

www.waterstones-srl.it

## LOG GEOFISICI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTERMICA DEL SERBATOIO: IL PROGETTO GEOTERMIA GRADO (GORIZIA, ITALIA)

## WELL LOGGING FOR THE GEOTHERMAL RESERVOIR CHARACTERIZATION: THE GRADO GEOTHERMAL PROJECT (GORIZIA, ITALY)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE Dipartimento di Ingegneria e Architettura

GIANNI PIFFER<sup>1</sup>, MIRKO RINALDI<sup>1</sup>, BRUNO DELLA VEDOVA<sup>2</sup> <sup>1</sup> Waterstones S.r.l. Via Bolzano/Bozenstrasse 40, 39044 Egna/Neumarkt (Bz) – Italy <sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Architettura, Università degli Studi di Trieste, Via Valerio 10, 34127 Trieste – Italy

Corresponding author's e-mail: info@waterstones-srl.it

## ABSTRACT

Il presente contributo è focalizzato sull'acquisizione e l'interpretazione dei logs geofisici eseguiti nel pozzo geotermico Grado2 con la supervisione tecnico-scientifica del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste.

Lo sfruttamento dei sistemi geotermici caratterizzati da conduzione dominante, richiede una profonda comprensione delle principali proprietà fisiche dei sistemi di fratturazione e del modello di circolazione dei fluidi nel serbatoio. La tecnica del Wireline log, con l'acquisizione di set completi di dati petrofisici e geologici (calibro meccanico, gamma ray naturale, resistività normale e potenziale spontaneo, sonica, scanner acustico radiale e micromulinello), integrati con i dati di produzione, rappresenta un potente strumento per la valutazione di questi importanti parametri.

I dati acquisiti consentono di calibrare ed integrare i dati geologici e geofisici disponibili e permettono la corretta valutazione delle risorse geotermiche e delle operazioni di perforazione e completamento del pozzo. Il pozzo Grado2 rappresenta il pozzo di produzione del doppietto geotermico realizzato per il sistema di teleriscaldamento, mentre il pozzo Grado1 rappresenta quello di re-iniezione nello stesso serbatoio. Il Progetto Geotermico Pilota di Grado è una iniziativa della Regione Friuli Venezia Giulia, Italia, sostenuto da finanziamenti comunitari, per lo sfruttamento razionale delle risorse geotermiche a bassa entalpia contenute nei serbatoi carbonatici profondi del bacino nord-Adriatico.

## ABSTRACT

The present contribution is focused on the acquisition and interpretation of geophysical logging in the geothermal well Grado2 under the technical and scientific supervision of the Department of Engineering and Architecture, University of Trieste. The exploitation of geothermal systems in conduction-dominated geothermal requires a robust understanding of the main physical properties of the fractured system, of the saturating fluids and of the water circulation pattern in the reservoir. The Wireline Logging technique, with the registration of complete data sets for petrophysical and geological investigations (Mechanical Caliper, Natural Gamma Ray, Resistivity, Full Acoustic Waveform, Acoustic Televiewer and Spinner Flowmeter logs) complemented with production logs, is a powerful tool for the assessment of these essential parameters.

## Geothermal logging results allow to calibrate the geological and geophysical dataset of the area for the geothermal resource assessment and is also useful to select the most appropriate drilling and completion operations for the geothermal well.

Grado2 was adequate to become the production well of the geothermal doublet for the district heating system, whereas Grado1 became the re-injection well into the same reservoir.

The Grado Geothermal Pilot Project is an initiative of the Friuli Venezia Giulia Region, Italy, supported by EU funding, for the rational exploitation of geothermal low enthalpy resources contained in deep carbonate reservoirs of the north-Adriatic basin.

## **1. IL PROGETTO PILOTA DI GRADO**

Il progetto ha previsto la realizzazione di un impianto pilota di teleriscaldamento geotermico per alcuni edifici pubblici della città. La rete di teleriscaldamento è stata allacciata a due pozzi di ca. 1100 e 1200 m di profondità, ubicati all'interno della città di Grado e distanti l'uno dall'altro circa un chilometro (fig. 1). Il pozzo di derivazione Grado2 fornirà acqua geotermica a 47°-49°C cedendo calore agli scambiatori. L'acqua di ritorno dagli scambiatori è convogliata verso il pozzo di re-iniezione Grado1 nel medesimo serbatoio profondo (Gruppo di lavoro DIA-UNITS e FIT, 2014). Il Servizio Geologico della Regione

### 1. THE GRADO PROJECT

The Grado project involves the construction of a geothermal pilot plant to heat some public buildings. The geothermal district network is connected to two wells ca. 1,100 and 1,200 m of depth, located within the city center and they are away from each other 1 Km (fig. 1). Distribution network provides geothermal water at 47-49° C transferring heat to the exchangers. The return water from the heat exchangers is collected and conveyed to the re-injection well into the same deep reservoir (Working group DIA-UNITS and FIT, 2014). The Geological Office of the Friuli

Project:

## 3. IL MODELLO GEOTERMICO

Gli alti strutturali della piattaforma carbonatica ospitano un serbatoio idrotermale poroso e fratturato che permette la circolazione convettiva di acque geotermiche nei primi 1-2 km di profondità (Della Vedova et al., 2014). Le celle convettive generano gradienti di temperatura anomali alla base del cuneo sedimentario sovrastante, i quali contengono falde acquifere idrotermali più fredde che vengono riscaldate principalmente per conduzione di calore dal basso (Figura 3). In questo quadro le successioni marnose non permeabili del Neogene e del Paleogene costituiscono una vera e propria barriera idraulica.

