die Schichtenabfolge und markante Schichtgrenzen liefern konnten. Sämtliche Erkenntnisse aus allen angewandten Untersuchungsmethoden (Bohrungen, boden- und felsmechanische Laborversuche, Geoelektrik, Seismik) wurden schließlich bei der finalen Interpretation herangezogen.

Auf der Donau wurde eine geoelektrische Erkundung durchgeführt. Hierzu wurden 34 parallel zur Donau orientierte Einzelprofile à 450 m Länge mit einem Informationsgewinn auf einer Länge von 80 m mit einer Erkundungstiefe von 100 m in Schlumberger Anordnung gemessen (Ziel: Geologische Längsschnitte à 80 m Länge mit voller Erkundungstiefe von 100 m). Dazu war die Unterstützung durch die Schifffahrtspolizei und deren Dienstschiff unerlässlich. Das Messkabel wurde dabei an diesem Schiff befestigt und auf das jeweilige Messprofil gebracht. Mit zwei motorisierten Schlauchbooten (Schlauchboot 1 mit Messingenieur und Messgerät, Schlauchboot 2 mit Navigator) wurde das Messkabel unter Zuhilfenahme der Strömung in der jeweiligen Messlinie gehalten. Nach einer Auswertung der geoelektrischen Messdaten als 2D-Inversion wurde für diese 34 Profile erwartungsgemäß nur ein einfacher Drei-Schichten-Fall sichtbar. Darüber hinaus konnten in der Nähe des bulgarischen Ufers aufgrund des Isoohmenverlaufs innerhalb der geoelektrischen Längsschnitte mit der Widerstandsverteilung nach 2D-Inversion Hinweise auf zwei im spitzen Winkel gekreuzte Störungen (bekannte Störung oder deren Begleitstörung, s.o.) gewonnen werden. Bei der Detailauswertung mittels 1D-Inversionen in kurzer Abfolge wurden in sämtlichen parallelen Messprofilen auch zwei markante Klüfte oder Spalten erkannt, die mehr oder weniger parallel zu den projektierten Leitungstrassen verlaufen (siehe Abb. 4).



**Abb. 4:** Geologischer Längsschnitt eines Querprofils auf der Donau (exemplarisch); Folgende Schichten sind in Abbildung 4 von oben nach unten erkennbar: Wasser (Donau), Alluvium (Sand und Kies), verwitterter Kalkstein, schwach verwitterter Kalkstein, kompakter Kalkstein. Außerdem sind zwei markante „Störungen“ dargestellt, die insbesondere im oberen Bereich Auflockerungszonen aufweisen.

Bei einem Kontakt einer HDD-Bohrung mit einer derartig markanten Kluft oder Spalte bzw. im Kreuzungsbereich zweier offener Spalten war mit sehr großen Spülungsverlusten zu rechnen (siehe auch Ergebnisse am bulgarischen Ufer).

Am rumänischen Ufer erfolgten die Messungen im Wesentlichen entlang von Längsprofilen exakt auf den projektierten Pipelinetrassen. Hier wurden insgesamt vier Störungszonen mit entsprechenden Auflockerungsbereichen bzw. Bereichen mit hohem Zerlegungsgrad festgestellt.

Schließlich bedurfte es sämtlicher Informationen und umfangreicher Fachkenntnisse hinsichtlich geologisch-geophysikalischer Erkundungen bei dem gegebenen geologischen Kontext, um ein geologisch belastbares Modell des Untergrundes zu konstruieren. Dazu fand eine intensive Zusammenarbeit zwischen Geologen und Geophysikern, Experten der Geoelektrik und der Seismik, statt.

### **Konsequenzen für das HDD-Verfahren**

Die aufwendige geologisch-geophysikalische Erkundungskampagne lieferte ein aussagekräftiges Baugrundmodell als Basis für eine Ausführungsplanung. Durch folgende Maßnahmen konnte eine erfolgreiche Pipelineverlegung gewährleistet werden:

- Casing im Startbereich, einem Schutzrohr im Verlauf der ersten 120 m der HDD-Trassen innerhalb der ersten Karst-Problemzone auf bulgarischer Seite
- Zementationsarbeiten in laut geologisch-geophysikalischer Erkundung ausgewiesenen Zerrüttungszonen mit zu erwartenden erheblichen Spülungsverlusten
- Einsatz speziell auf die schwierigen geologischen Randbedingungen abgestimmter Bohrtools
- Inkaufnahme totaler Spülungsverluste bei entsprechend hohem Bentonitverbrauch (insbesondere in der zweiten Phase der HDD-Kampagne)
- Pilotbohrung von zwei Seiten und Meeting in der Mitte zwecks Zeitersparnis und Reduzierung des Risikos durch Verkürzung der Pilotbohrstrecken (bei zweiter Pipelineverlegung)

Letztendlich konnten die beiden parallelen Pipelines erfolgreich verlegt werden. Ohne eine ausführliche Vorerkundung wären diese Horizontalbohrungen im Grenzbereich des für das HDD-Verfahren Machbaren allerdings kaum möglich gewesen, da das detaillierte Baugrundmodell einer vorausseilenden Planung der HDD-Maßnahme diene. Durch einen engen Erfahrungsaustausch zwischen Horizontalbohrfirma und Baugrundgutachter (Geologe) konnten die aussagekräftigen Baugrundbefunde optimal zur Realisierung der Baumaßnahme genutzt werden.

### **Fazit hinsichtlich der durchgeführten geologisch-geophysikalischen Erkundung**

Durch das Zusammenwirken eines internationalen, interdisziplinär arbeitenden Teams war es möglich, innerhalb sehr kurzer Zeit eine aussagekräftige geologische Expertise für den Bereich der beiden parallel verlaufenden Pipelinetrassen zu erstellen. Aufgrund der sehr komplexen Geologie war eine intensive geologische Arbeit erforderlich. Die Bohraufschlussdaten in Verbindung mit den boden- und felsmechanischen Parametern aus Feld- und Laborversuchen sowie die diversen geophysikalischen Untersuchungsbefunde bedurften einer akribischen Interpretation. Um einen belastbaren Untersuchungsbefund zu erarbeiten, war letztendlich keine der ausgeführten Untersuchungsmethoden und durchgeführten Arbeiten verzichtbar.

Als Synthese wurde ein detailliertes geologisches Prognosemodell aufgestellt, das sich durch die Bauausführung bestätigen ließ.