



La quantificazione delle emissioni di CO₂ derivanti dalla costruzione di una galleria ferroviaria: il tunnel di base del Brennero

Quantification of CO₂ emissions deriving from the construction of a railway tunnel: the Brenner base tunnel

Dott. Ing. Federica MAINO^(*)
Dott. Arch.. Federico CAVALLARO^(**)

1. Premessa

Il presente contributo propone un metodo per il calcolo e la valutazione delle emissioni di CO₂ derivanti dalla realizzazione di una grande opera infrastrutturale. Il metodo si basa su un *Hybrid Life-Cycle Assessment*, che considera le specificità territoriali e geografiche nel calcolo dei consumi energetici e delle relative emissioni. Vengono identificate quattro macro fasi del processo di realizzazione (scavo, produzione e applicazione dei materiali da costruzione, operatività delle gallerie e dei cantieri), ciascuna delle quali è scomposta in specifiche sotto-attività. Il metodo viene testato sul tunnel di base del Brennero, per il quale si stimano emissioni pari a 2,28 Mt CO₂. La maggior parte di esse (85%) deriva dalla produzione di calcestruzzo e acciaio, mentre le altre fasi contribuiscono in misura più limitata. I risultati sono utili in fase di ottimizzazione dei processi realizzativi, fornendo indicazioni sui fattori da considerare per ridurre le emissioni di CO₂. Inoltre, il metodo può servire ai decisori per una valutazione delle politiche trasportistiche più attenta alle problematiche ambientali.

Parole chiave: tunnel ferroviario, fase di costruzione, emissioni CO₂, Hybrid LCA, linea AV/AC Brennero.

2. Introduzione

I trasporti rivestono un ruolo chiave per limitare le conseguenze derivanti dal riscaldamento globale: essi sono infatti responsabili per circa il 26% delle emissioni di gas serra (GHG) e le loro emissioni sono in continua crescita (+30% rispetto al 1990 [1]). L'anidride carbonica

1. Foreword

This paper proposes a method for the calculation and evaluation of CO₂ emissions resulting from the implementation of a large-scale infrastructure. The method is based on a Hybrid Life-Cycle Assessment, which considers the territorial and geographical characteristics in the calculation of energy consumption and associated emissions. It identifies four macro phases of the construction process (excavation, production and application of building materials, operability of tunnels and construction sites), each of which is broken down into specific sub-activities. The method is tested on the Brenner base tunnel, for which emissions equal to 2.28 m of CO₂ are estimated. The majority of them (85%) derives from the production of concrete and steel, while the other phases contribute to a more limited extent. The results are useful in the process of optimisation of the implementation processes, providing guidance on factors to consider in order to reduce CO₂ emissions. In addition, the method can serve to decision makers for an assessment of transport policies that is more attentive to environmental issues.

Keywords: railway tunnel, construction phase, CO₂ emissions, Hybrid LCA, Brenner HS/HC line.

2. Introduction

Transport plays a key role in limiting the consequences of global warming: it is indeed responsible for about 26% of greenhouse gas (GHG) emissions and their emissions are increasing (+30% compared to 1990 [1]). Carbon diox-

^(*) EURAC European Academy of Bolzano – Institute for Regional Development and Location Management.

^(**) IUAV, Università di Venezia.

^(*) EURAC European Academy of Bolzano – Institute for Regional Development and Location Management.

^(**) IUAV, University of Venice.

(CO₂) riveste un ruolo preponderante, costituendo circa il 75% di tutti i GHG [2].

Per contrastare tale tendenza, l'Unione Europea [3] ha proposto un modello di crescita volto a favorire i mezzi di trasporto più sostenibili e meno impattanti da un punto di vista delle emissioni di sostanze inquinanti. Nel caso del trasporto terrestre, ciò coincide con la ferrovia [4].

Con tale scopo, sono stati ideati i corridoi TEN-T (Trans-European Networks-Transport), reti transnazionali di collegamento tra le principali città europee [5]. Nelle sue tratte principali, la rete TEN-T è prevista operativa entro il 2030 ed entro il 2050 le ferrovie Alta Velocità/Alta Capacità (AV/AC), assi portanti di tali reti, devono diventare il mezzo di trasporto maggiormente utilizzato per gli spostamenti di medio raggio. A seguito di tali decisioni, negli ultimi anni gli investimenti a favore del potenziamento ferroviario sono stati significativi e dovrebbero portare all'ammodernamento o alla costruzione di nuove linee transnazionali.

