LA GESTIONE DELL'INFORMAZIONE GEOGRAFICA NEL PROGETTO DELLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO

Pierluigi SIBILLA(*), Franco GUZZETTI (**)

(*) Galleria di Base del Brennero–Brenner Basistunnel BBT SE
(**) DIIAR - Politecnico di Milano – franco.guzzetti@polimi.it

Riassunto
Il progetto di una grande infrastruttura ferroviaria come la galleria di base del Brennero richiede un rigoroso lavoro di inquadramento geodetico su cui impostare tutte le altre indagini geografiche. Queste problematiche sono poi esasperate quando si lavora in un'area trasfrontaliera con riferimenti cartografici e altimetrici differenti. Devono sempre essere possibili i riagganci a cartografie e dati impostati nei rispettivi riferimenti nazionali.
Di seguito sono descritti i lavori geodetici di inquadramento e le applicazioni più propriamente topografiche e cartografiche eseguite in questi 6 anni a supporto della progettazione che è oramai alla fase esecutiva.

Abstract
The project of a big railway infrastructure like Brenner Basis Tunnel asks a rigorous geodetic network to plan all the other geographic information. This become a big problem when you work in a frontier's area with different altitude and cartographical reference systems. It will be always possible to transform each data into the national reference system.
In the presentation are described the geodetic network and the topographic and cartographic applications made in this six years to support the pipe project that now is in an executive step.

Rete geodetica d'inquadramento e di raffittimento

Al fine di garantire una omogeneità per tutte le attività transfrontaliere di rilevamento topografico e geodetico si è realizzata una *"rete geodetica d'inquadramento"*. Prima di progettare la nuova rete trasfrontaliera si è provveduto al recupero ed alla analisi di tutte le informazioni geodetiche esistenti nel territorio interessato, sia in Nord Tirolo che in Alto Adige (reti geodetiche GPS, reti trigonometriche classiche, linee di livellazione di alta precisione).
Il BBT, l'Ufficio regionale tirolese (Ripartizione topografia e geologia), l'Ufficio per il rilevamento geodetico della Provincia di Bolzano (Regione Autonoma Trentino - Alto Adige) e la Ripartizione Forestale della Provincia Autonoma di Bolzano hanno progettato e materializzato una rete di 28 vertici (vedi figura 1). Ove possibile sono stati utilizzati vertici già esistenti; i nuovi vertici sono stati realizzati secondo il tipo utilizzato in Nord Tirolo, mettendo in opera dei piastrini rimovibili appositamente ideati.
Le misure GPS (anno 2000) sono state realizzate in modalità statica stazionando in contemporanea 28 ricevitori. La durata ininterrotta delle osservazioni è stata di 2x16 ore, mentre per i punti principali si è aumentata ulteriormente la durata fino a 2x23 ore. L'elaborazione dei dati satellitari è avvenuta nel sistema geocentrico cartesiano ITRF94 nell'epoca 1996,45. La scelta di questo sistema di riferimento ha permesso un inserimento privo di tensioni alla rete austriaca GPS AREF.
La prima fase di calcolo è consistita nella verifica delle coordinate dei punti di riferimento ricavate dalla rete AREF per la definizione di possibili spostamenti dei vertici esistenti. Successivamente sono state utilizzate le coordinate della rete di base AREF dei punti A125 (30-147-A1) e A128 (21-

148-B1) per la definizione di tutti gli altri vertici. Le coordinate della stazione permanente di Bolzano sono state, in questa occasione rideterminate sulla base di osservazioni congiunte con le altre stazioni permanenti della rete internazionale I.G.S.