## 3. GEOTHERMAL MODEL

The platform structural high of Grado host a hydrothermal reservoir porous and fractured allowing the convective circulation of geothermal waters in the first 1-2 km deep (Della Vedova et al., 2014). The convective cells generate higher temperature gradients at the base of the overlying sediments wedge, which contain colder hydrothermal aquifers heated by conduction from the bottom (Figure 2). In this general framework, the Neogene and Paleogene marl sequences can be considered own a very low permeability, and therefore they represent a hydraulic barrier.

FVG e il Comune di Grado hanno eseguito le due fasi principali del Progetto per il teleriscaldamento di Grado:

• la prima fase mirava alla caratterizzazione del serbatoio geotermico carbonatico profondo nell'area di Grado, per ottenere una valutazione preliminare del potenziale geotermico attraverso l'esecuzione di indagini geofisiche e la perforazione del primo pozzo esplorativo denominato Grado1; questa fase si è conclusa nel mese di luglio 2008; • la seconda fase è stata finalizzata al completamento delle indagini geofisiche per l'ubicazione del secondo pozzo, alla trivellazione del pozzo

del potenziale geotermico e della

iniziati nel 2012 e sono stati completa-

ti nel dicembre 2014 - gennaio 2015.



Fig. 1 The Grado Island and the capacità di produzione. I lavori sono Fig. 1 Ubicazione dei pozzi Grado1 Grado1/2 well's location e Grado 2 sull'isola di Grado

named Grado1; the phase was completed in July 2008; • The second phase was aimed at completion of geophysical surveys for the location of the second well, the drilling of the well known as Google ear Grado2, the evaluation of geothermal potential and the production

> capacity. Work began in 2012 and were completed in December 2014 - January 2015.

Venezia Giulia Region and the

Municipality of Grado have develo-

ped the two main phases of these Geothermal District Heating

• The first phase was aimed at the characterization of the geothermal

carbonate reservoir in the Grado

area, to estimate its geothermal

potential through the execution of

geophysical surveys and the dril-

ling of the first exploration well

### 2. INQUADRAMENTO IDRO-GEOLOGICO

L'Isola di Grado è situata al limite sud-orientale della Laguna di Grado, nella Regione Friuli Venezia Giulia, Provincia di Gorizia. La pianura friulana ospita un complesso sistema di acquiferi confinati e non confinati all'interno di un sistema idrogeologico complesso, sviluppato prevalentemente in direzione N - S. Questo sistema idrogeologico è allogato all'interno di un cuneo sedimentario eterogeneo, caratterizzato da un incremento progressivo dello spessore in direzione W e verso il mare Adriatico dove supera localmente lo spessore di 500 m (Della Vedova et al., 2014) ed è costituito dalla seguente successione stratigrafica:

 sedimenti Plio-Quaternari deposti in ambiente marino poco profondo, litorale e alluvionale organizzati secondo più cicli trasgressivi regressivi; questa copertura terrigena è costituita principalmente da strati sabbiosi/ghiaiosi e limosi, dotati di porosità primaria estremamente variabile;

• molassa alpina di età Oligo-Miocenica, costituita da prevalenti intervalli marnosi con scarse arenarie, depositati in ambiente marino poco

O Wells

(Cimolino et al., 2010; Della

Vedova et al., 2014)

profondo: caratterizzati da bassa permeabilità di matrice, ma localmente interessati da sistemi di fratture e faglie;

 Flysch torbiditico eocenico dell'avanfossa dinarica costituito da prevalenti intervalli marnosi, ricchi di faune pelagiche di mare profondo; con caratteristiche di bassa-bassissima permeabilità. Il cuneo clastico sedimentario si sovrappone ai calcari di piattaforma Paleocenici e Mesozoici. Al di sotto dell'area costiera vene to-friulana i calcari di piattaforma presentano due chiare culminazioni delimitate da sistemi di faglie normali e transtensionali profondamente radicate nel basamento carbonatico con direzione sub-parallela alle catene orogeniche delle Alpi meridionali e delle Dinaridi (Della Vedova et al., 1988, 2008, 2014). Alcune strutture tettoniche permettono la migrazione di fluidi e di acque calde mineralizzate lungo un esteso reticolo di fratture (Della Vedova et al., 2008). In corrispondenza dell'alto di Grado, ad ovest dell'isola, la piattaforma si trova ad una profondità di ca. 500-600 m (Figura 2 e 3), (Della Vedova et al., 2008: Della Vedova et al., 2014).