Nei tratti in cui attraversano le Alpi, queste linee necessitano di gallerie di base, ovvero tunnel che corrono in piano o con pendenze limitate, tali da consentire ai treni una prestazione costante a fronte di un'orografia più complessa. Queste opere ingegneristiche sono tanto complesse da un punto di vista tecnico, quanto di difficile valutazione rispetto agli impatti che producono. Si conoscono infatti le principali caratteristiche tecniche: costi (presunti), tempi di realizzazione, durata dei lavori, risparmio in termini di tempo, ma gli impatti a livello territoriale e ambientale sono di più difficile valutazione e non sempre vengono analizzati in maniera esaustiva.

A livello normativo, la valutazione di impatto ambientale (VIA) e la valutazione ambientale strategica (VAS) sono gli strumenti predisposti all'analisi di questi aspetti. Tuttavia, nella pratica, essi si soffermano perlopiù su problematiche relative all'impatto paesaggistico e alle risorse naturali, spesso trascurando la parte relativa agli impatti energetici e agli inquinanti atmosferici che ne derivano. Ciò è dovuto anche alla mancanza di una metodologia condivisa.

In alcune memorie ([6], [7]) è stata definita una metodologia per la quantificazione delle emissioni di CO₂ derivanti da una nuova linea ferroviaria come strumento integrativo rispetto alla VIA. In [8] è stato valutato l'impatto in termini di CO₂ relativo all'introduzione di una nuova infrastruttura di trasporto in un territorio. In particolare, considerando diversi scenari di traffico sul lungo periodo, è stata considerata l'opportunità o meno di realizzare l'opera e si è stimato il potenziale risparmio di CO₂.

Il presente contributo si propone di approfondire la fase di costruzione dell'opera, con la definizione delle sue operazioni principali e le relative modalità di calcolo delle emissioni di CO₂. L'obiettivo è quello di fornire una metodologia esaustiva e replicabile per valutare e monitorare le emissioni anche durante la realizzazione dell'opera. Differenziandosi dai tradizionali approcci di *Life-Cycle Assessment* (LCA), la valutazione si basa su un *Hy-*

ide (CO₂) plays a major role, forming about 75% of all GHG [2].

To contrast this trend, the European Union [3] proposed a growth model aimed at promoting more sustainable and less impacting transport means from the point of view of emissions of pollutants. In the case of land transport, this coincides with conventional rail [4].

With this purpose, TEN-T (Trans-European Networks-Transport) corridors, transnational networks were designed linking major cities in Europe [5]. In its main routes, the TEN-T network is planned to be operational by 2030 and the High Speed/High Capacity railways (HS/HC) by 2050, cornerstones of such networks, must become the most widely used means of transport for medium range travel. Following these decisions, in recent years, investments in favour of railway development were significant and should lead to the modernisation or construction of new transnational lines.

In sections where they cross the Alps, these lines need base tunnels, or tunnels that run flat or with limited gradients, such as to enable trains to travel at constant performance in the face of a more complex orography. These engineering works are equally complex from a technical standpoint, as difficult to assess compared to the effects they produce. In fact the main technical characteristics are known: (alleged) costs, lead times, duration of the works, time-saving, but the impacts on the territory and the environment are more difficult to evaluate and not always analysed exhaustively.

At a regulatory level, the environmental impact assessment (EIA) and Strategic Environmental Assessment (SEA) are the instruments available for the analysis of these aspects. However, in practice, they dwell mostly on issues concerning the landscape and natural resources impact, often neglecting that part relating to the resulting energy and air pollutants impacts. This is also due to the lack of a common methodology.

In some essays ([6], [7]) a methodology for quantifying CO₂ emissions resulting from a new railway line was defined as a complementary tool compared to the EIA. In [8] the impact in terms of CO₂ relating to the introduction of a new transport infrastructure in the territory was assessed. In particular, considering different scenarios of traffic in the long term, the opportunity or not to build the work was considered and the potential CO₂ savings were estimated.