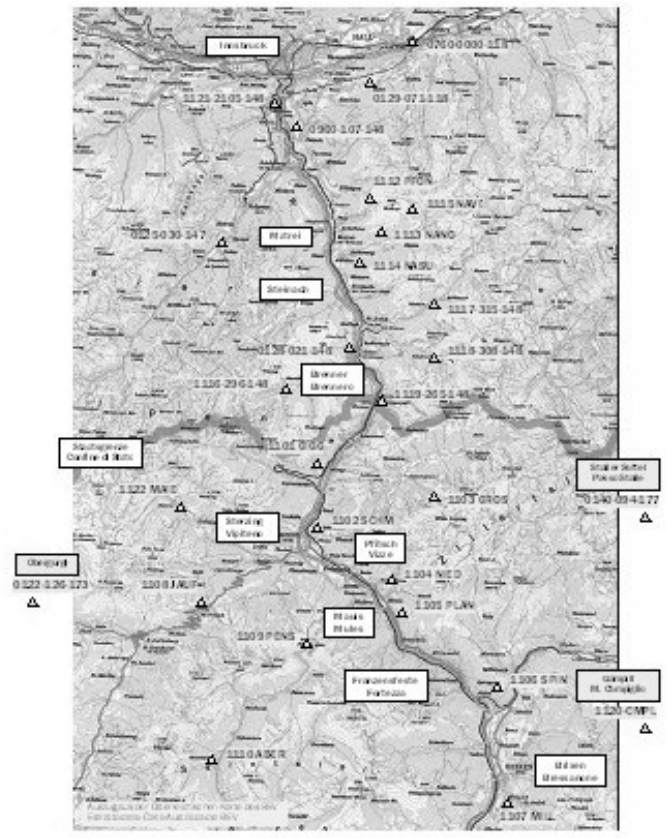


Figura 1 – Schema della nuova rete geodetica

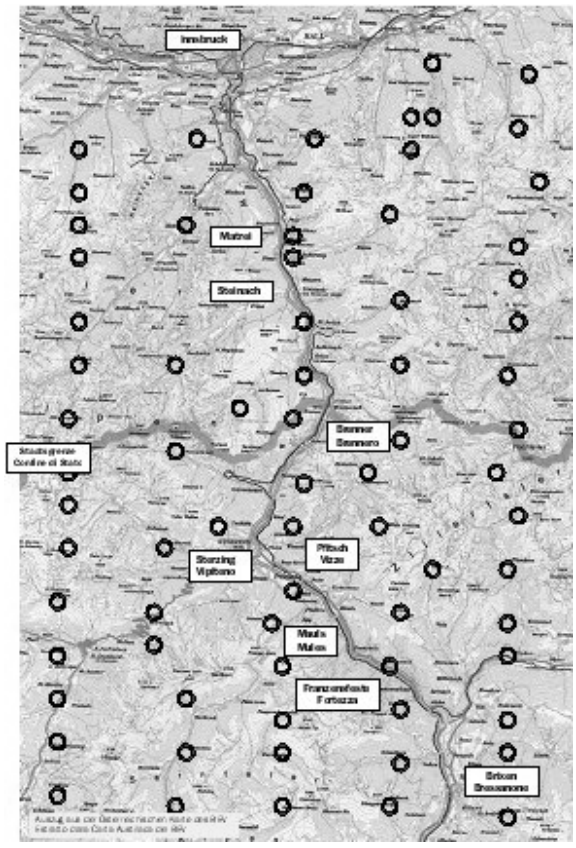


Figura 2 – Disposizione dei punti d'appoggio

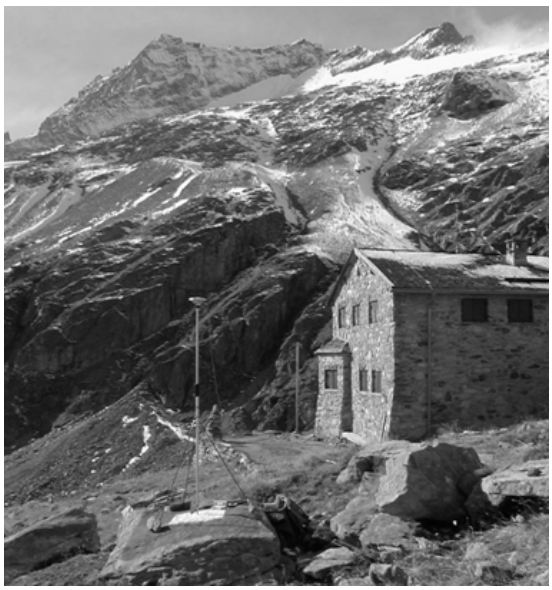
Il passaggio dalle coordinate ITRF al sistema austriaco è stato stimato tramite una trasformazione a 7 parametri usando i punti AREF. L'analoga trasformazione per il territorio italiano è stato fornita dalla Regione Trentino - Alto Adige. Per passare dalle quote ellissoidiche a quelle ortometriche è stato utilizzato in prima approssimazione il geoide europeo EGG97 dal quale si sono desunti i valori dell' ondulazione geoidica.