# systems of fractures and faults; Lines M Brancel-Union Grado -

## 2. HYDRO-GEOLOGICAL SETTINGS

The Grado Island is located at the south-east of the Grado Lagoon, Provincia of Gorizia, in the Friuli Venezia Giulia Region, Italy. The Friuli plain hosts a complex of confined and unconfined aquifers within an hydrogeological articulated system, developed mainly in N - S direction. The hydrogeological system occupies a heterogeneous sedimentary wedge, characterized by a progressive increase of thickness to W and to the Adriatic Sea where locally exceeds the thickness of 500 m (Della Vedova et al., 2014). This sedimentary wedge consists of the following stratigraphic sequence:

• Plio-Quaternary sediments, deposited in shallow marine, coastal and alluvial environment organized in several transgressive-regressive cycles; the terrigenous cover consists mainly of sandy layers / gravel and silt, with primary porosity extremely variable; • Alpine Molasse of Oligo-Miocene age, made up of prevailing marl

intervals and minor sandstones, deposited in shallow marine environment; characterized by low matrix permeability, but locally affected by

> • Eocene turbiditic Flysch of the Dinaric foredeep consists prevailing marl intervals, rich in deep sea pelagic fauna; with low to very low permeability.

The Cenozoic sediments represent a clastic wedge overlying the Mesozoic limestone platform. Generally the carbonate platform show an articulated morphology, with two clear culminations under the Veneto-Friuli coast. They are bounded by normal fault and

## **4. POZZI GEOTERMICI GRADO1 E GRADO2**

In accordo con il contesto geologico/geofisico elaborato dai dati raccolti, il pozzo esplorativo Grado1, perforato sulla spiaggia nel settore occidentale della città di Grado, a circa 100 m dalla battigia, ha intercettato il serbatoio carbonatico a 618 m di profondità ed ha raggiunto un totale di 1.110 metri di profondità (Della Vedova et al., 2008). Il pozzo Grado2 è stato perforato su un alto strutturale locale del basamento carbonatico (Poletto et al., 2013; Della Vedova et al., 2015) nel centro della città, a circa un chilometro ad est del pozzo Grado1. Il programma di perforazione di entrambi i pozzi ha previsto l'adozione di diametri decrescenti con la profondità (24", 17" 1/2, 12"1/4, 8" 1/2); da ca. 680 m di profondità, nell'intervallo superiore del serbatoio carbonatico, il foro è stato lasciato scoperto per l'esecuzione di logs geofisici e prove downhole. Rivestimenti in acciaio K55 API (20", 13" 3/8, 9" 5/8) sono stati installati e cementati nell'intervallo superiore.

Le stratigrafie dei pozzi Grado1 e Grado2 hanno permesso di caratterizzare il reservoir geotermico negli alti strutturali della piattaforma carbonatica, sepolta sotto circa 620 m di sedimenti silicoclastici. La piattaforma carbonatica è costituita da calcari di età Paleogenica e del Cretaceo superiore (fig. 4) (Cimolino et al. 2010; Della Vedova et al., 2014). Il limite Cretaceo-Terziario è caratterizzato, in entrambi i fori a circa 1000-1010 m di profondità, da picchi ad elevata concentrazione di Uranio, riconosciuti in altri contesti dell'Adriatico settentrionale (Cimolino et al., 2010; Della Vedova et al., 2014).

## 4. GRADO 1 AND GRADO 2 GEOTHERMAL WELLS

According to the geological context suggested by the collected multidisciplinary data, the Grado1 well was drilled on the beach, in the west side of the City of Grado, about 100 m from the shoreline. The well intercepted the carbonate reservoir to 618 meters deep and reached a total depth of 1,110 meters (Della Vedova et al., 2008). The well Grado2 was drilled on a structural high located in correspondence of the city center (Poletto et al., 2013; Della Vedova et al., 2015),

about one kilometer east of the Grado1 well. The drilling program of both wells provided for the adoption of decrea-

sing diameters with depth (24 ", 17" 1/2, 12 1/4 ", 8 1/2"); from ca. 670 m depth, in the upper part of the carbonate reservoir, the hole has been left uncased for the execution of wireline geophysical logs. Steel casing K55 API (20 ", 13" 3/8, 9 "5/8) have been installed and cemented.

The stratigraphy of the Grado1 and Grado2 wells allowed to characterize the geothermal reservoir in the structural highs of the carbonate platform, buried under about 620-670 meters of silicoclastic sediments. The carbonate platform is made up by a thick interval of Paleocene limestone as well by Upper Cretaceous limestone (Fig. 4) The Cenozoic-Mesozoic transition turned out to be well marked in both holes at about 1000 to 1010 m deep by high Uranium's peaks, also recognized offshore in the northern Adriatic oil wells (Cimolino et al., 2010; Della Vedova et al., 2014).









Figura 3. sezione geologica semplificata orientata NE - SW della bassa pianura Veneto - Friulana: sedimenti Plio-Quaternari (giallo), Neogene (senape) e marne Paleogeniche (marroni), calcari Mesozoici (ciano). Il posizionamento della sezione è indicato nella figura 2. Il riguadro a sinistra mostra l'andamento delle geoterme misurate nei pozzi Cesarolo - 1, Grado -1 e Grado - 2. (Della Vedova et al. 2014)

Figure 3. Simplified geological section oriented NE - SW of the Veneto-Friulian plain: Pliocene-Quaternary sediments (yellow), Neogene (mustard) and marl Paleogene (brown), Mesozoic limestone (cyan). The section position is shown in Figure 2. The left pane shows the temperature trend measured in wells Cesarolo1, Grado1 and Grado2. (Della Vedova et al. 2014)

Fig. 4. Pozzo Grado 2: stratigrafia (F. Podda, modificata) e logs geofisici con dettaglio del passaggio Cretaceo-Terziario

Fig. 4. Grado2 Well stratigraphy (modified from F. Podda) and geophysical logs with details of the Cretaceous-Tertiary transition.