This paper aims at examining the construction phase of the work, with the definition of its main operations and the related CO₂ emissions calculation methods. The aim is to provide a comprehensive and replicable methodology to assess and monitor emissions even during the project execution. Differentiating itself from the traditional approaches of Life-Cycle Assessment (LCA), the assessment is based on a Hybrid LCA [9], a method that takes into account the

brid LCA [9], metodo che tiene in considerazione le particolarità del processo di costruzione, il contesto territoriale e le specificità geografiche. Tale approccio è stato già adottato per alcuni sistemi infrastrutturali quali i ponti [10] o la pavimentazione autostradale [9], ma non ci sono in letteratura studi analoghi riguardante la realizzazione di gallerie.

L'articolo è strutturato nel seguente modo: nel paragrafo 3 vengono descritte le fasi per il calcolo delle emissioni, mentre nel paragrafo 4 la metodologia viene testata sul caso studio della galleria di base del Brennero. Il paragrafo 5 è dedicato ad un riepilogo delle emissioni complessive e a un confronto rispetto alla fase di esercizio. Alcune note finali, comprensive di indicazioni in termini di replicabilità e adattabilità in altri contesti, concludono il contributo.

3. Metodologia di calcolo

Il metodo per calcolare le emissioni di CO₂ derivanti dalla realizzazione di un tunnel ferroviario differisce dalle tradizionali valutazioni LCA di un prodotto perché il risultato non presuppone assunzioni universalmente valide da un punto di vista energetico, né il ricorso a valori adottabili in ogni contesto. La costruzione di un tunnel ferroviario è il frutto di un processo che si compone di una serie articolata di operazioni, macchinari e materiali, la cui scelta solitamente dipende dai progettisti e dalle ditte esecutrici, oltre che dalle indicazioni normative. Inoltre nella determinazione dei consumi energetici e delle relative emissioni, bisogna considerare il contesto territoriale in cui l'opera viene realizzata. L'approccio *Hybrid* LCA prevede inizialmente l'identificazione delle macro fasi che compongono il processo. Per quanto riguarda la realizzazione di una galleria ferroviaria, le emissioni di CO₂ includono la fase di progettazione, la costruzione e la fase di dismissione. In questo contributo ci si sofferma sulla fase di costruzione vera e propria, in quanto responsabile della quota principale di emissioni [8]: la fase di progettazione incide infatti in maniera poco significativa (circa lo 0,03% dell'intera fase di costruzione [11], mentre la fase di dismissione può essere trascurata, considerata la lunga vita operativa di tali opere (generalmente valutata in almeno 100 anni).

Nella fase di costruzione, le operazioni di scavo delle gallerie, la produzione e il trasporto del materiale da costruzione per la stabilizzazione dello scavo, l'operatività delle gallerie e il funzionamento dei cantieri sono le attività che incidono maggiormente dal punto di vista delle emissioni di CO₂. Al fine di impostare la fase di calcolo, queste quattro macro-fasi possono essere ulteriormente dettagliate in singole operazioni (fig. 1).

Nelle operazioni di scavo si distinguono lo scavo convenzionale e lo scavo meccanizzato. In riferimento ai materiali utilizzati, il contributo più consistente in termini di emissioni di CO₂ deriva dalla produzione di cemento e acciaio, mentre sono considerabili marginali il materiale plastico utilizzato per le tubazioni e altri materiali di fini-

particularities of the construction process, the local context and geographical circumstances. This approach has already been adopted for some infrastructure systems such as bridges [10] or the motorway paving [9], but there are no similar studies in literature concerning the construction of tunnels.

The article is structured as follows: paragraph 3 describes the steps for calculating emissions, while in paragraph 4 the methodology is tested on the case study of the Brenner base tunnel. Paragraph 5 is dedicated to a summary of the overall emissions and a comparison with respect to the operation phase. Some final notes, including indications in terms of replicability and adaptability to other contexts, conclude the contribution.