Nell´autunno 2001, si sono materializzati e rilevati con GPS altri 30 vertici di raffittimento in Nord Tirolo e 18 vertici in Alto Adige al fine di coprire soprattutto le zone critiche dei due portali e delle finestre laterali della galleria. Un ulteriore raffittimento eseguito con le stesse modalità nell'autunno 2004 ha aggiunto alla rete ulteriori 20 vertici in Nord Tirolo e 15 vertici in Alto Adige ed ha permesso di avere nelle zone dei cantieri almeno 3 vertici di rete con una mutua distanza massima pari ad 1 Km.

Per l'appoggio delle riprese aeree tra Innsbruck e Bressanone (63x40 km), sono stati scelti e materializzati ai margini delle previste strisciate 72 gruppi di punti d'appoggio (figura 2) ciascuno formato da una serie di 3 o 4 punti fotografici. La segnalizzazione a terra dei punti è stata eseguita dal Governo Regionale Tirolese (ripartizione di topografia e geologia) e dall´Ufficio forestale della Provincia Autonoma di Bolzano, ciascuno per il territorio di competenza (figura 3). La misura GPS è stata eseguita in modalità statica con stazionamenti da 20 minuti. L'elaborazione di raffittimento ed appoggio è avvenuta vincolando il calcolo alla rete d'inquadramento.

Determinazione altimetrica mediante livellazioni geometriche e misure gravimetriche

I sistemi altimetrici di riferimento esistenti in Itali ed in Austria sono riferiti a mereografi differenti.



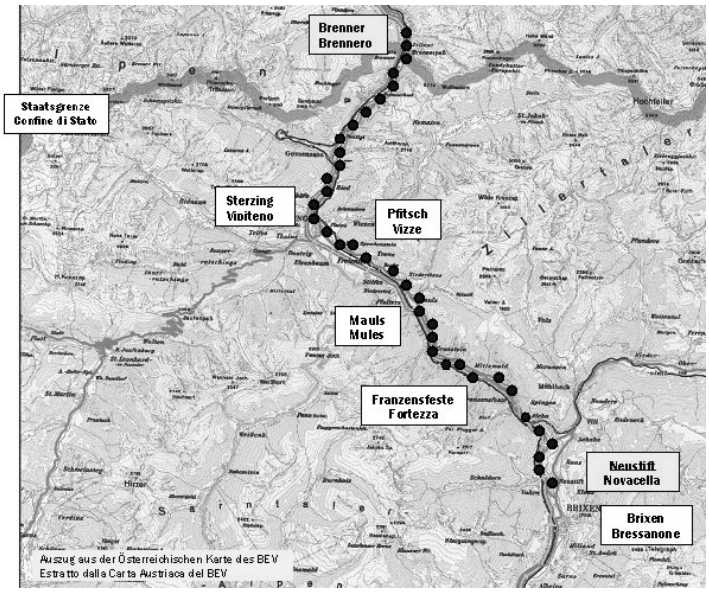


Figura 3 – Punto di appoggio pre segnalizzato Figura 4 – La rete di livellazione di alta precisione

Il livello di mantenimento del dato altimetrico, soprattutto in territorio italiano, non garantiva sufficiente sicurezza per la gestione delle operazioni di cantiere. Per tali motivi si è deciso di restaurare e misurare la linea di livellazione di alta precisione dal Brennero a Bressanone (Km 41- v.figura 4) e successivamente da Brennero a Steinach (Km 13) con riferimento nel sistema altimetrico europeo (UELN – United European Leveling Network). La linea si sovrappone per un tratto alla linea di livellazione dell´Ufficio federale austriaco di pesi e misure BEV (Innsbruck – Brennero).

L'obiettivo era quello di creare, tra i due portali della galleria in progetto, una rete di capisaldi altimetrici di precisione omogenea nel sistema altimetrico ortometrico e riferita al mareografo di Amsterdam. Per definire detta rete era necessaria la conoscenza dei valori di gravità dei capisaldi altimetrici ed il calcolo della gravità media con l'ausilio di un modello altimetrico adeguato.