## **5. POTENZIALE GEOTERMICO DEL SERBATOIO**

Tutti i dati raccolti in pozzo sono stati integrati in un modello numerico termo-fluidodinamico preliminare e comparati con il quadro geologico rilevato a terra ed in mare, compresi i dati dei pozzi petroliferi e idrici (Della Vedova et al., 2008; Cimolino et al, 2010).

Il serbatoio è costituito da un acquifero fratturato confinato, avente una salinità superiore a 30 ‰ e una temperatura di 49,5 ° C nella parte inferiore del pozzo Grado2 e di circa 42 ° C in Grado1. Le analisi geochimiche delle acque geotermiche indicano che il fluido è acqua di mare anossica avente presumibilmente un'età di oltre 10 milioni di anni (Della Vedova et al., 2014). Ciò significa che le acque geotermiche circolano attraverso una complessa rete dai più antichi calcari cretacei ai più giovani calcari paleogenici, il volume del serbatoio può essere stimato attorno a 75-100 Km<sup>3</sup> (Della Vedova et al., 2014). A seguito di due cicli di acidificazione nel pozzo Grado2 è stato raggiunto un deflusso artesiano spontaneo di circa 100 t/h (flusso laminare fino a 28 L/s) con una pressione di 240 kPa a testa pozzo (Della Vedova et al., 2014). Considerando questo deflusso artesiano sponta-

neo ed assumendo 20 ° C come una differenza di temperatura utile, la

potenza termica naturale di Grado2 risulta essere 2,3 MWth (1700

TEP/a). Poiché una produzione sostenibile è stata stimata in circa 126

t/h ( $\approx$  35 L/s), il potenziale termico disponibile è valutato in circa 3

MWth (2200 TEP/a), (Della Vedova et al., 2014).

## **5. POTENTIAL OF THE GEOTHERMAL RESERVOIR**

All data collected have been integrated into a preliminary numerical thermo-fluid dynamic model of and compared with the geological context found on land and at sea, including data from oil and water wells (Della Vedova et al., 2008; et Cimolino al, 2010).

The reservoir is constituted by a confined aquifer fractured, having a salinity of more than 30 ‰ and a temperature of 49.5 ° C at the bottom of the Grado2 well and about 42 ° C in Grado1 well. The geochemical analysis of the geothermal waters indicate that the fluid is anoxic sea water having an age of over 10 million years (Della Vedova et al., 2014). This means that the geothermal water circulating through a complex network from the oldest Cretaceous limestone to the youngest Paleogene limestone, while the reservoir volume can be estimated at 75-100 km<sup>3</sup> (Della Vedova et al., 2014).

Following two acidification cycles of the well Grado2 was reached an artesian spontaneous outflow of about 100 t/h (laminar flow up to 28 L/s) at a pressure of 240 kPa at the wellhead (Della Vedova et al., 2014). Considering this artesian spontaneous outflow and assuming 20° C as useful difference temperature, the thermal power of Grado2 well turns out to be 2.3 MWth (1700 TOE/h). Because sustainable production was estimated at about 126 t/h ( $\approx$ 35 L/s), the potential heat available is estimated at approximately 3 MWth (2200 TOE/h), (Della Vedova et al., 2014).

## **REFERENZE / REFERENCES**

Cimolino A. (2010) - Caratterizzazione delle risorse geotermiche della Bassa Pianura Friulana (Regione FVG). PhD Dissertation in Civil and Environmental Engineering. University of Trieste, 2010, 302 pp.

Della Vedova B., Marson I., Palmieri F. (1988) - Gravity study of a low enthalpy hydrothermal area: Grado Lagoon - NE Italy. European Geophysical Society - XIII General Assembly, Annales Geophysicae, Special Issue 1988, 27.

Della Vedova B., Castelli E., Cimolino A., Vecellio C., Nicolich **R., Barison E. (2008)** - La valutazione e lo sfruttamento delle acque geotermiche per il riscaldamento degli edifici pubblici. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, 6/2008, 16 - 19.

and future in the Peri – Adriatic Area - Veli Lošinj (Croatia), 25 - 27 August 2014.

Gruppo di lavoro DIA-UNITS e FIT (2014) - Geotermia ed energia termica dal mare per la città di Trieste: proposta per un utilizzo sostenibile.

Della Vedova B., Petronio L., Poletto F., Palmieri F., Marcon

#### A., Corubolo P., Farina B., Cimolino A., Bellezza C. (2015) Poletto F., Corubolo P., Farina B., Schleifer A., Petronio L. Cimolino A., Della Vedova B., Nicolich R., Barison E., Branca-Della Vedova B., Bellani S., Pellis G., Squarci P. (2001) Della Vedova B., Cimolino A., Castelli E., Brancatelli G. The Geothermal District Heating System on the Grado Island Della Vedova B. (2013) - Multi - offset VSP for the integrated telli G. (2010) - New evidence of the outer Dinaric deformation Deep temperatures and surface heat flow distribution. In: Vai (2014) - Geothermal Heating and Cooling in the FVG Region: (North - eastern Adriatic Sea). Proceedings World Geothergeophysical characterization of the Grado (NE Italy) carbonafront in the Grado area (NE - Italy), Rendiconti Lincei, vol. 21, G.B. & Martini I.P. (Eds), Anatomy of an Orogen: the Apennithe Grado District Heating and the Pontebba Ice Rink Plants. mal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19 - 25 April 2015. tic reservoir. Proceedings of the European Geothermal Connes and Adjacent Mediterranean Basins, 65 - 76. Proceedings of the Workshop on Geothermal Energy, Status gress 2013, Pisa, Italy, 2013. supplement 1 (2010), 167 - 179.