3. Calculation methodology

The method for calculating CO₂ emissions from the construction of a railway tunnel differs from traditional LCA assessments of a product because the result does not presuppose universally valid assumptions from an energy point of view, nor the use of values that can be adopted in all settings. The construction of a railway tunnel is the result of a process that consists of an articulated series of operations, machinery and materials, the choice of which usually depends on the designers and the executor firms, in addition to the regulatory guidelines. Also in the determination of energy consumption and emissions, we must consider the local context in which the work is performed. The Hybrid LCA approach initially includes identifying macro phases of the process. Regarding the construction of a railway tunnel, CO₂ emissions include the design, construction and decommissioning phase. In this paper we focus on the construction phase itself, as responsible for the largest share of emissions [8]: the planning phase in fact does not have a significant impact (approximately 0.03% of the entire construction phase [11], while the decommissioning process can be neglected, given the long operational life of these works (generally evaluated in at least 100 years).

During the construction phase, the excavation of the galleries, production and transportation of building material for the stabilisation of the excavation, the operability of the galleries and the operation of sites are activities that have the greatest effect in terms of CO₂ emissions. In order to set up the calculation phase, these four macro-phases can be further detailed in individual operations (fig. 1).

Excavation operations are distinguished in conventional excavation and mechanised excavation. In reference to the materials used, the most substantial contribution in terms of CO₂ emissions comes from the production of cement and steel, while the plastic material used for piping and other finishing materials are considered marginal. Transporting building materials and excavation material up to deposits, distinguishing between conveyor belt and