Le misurazioni della gravità relativa necessarie allo scopo sono state eseguite dal 6 al 12 settembre 2001 con il gravimetro relativo LCR-D51.

Per una migliore interpretazione dei fenomeni geodetici, in particolare per verificare le ondulazioni del geoide, sono stati misurati alcuni capisaldi della rete di base nella zona Innsbruck - Brennero, le cui quote erano state determinate con GPS ed collegate alla rete di livellazione. Le quote dei punti non accessibili al gravimetro o in cui le condizioni di misurazione risultavano inadeguate, sono state interpolate facendo ricorso al calcolo del campo di Bouguer. Si è lavorato su 30 punti complessivi, 19 dei quali sono stati misurati. I valori geopotenziali C sono stati determinati partendo dal nodo UELN 2002 a Innsbruck, sommando le differenze di quota livellate, moltiplicate con i rispettivi valori medi di gravità superficiale ($C= \sum(g_m \cdot \Delta h)$). Il calcolo delle quote ortometriche è stato effettuato dividendo i valori delle quote per i relativi valori medi della gravità media (C/g*).

Dalla propagazione degli errori e presupponendo un σ_0 pari a ±0.8 mm/km, risulta un errore medio di ± 10 mm per i dislivelli misurati tra Innsbruck e Novacella/Bressanone. Al passo del Brennero, considerando la differenza di quota, sono da stimare ulteriori 0.01 mm per ogni metro di dislivello (rifrazione, influsso della temperatura, ecc.), per una accuratezza media di ±15 mm.

Per la determinazione dei valori di gravità assoluta sono state realizzate 7 stazioni nella zona di progetto. La determinazione della gravità assoluta è stata eseguita dal BEV nel periodo dal 4 al 30.9.2001 mediante il gravimetro assoluto a caduta libera JILAg-6. Questo apparecchio permette di osservare la caduta libera di un grave direttamente con l'ausilio di un interferometro di Michelson. L'impiego di un oscillatore al quarzo e al rubidio permette una precisione della grandezza temporale dell'ordine di 10^{-10} sec. Disturbi nella zona della stazione e nelle adiacenze riducono la

suddetta precisione sino a 10^{-7} con riferimento all'osservazione singola. Un elevato numero di prove di caduta (dai 2000 ai 4000 lanci) durante un periodo di osservazione di 12 – 24 ha permesso un aumento statistico della precisione sino a $4 \cdot 10^{-9}$ del relativo valore di stazione.

Geoide dell'area di progetto

Visto che non era pensabile servire di quota ortometrica ottenuta mediante livellazione geometrica alcuni dei punti strategici per le operazioni di tracciamento e scavo del tunnel, si è optato per la determinazione locale di un geoide di precisione (DIIAR del Politecnico di Milano). In tal modo sarà possibile ricavare le quote ortometriche anche a partire da misure GPS collegate alla rete d'inquadramento.

L'analisi preliminare sui dati ha dimostrato che la densità dei dati di gravità nell'area italiana non era sufficiente per la stima di un geoide di precisione. Il data base relativo al territorio italiano è stato quindi opportunamente implementato dal BBT con le misure prima descritte. Il DTM austriaco e quello italiano sono abbastanza omogenei, almeno relativamente ai dati necessari per stimare il geoide. I due DTM nazionali, che sono nei rispettivi sistemi locali, sono stati trasformati nel sistema WGS84 e combinati tra loro mediante interpolazione bilineare. Come detto, alla fine di questo processo si è ottenuto un unico DTM con risoluzione di 100 m. Per quanto riguarda la gravità dopo le opportune trasformazioni si è arrivati a dati su di una griglia quasi regolare di 3'x3'. Il data base gravimetrico così definito contiene 1934 valori.