www.waterstones-srl.it

## LOG GEOFISICI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTERMICA DEL SERBATOIO: IL PROGETTO GEOTERMIA GRADO (GORIZIA, ITALIA)

## WELL LOGGING FOR THE GEOTHERMAL RESERVOIR CHARACTERIZATION: THE GRADO GEOTHERMAL PROJECT (GORIZIA, ITALY)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE Dipartimento di Ingegneria e Architettura

<sup>1</sup> Waterstones S.r.l. Via Bolzano/Bozenstrasse 40, 39044 Egna/Neumarkt (Bz) – Italy <sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Architettura, Università degli Studi di Trieste, Via Valerio 10, 34127 Trieste – Italy

Corresponding author's e-mail: info@waterstones-srl.it

GIANNI PIFFER<sup>1</sup>, MIRKO RINALDI<sup>1</sup>, BRUNO DELLA VEDOVA<sup>2</sup>

## **ESECUZIONE DEI LOG GEOFISICI NEL POZZO GRADO2**

Raggiunta la profondità di perforazione di 1200 m da p.c. con scalpello da 8"<sup>1</sup>/<sub>2</sub> e terminate le operazioni di lavaggio e spurgo del pozzo, la Waterstones S.r.l. ha proceduto all'esecuzione dei logs geofisici principalmente nel tratto di foro scoperto (672.0-1200.0 m da p.c.). All'inizio della registrazione dei logs, il pozzo in erogazione spontanea, era caratterizzato da una portata di 12 L/s.

Le acquisizioni sono state eseguite principalmente in fase di risalita degli strumenti al fine di garantire un tensionamento costante del sistema wireline. I segnali trasmessi e registrati sono stati di seguito processati e riallineati rispetto al piano campagna. Nel corso di ogni discesa è stato eseguito lo zero strumentale della guota di misura sulla flangia di bocca foro del pozzo per poi verificare la differenza in profondità a fine prova.

Le misure geofisiche sono state eseguite nel corso di due fasi temporalmente distinte. Le prove della prima fase, eseguite nel corso di 6 discese, sono state condotte sino alla profondità di 1156.0 m circa a causa dell'occlusione al fondo del foro di sondaggio. Successivamente alle operazioni di ripasso, pulizia ed acidificazione del foro, sono state eseguite le prove della seconda fase nel corso di 3 discese tra la profondità di 1100.0 m sino a fondo foro. Nel corso della prove sono stati acquisiti i seguenti dati:

1. FTC e GR Log: temperatura dei fluidi, conducibilità dei fluidi e radioattività naturale totale

Lo strumento è un assemblaggio tra dispositivi di misura della temperatura, conducibilità dei fluidi presenti nel foro e dell'emissione naturale di raggi gamma totali. La misura è stata eseguita sia in discesa che in salita in entrambi le fasi in modo da misurare i parametri del fluido all'interno della colonna sia in condizioni indisturbate e sia a seguito del rimescolamento causato dal passaggio dello strumento stesso.

All'inizio della prova della fase1 la temperatura a bocca foro era di 42.15°C. L'andamento della temperatura nel tratto in profondità (per le fasi 1-2) è caratterizzato da valori di temperatura di circa 46.4°C all'inizio del tratto scoperto (672.0 m circa da p.c.). Dai dati registrati in entrambe le fasi si osserva che l'intervallo compreso tra 890.0-1004.0 m è caratterizzato dai gradienti termici più elevati all'interno del reservoir geotermico (1.5°C/100m) intercettato dal pozzo Grado2. Gli incrementi osservati sono in relazione ad elementi strutturali in grado di trasportare fluidi a più alta temperatura. Il sensore di conducibilità è sempre stato calibrato con soluzioni campione prima dell'inizio delle prove. All'inizio della discesa della fase 1 a bocca foro è stata rilevata una

livelli argillosi, evaporitici, livelli condensati e hiatus stratigrafici. I bassi valori registrati della radioattività naturale totale confermano la natura carbonatica della seguenza sedimentaria attraversata dal tratto scoperto del pozzo Grado2. L'intervallo compreso tra 600.0-630.0 m con valori leggermente più elevati, per quanto attenuati dal rivestimento, può essere riferito stratigraficamente alla formazione flyschoide di età Eocenica riscontrata nel corso della perforazione del pozzo (F. Podda, comunicazione personale). I picchi rilevati tra 999.5-1011.5 m sino a 160-314API sono del tutto correlabili a quelli riscontrati in altri sondaggi profondi eseguiti in aree adiacenti. Questi marker stratigrafici sono stati localizzati alla transizione Mesozoico-Cenozoico in relazione a particolari concentrazioni di Uranio (Cimolino et al., 2010; Della Vedova et al., 2014).