Si sono utilizzati diversi metodi di stima del geoide. L'ondulazione geoidica è stata stimata nell'area da 46°25' a 47°75' di latitudine e da 10°75'a 12°25' di latitudine su di una griglia geografica regolare di 3'x3' centrata sul Brennero. Il geoide più preciso, riportato nella figura 5 è stato ottenuto con la metodologia TOPOISO/LSC. Gli sqm dei residui sui 27 punti di stima sono pari a 4.9 cm con valori massimi pari a 12.5 cm. Infine la stima di geoide è stata trasformata sulle quote ortometriche UELN e sull'ellissoide WGS84 sfruttando gli unici 8 punti utilizzabili a tale scopo; per una stima più affidabile ci si sarebbe dovuti appoggiare ad un numero di punti superiore con disposizione più adeguata.

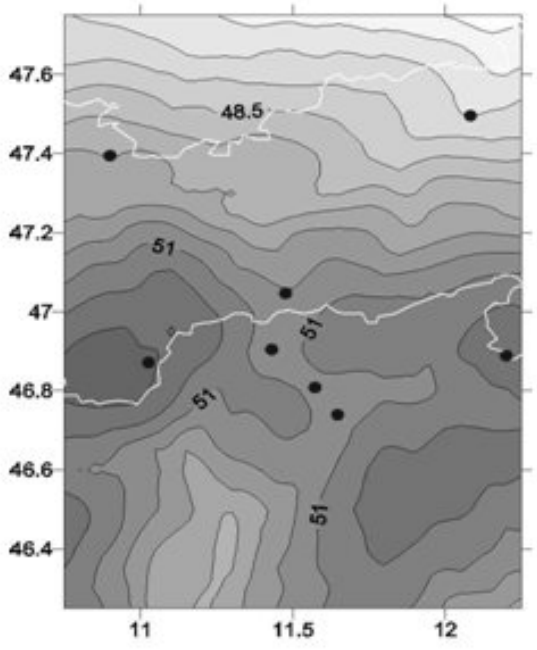


Figura 5 – Il modello di geoide locale

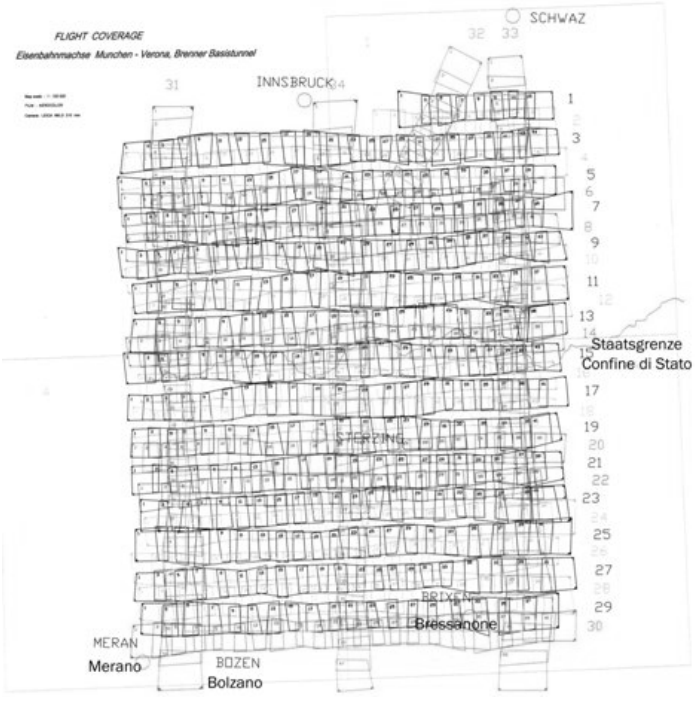


Figura 6 – Il volo fotogrammetrico

Volo fotogrammetrico, DTM, ortofoto e cartografia

Al fine di realizzare una ortofoto ed una cartografia numerica alla scala 1:5000 dell'area interessata al progetto è stato realizzato un volo fotogrammetrico (figura 6) su di un'area di circa 40x60 km.

Il volo è stato eseguito nei giorni 8, 9 e 10 settembre 2000 con una camera da 215 mm, realizzando fotogrammi a scala media 1:16600. In totale si tratta di 1496 km di volo per 1328 fotogrammi. Il territorio di volo contiene i settori geografici che progressivamente vanno dalla zona di Innsbruck verso sud attraverso la Wipptal (Tirolo-Austria), la valle d'Isarco fino alla zona di Bressanone (Alto Adige). Nell'estensione est-ovest sono state incluse, le valli laterali ad est del solco del Brennero, determinanti per il progetto, fino alla chiusura di ciascuna valle nella sua parte superiore, comprese le creste montagnose che la delimitano.

I punti d'appoggio, come già descritto, sono stati materializzati prima del volo. Sono stati utilizzati per realizzare una triangolazione aerea per tutto il blocco, necessaria alle successive operazioni di restituzione.

Dai dati riguardanti l'altezza relativa media di volo si può valutare pari a circa 20 cm l'accuratezza planimetrica e a 35 cm quella altimetrica, naturalmente per punti ben identificabili. Tali valori sono validi solo in condizioni ottimali e pertanto date le asperità del territorio sorvolato ed altri fattori non proprio ottimali l'errore medio raggiungibile sarà di circa 50 cm in planimetria e di circa 80 cm in altimetria con qualità più scadenti nei fondovalle (scala più piccola ed eccessiva sovrapposizione delle foto). Nelle zone di ombra e nei boschi fitti i valori di precisione sono chiaramente inferiori.

Per la parte austriaca il DTM è stato acquistato dal BEV. Per il territorio italiano il DTM è stato realizzato utilizzando il sistema SCOP a partire dai fotogrammi aerei. Nella parte italiana è stato restituito u punto al massimo ogni 25 metri circa, assieme a breal lines e a ridge lines. La ricchezza di elementi ha permesso di calcolare in genere un DTM con griglia pari a 10 m e, in alcune parti, un DTM con griglia a 5 m (figura 7).

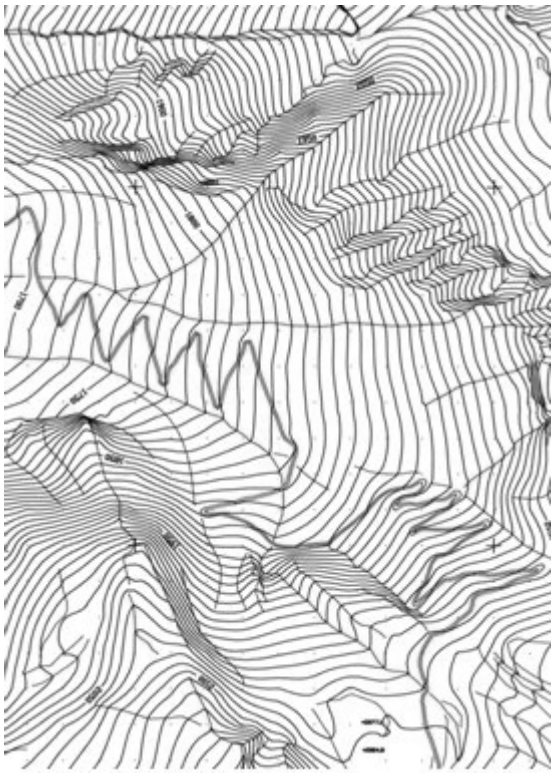


Figura 7 – Gli elementi rilevati per determinare il DTM

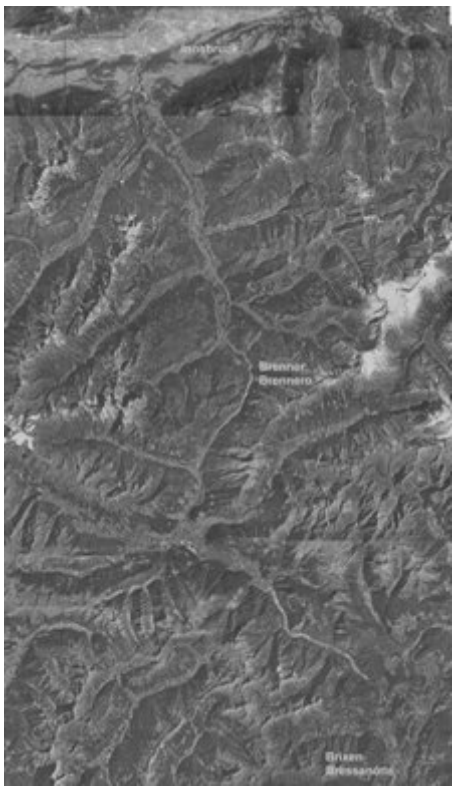


Figura 8 – L'ortofoto figitale

I fotogrammi interessati sono stati digitalizzati con una risoluzione di 14 μm con l'ausilio di un scanner fotogrammetrico di alta precisione (Zeiss SCAI). Le ortofoto digitali sono state eseguite