## 2. Cal Log: diametro del foro

L'utilizzo del calibro meccanico a 4 braccia indipendenti permette il controllo della posizione del rivestimento, del diametro medio del foro scoperto e l'individuazione delle zone maggiormente fratturate. Dall'analisi delle variazioni del diametro medio del foro si ottengono importanti informazioni sulla litologia e sullo stato di fratturazione dei depositi attraversati dal pozzo Grado2. Genericamente il diametro medio misurato (tra 215-375

## 3. NRes e SP Log: resistività normale e potenziale spontaneo

Il Log della resistività normale registra differenti valori di resistività in funzione delle diverse distanze elettrodiche con cui lo strumento è configurato (8" - 16" - 32" - 64"). Durante l'acquisizione è stato anche registrato il potenziale spontaneo utilizzando l'elettrodo a 16". Questi tipi di logs vengono utilizzati nell'interpretazione qualitativa della porosità e permeabilità e quantitativa del contenuto salino dei fluidi presenti all'interno delle formazioni rocciose.

Genericamente la successione calcarea attraversata dal tratto scoperto del pozzo Grado2 è caratterizzata da valori di resistività variabile compresa tra 16-200  $\Omega$ m. Le zone maggiormente fratturate e interessate da circolazione di fluidi producono significative diminuzioni di resistività ed aumento del potenziale spontaneo. Queste porzioni sono contraddistinte da una maggiore porosità e/o permeabilità secondaria e sono associate alla circolazione di fluidi maggiormente conduttivi e mineralizzati. La porzione maggiormente produttiva del reservoir risulta essere quella compresa tra 850.0-1002.0 m mentre le zone superiori ed inferiori contribuiscono in maniera secondaria alla circolazione.

Nel tratto di foro scoperto del pozzo Grado2, il valore del rapporto Vp/Vs è variabile tra 1.60-2.20 confermando la natura prevalentemente calcarea del reservoir geotermico attraversato. Dall'analisi dei dati sonici possiamo affermare che i depositi carbonatici Cenozoici risultano essere contraddistinti da una fratturazione e/o stratificazione maggiormente sviluppate rispetto ai depositi Mesozoici. Queste caratteristiche permettono di individuare, nei depositi Cenozoici tra 740.0 e 1000.0 m, la zona potenzialmente produttiva del reservoir geotermico.

## 5. BHTV e DEV Logs: telecamera acustica e deviazione del pozzo

Questo log permette di ottenere un'immagine a 360 gradi delle pareti del pozzo attraverso la scansione radiale acustica con impulsi ultrasonici. Durante la scansione vengono misurate anche l'inclinazione e la direzione del pozzo. Variazioni fisiche delle pareti del pozzo, quali tessitura e competenza dei depositi, sono visualizzate come variazioni in intensità e contrasto dell'immagine acustica. Fratture, cavità e discontinuità beanti sono associate a riflessioni acustiche d'ampiezza ridotta. Il forte scostamento della porzione compresa tra 760.0-1000.0 m di profondità dal diametro nominale di perforazione ha fortemente limitato la corretta acquisi-

alcune strutture di breakouts con direzione grossomodo E-W e NW-SE indicative di una direzione N-S e NE-SW, di massimo sforzo degli stress orizzontali. Nel complesso i calcari Paleogenici appaiono intensamente alterati e/o tettonizzati in relazione a significativi aumenti del diametro medio del pozzo.

## 6. Spinner Flowmeter Log: velocità dei fluidi con micro mulinello

Questo log prevede l'utilizzo di una sonda con micromulinello dotato di un'elica in grado di ruotare in entrambe le direzioni (senso 'up e 'down' rispettivamente). La registrazione della velocità di rotazione dell'elica è stata esequita sia in discesa che in risalita sull'intero tratto scoperto del pozzo Grado2. La velocità del movimento della sonda nel foro per entrambe le prove è stata mantenuta costante per tutta la durata della prova.

Dall'analisi dei dati registrati possiamo notare che da fondo foro sino alla quota 960.0 m è presente un debole flusso verso l'alto. Da questa quota sino a 890.0 m il pozzo è caratterizzato da un progressivo aumento del flusso verso l'alto. In corrispondenza di guota 890.0 m si assiste ad un repentino aumento del flusso in relazione alla presenza di fratture altamente conduttive. Da questa quota il flusso si mantiene costante verso l'alto con modesti con-

1. Logs di temperatura e conducibilità del fluido in foro e raggi gamma naturali totali (FTC e GR), registrazione in discesa e salita;

- 2. Log calibro meccanico (Cal Log), registrazione in salita; 3. Log resistività normale e potenziale spontaneo (NRes e
- SP Logs), registrazione in salita;
- 4. Log sonico (FWS Log), registrazione in salita;
- 5. Logs scanner acustico radiale e deviazione del foro (BHTV e DEV Logs), registrazione in salita;
- 6. Log con micro mulinello (Flow meter Log), registrazio
- ne in discesa e salita.

aumenta con la temperatura e la salinita' del fluido. Dai dati acquisiti in entrambe le fasi si può notare che l'intervallo compreso tra 890.0 - 975.0 m di profondità, è caratterizzato dalle variazioni più rilevanti all'interno del reservoir geotermico intercettato dal pozzo Grado2. Gli incrementi di conducibilità osservati in questo intervallo verso l'alto sono in relazione all'immissione in pozzo di fluidi a maggiore salinità.