con i sistemi PHODIS-OP (Zeiss) e MGE Base Rectifier (Intergraph), sfruttando i parametri di orientamento dalla triangolazione aerea.
Su di un'area di circa 655 km^2 si è proceduto anche alla realizzazione di una restituzione vettoriale che è servita a produrre dei prodotti cartografici. Da tali informazioni è stato anche possibile derivare delle ortofotocarte a differenti scale Tutte le produzioni sono state realizzate alla scala 1:5000 in UTM-WGS84 ma sono anche state redatte rappresentazioni a scala 1:25000 e 1:50000 in Gauss- Krüger e in Guass-Boaga.
I prodotti cartografici sono successivamente stati trasformati in una struttura shape adatta al supporto di un Gis, realizzando una completa copertura areale di tutto il territorio nel rispetto di alcuni basilari vincoli topologici, secondo le indicazioni previste in tal senso dalla Provincia di Bolzano e dal Consorzio dei Comuni della Provincia di Bolzano.
In questo senso è anche interessate ricordare il lavoro relativo alla toponomastica, per recuperare in modo ufficiale i toponimi originari sia per il Sud Tirolo che per la parte di territorio austriaco.

Rilievo del portale d'ingresso Sud e celerimensure locali
Alcune attività sono state finalizzate a prodotti cartografici numerici finalizzati alle opere di scavo.
In particolare è stato realizzato un dettaglio rilievo aerofotogrammetrico a scala 1:1000 per l'area di Fortezza interessata dal portale sud della galleria di base del Brennero. L´altezza relativa di volo media è stata di 1170 m con camera da 300 mm per una scala media dei fotogrammi di 1:3900.
Tale rilievo è stato supportato da una celerimensura finalizzata agli impianti ferroviari di Fortezza a ad alcune zone di territorio. Ovviamente il livello di precisione dei dure rilievi è nettamente superiore a quello realizzato su tutta l'area interessata dal progetto; a tal fine si è integrato il lavoro con una dettagliata fase di ricognizione sul terreno.
Per lo studio dei progetti definitivi dei depositi e dei portali della galleria principale e dei cunicoli esplorativi si sono realizzati una serie di rilievi celerimetrici con l'accuratezza idonea per una carta in scala 1:500. A tale scopo sono stati rilevati complessivamente circa 586 ettari in territorio austriaco e 344 ettari in territorio italiano.
Per tali rilievo è stato necessario eseguire ulteriori misure di dettaglio con GPS, inquadrate nella rete geodetica precedentemente descritta, per arrivare a disporre di una serie di vertici utilizzabili anche con stazioni locali, che permettessero di inquadrare il rilievo nel sistema di riferimento di progetto. Per ogni area di rilievo è stato poi realizzato un DTM di dettaglio che è stato passato ai progettisti dell'infrastruttura per la dettagliata previsione dell'organizzazione dei cantieri.
I risultati sono stati predisposti in modo tale da permettere la loro integrazione nel sistema geografico di informazione (GIS) di BBT SE rispettando comunque la struttura dei layer prescritta (AutoCAD – ESRI – ArcInfo).

Conclusioni
Il fascino di una grande opera di ingegneria si trasmette su tutte le operazioni geodetiche e cartografiche necessarie al supporto della progettazione. Aldilà dei prodotti realizzati, l'esperienza di lavoro in un progetto di queste dimensioni, con il grosso problema costituito dal territorio transfrontaliero, indaco storicamente in sistemi cartografici differenti, è stata l'occasione per riprendere in mano numerosissime tecniche mensorie da organizzare per le moderne metodologie di rilievo e di tracciamento.
In questo senso è da ricordare come caratterizzante la scelta di implementare già in fase di progetto un Gis che segua e guidi tutta l'operazione di costruzione, garantendo la trasparenza e la disponibilità dei dati geografici a tutti gli attori in gioco. Di questo parlerà un'altra presentazione.

Fonte delle illustrazioni: "Galleria di Base del Brennero-Brenner Basistunnel BBT SE "