conducibilità di circa 52 mS/cm. La conducibilità dei fluidi

La registrazione della radioattività naturale totale ha permesso di differenziare la litologia delle rocce attraversate dal pozzo Grado2 ed evidenziare la presenza di eventuali

mm) è risultato maggiore di quello nominale dello scalpello (215mm). Sono stati osservati parecchi intervalli con diametro medio maggiore di 300 mm. Questo ha impedito, nel corso della successiva registrazione BHTV, la corretta centralizzazione dello strumento e la regolare acquisizione del caliper digitale. Genericamente il diametro medio registrato per i depositi carbonatici Cenozoici risulta maggiore di quello rilevato nei depositi carbonatici Mesozoici. Questa caratteristica è in relazione ad una maggiore alterazione e/o stratificazione dei depositi Cenozoici ed alla presenza di una fratturazione più sviluppata e pervasiva

4. FWS Log: log sonico Il Log sonico permette di misurare i tempi di transito delle onde di compressione P, delle onde di taglio S e delle onde di Stoneley. L'esecuzione del log sonico in fori scoperti permette l'identificazione delle zone fratturate, la distinzione delle litologie e la determinazione delle variazioni di porosità e permeabilità. Genericamente in ammassi densamente fratturati le velocità di propagazione delle onde e soprattutto delle onde secondarie Vs diminuiscono. Conseguentemente il rapporto tra le velocità Vp/Vs aumenta.

zione dei dati acustici. In particolare lo strumento tende a perdere la centralità sul foro con conseguente scadenza del segnale registrato.

Gli intervalli compresi tra 672.0-760.0 m e tra 1000.0-1200.0 m di profondità appaiono piuttosto competenti e compatti con giunti di stratificazione sub orizzontali, spaziatura 10-20 cm e suddivisioni in bancate plurimetriche nell'intervallo inferiore. Le fratture principali individuate presentano aperture di 30 cm e sono per lo più ad alto angolo (>70°) con direzione sia dinarica che antidinarica. Sono state riconosciute

tributi. La variabilità nella velocità di rotazione osservata tra le quote 860.0 m sino a 726.0 m è per lo più in relazione ai cambiamenti del diametro medio del foro in cui, al diminuire della sezione del pozzo, corrispondono incrementi nella velocità del flusso diretto verso l'alto e viceversa. Si può perciò affermare che, secondo i dati acquisiti, l'intervallo maggiormente produttivo del reservoir sembra essere localizzato tra le guote 960.0-860.0 m di profondità in accordo con le considerazioni indicate dall'analisi dei valori di temperatura e conducibilità dei fluidi rilevati.



5. Geophysical wireline logs in the Grado2 Well Reaching the drilling depth of 1200 m with an 8 "1/2 bit and after the borehole wash, the Waterstones Srl execute the geophysical logs mainly within the non-cased portion (672.0-1200.0 m from ground level). At the beginning of the log records the well was discharging, spontaneous at the borehole head, a flow rate of 12 L/s. The acquisitions were mainly performed raising the tools

from the bottom in order to ensure a constant tensioning of the wireline system. The signals transmitted and recorded were processed and realigned at the ground level. In the course of each run it was performed the instrumental zero on the well head to control the difference in depth at the end of each run itself.

The acquisition were performed in the course of two temporally distinct phases. The tests of the first phase, carried out in 6 runs, have been pushed down to a depth of approximately 1156.0 m due to the occlusion of the borehole. Subsequently to the operations of re-drilling, cleaning and acidification of the hole, have been carried out the tests of the second phase during of 3 runs between the depth of 1100.0 m up to the hole bottom. During the performed runs were acquired: Run1: FTC and GR Logs: fluid temperature-conductivity log e total gamma ray, recorded downward and upward; Run2: Cal Log: mechanical 4 arms caliper, recorded

upward; Run3: Nres and SP Logs: normal resistivity and spontaneous-potential, recorded upward;

Run4: FWS Log:full wave sonic, recorded upward; Run5: BHTV and DEV Logs: acoustic televiewer and hole deviation, recorded upward;

Run6: Spinner flowmeter Log: spinner flow meter, recorded downward and upward.

## 1. FTC e GR Log: temperature and conductivity of the fluids and total gamma ray

The tool is an assembly between the temperature/conductivity device for the borehole fluids and a total natural gamma ray detector. The measurement was performed both downward as upward so as to characterize the fluid parameters within the water column under undisturbed condition as well under disturbed condition due to the fluid mixina.

At the begin of the acquisition phase the temperature at the borehole head was 42.15 ° C. The temperature variation in depth (for phases 1-2) was characterized by values of temperature of about 46.4 ° C at the begin of the non-cased portion (672.0 m from pc). From the recorded data can be noted that the interval between 890.0-1004.0 m is characterized by higher thermal gradients within the geothermal reservoir (1.5 ° C / 100 m) intercepted by the Grado2 well. This increase is related to structural elements capable of transporting high temperature fluids. The conductivity sensor was always calibrated with standard solutions before the acquisition. At the beginning of the records has been detected a conductivity of about 52 mS/cm at the borehole head. Generally, the fluid conductivity increases with temperature and salinity. From the acquired data it can be noted that the range between 890.0-975.0 m deep, is characterized by the most significant conductivity variations within the geothermal reservoir. The observed conductivity changes upwards, within this interval, are related to the input of high salinity fluids. The recording of the total natural radioactivity allowed to

differentiate the rock's lithology within the Grado2 well. This acquisition is useful to detect any clay level, evaporite, condensate levels and stratigraphic hiatus. The low values of the total natural radioactivity confirm the carbonate nature of the sedimentary sequence crossed by the Grado2 well. The range between 600.0-630.0 m with slightly higher values, as mitigated by the casing, corresponds stratigraphically to the Eocene flysch sediments reported during the drilling phase (F. Podda, personal communication). The peaks detected between 999.5-1011.5 m up to 160-314 API are correlate to those found in other deep well in adjacent areas. These stratigraphic markers are collocated to the Mesozoic-Cenozoic transition in relation to significant concentrations of Uranium (Cimolino et al., 2010; Della Vedova

## 2. CAL Log: borehole diameter

et al., 2014).

The use of the 4 arms mechanical caliper allowing control of the casing position, the measure of the hole average diameter and the identification of the most fractured portions. The analysis of the average diameter of the hole provide important information on the lithology and on the fracturing status of the crossed sequence by the Grado2 well. Generally the measured average diameter (between 215 to 375 mm) was higher than the nominal bit (215mm). They have been observed several intervals with a average diameter greater than 300 mm. This prevented, during the next BHTV run, the proper centralization of the tool and the acquisition of the digital caliper. Generally the average diameter recorded for Cenozoic limestone is greater than that for the Mesozoic limestone. This feature is related to more stratified and/or weathered rocks linked to well developed and pervasive fracturing systems

## 3. NRes and SP Logs: normal resistivity and self potential Logs

The normal resistivity Log records different values of resistivity as a function of the tool configuration and the electrode distances (8 "- 16" - 32 "- 64" electrodes). During the acquisition it was also recorded the spontaneous potential using the electrode 16 ". These types of logs are used for the qualitative and quantitative interpretation of porosity and permeability and to evaluate the fluid's quality contained in the rock formations.

Generically the limestone succession crossed by the Grado2 well is characterized by resistivity values variable between 16-200  $\Omega$ m. The most fractured portions are characterized by circulation of fluids that produce significant decreases in resistivity and increase of spontaneous potential. These are characterized by a higher porosity and/or secondary permeability, and are associated with the movement of conductive and mineralized fluids. The most productive part of the reservoir seems to be that between 850.0-1002.0 m deep while the upper and lower portions contribute less to the overall fluid circulation.

## 4. FWS Log: full wave sonic

The sonic Log allows to measure the transit times of the compression waves P, shear waves S and Stoneley waves. The execution of the sonic log in non-cased holes allows the identification of fractured zones, the lithology distinction and the determination of the porosity and permeability variations. Generically in densely fractured rocks the wave speed decrease especially involving the shear waves Vs. Consequently, the ratio between the wave speeds Vp/Vs increases.

In the non-cased section of Grado2 well, the value of the Vp/Vs ratio is variable between 1.60-2.20 confirming the carbonate nature of the geothermal reservoir. Analyzing the sonic data we can note that the Cenozoic succession appear to be characterized by a well developed layering and/or fracturing than the Mesozoic succession. These features allow to locate, in the Cenozoic succession between 740.0 and 1000.0 m deep, the potentially most productive zone of the geothermal reservoir.

## 5. BHTV e DEV Logs: acoustic televiewer and borehole deviation

This tool allows to record a 360° scanning acoustic view of the well's wall by ultrasonic pulses. During of the image acquisition are also measured the inclination and the direction of the well. Physical variations of the well's wall, such as texture and competence of the rock formations, are displayed as variations in intensity and contrast of the acoustic signal. Fractures, cavities and discontinuities are associated with low amplitude acoustic reflections. The strong deviation of the well diameter from the nominal drilling bit (between 760.0-1000.0 m depth) has greatly limited the correct acquisition of acoustic data. In particular, the tool tends to lose the central position inside the hole with consequent decay of the recorded signal. The intervals between 672.0-760.0 and 1000.0-1200.0 m deep appear rather competent and compact with limestone showing well developed sub horizontal bedding joints spacing 10-20 cm and few meters thick strata in the bottom interval. The major observed fractures have a thickness up to 30

cm and are mostly high-angle structures (> 70 °) with both

dinaric as anti-dinaric direction. Were recognized some breakouts structures indicative of N - S and NE - SW, maximum effort of the horizontal stress. The paleogenic limestone appear intensely altered and/or tectonized in relation to a significant increases in the average diameter of the well.

## 6. Spinner Flowmeter Log: flow speed measurement

This log provides the use of a tool equipped with a impeller able to rotate in both directions (direction 'up and' down 'respectively). The recording of the rotational speed of the impeller was performed both downward and upward along the non-cased portion of the Grado2 well. The advancement speed of the tool was maintained constant for both tests.

Analyzing the recorded data we can note that the bottom portion of the well up to 960.0 m deep is characterized by a weak upward flow. From 960.0 m up to 890.0 m deep, is noted a progressive increase of the upward flow. The 890.0 m depth is identified by an abrupt increase of the flow rate in relation to a highly conductive fracture system. From this deep the flow rate remains more o less constant upward with just minor contributions. The variability in the rotation speed observed between 860.0 -726.0 m deep is mostly linked to the changes in the hole diameter in which, with the decreasing of the well section, corresponds to an increase of the speed for the upwards flow and vice versa. It can therefore be said that, according to the acquired data, the more productive interval of the reservoir appears to be localized between 960.0-860.0 m deep also in accordance with the temperature and con-

ductivity gradients.