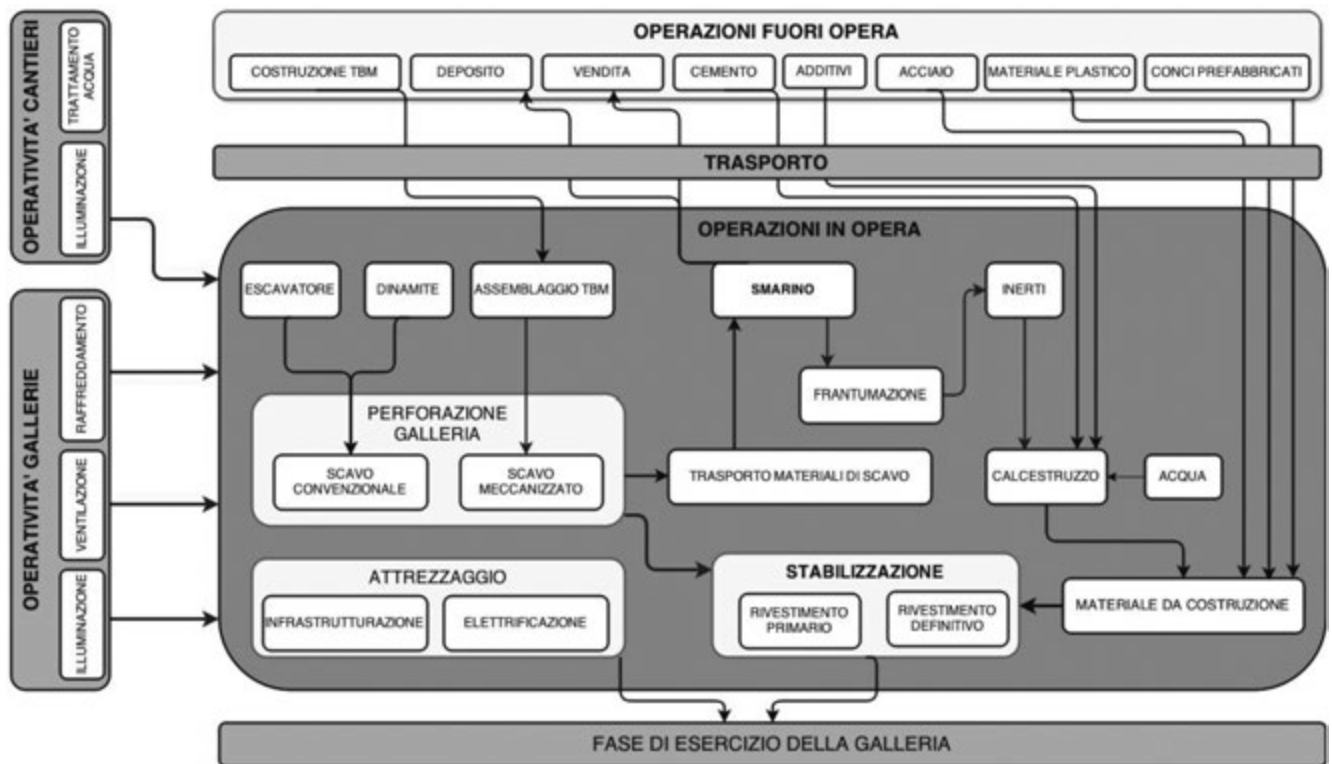


Fig. 1 - Schema delle fasi di costruzione di un'infrastruttura ferroviaria.

Fig. 1 - Diagram of the railway infrastructure construction phases.

tura. Deve inoltre essere considerato il trasporto dei materiali da costruzione e del materiale di scavo fino ai depositi, distinguendo tra nastro trasportatore e camion. Le emissioni derivanti dalle operazioni di cantiere sono causate principalmente dall'illuminazione delle aree esterne, dal funzionamento delle officine meccaniche e degli uffici, e dagli impianti per il trattamento delle acque. Infine, il contributo dovuto all'operatività delle gallerie include le emissioni prodotte per l'illuminazione, la ventilazione e il raffreddamento.

Definite le fasi principali che compongono il processo, l'approccio *Hybrid LCA* presuppone una raccolta accurata dei dati. Gli strumenti più utili risultano l'analisi della documentazione progettuale disponibile, il confronto con i progettisti e le ditte costruttrici, nonché le rilevazioni dirette effettuate in cantiere. Se invece l'analisi è condotta quando il progetto è ancora allo stato di previsione, la conoscenza delle fasi e delle tecniche utilizzate per la costruzione è limitata. Per ovviare a tale problema si rende necessario ricorrere ai dati presenti in letteratura, a stime basate sull'analogia e alla raccolta di informazioni presso ditte specializzate, adattandoli ove possibile al caso in esame.

Il calcolo vero e proprio si basa su un processo sintetizzabile in tre fasi: combustione, produzione energetica ed emissioni di CO₂. La CO₂ di origine antropica è infatti rilasciata durante tutte le attività connesse alla produzione e trasformazione di energia associate ad una combu-

truck must also be considered. Emissions from construction site operations are mainly caused by the lighting of outdoor areas, operation of mechanical workshops and offices, and by water treatment plants. Finally, the contribution due to the operability of the galleries includes emissions for lighting, ventilation and cooling.

Once the main phases that make up the process have been defined, the Hybrid LCA approach presupposes thorough data collection. The most useful tools are the analysis of the project documentation available, the comparison with designers and construction companies, as well as direct surveys carried out on site. However, if the analysis is carried out when the project is still in the forecasting phase, the knowledge of the building steps and techniques is limited. To work around this problem data in literature, estimates based on analogy and the collection of information at specialised companies must be used, adapting them where possible to the present case.

The actual calculation is based on a process that can be summed up in three stages: combustion, energy production and CO₂ emissions. Anthropogenic CO₂ is in fact released during all activities related to the production and processing of energy associated with combustion. Since it is not always possible to trace CO₂ emissions directly, the lack of data can be overcome by estimating the final energy consumption and translating the latter, through appropriate factors, into CO₂ emissions according to the report (formula 1):

stione. Poiché non sempre è possibile risalire in maniera diretta alle emissioni di CO₂, si può sopperire alla mancanza di dati stimando i consumi finali di energia e tradurre quest'ultimi, attraverso opportuni fattori, in emissioni di CO₂ secondo la relazione (formula 1):

$$E_c = \sum_m q_m \cdot h_m + \sum_v f_v \cdot h_v \quad (1)$$

dove:

- E_c indica le emissioni di CO₂ della fase di costruzione;
- m è il tipo di materiale;
- q_m è la quantità di materiale;
- h_m è il fattore di emissione di CO₂ relativa al materiale m;
- v è il vettore energetico⁽¹⁾;
- f_v è il fabbisogno di energia ottenuto da ciascun vettore energetico v;
- h_v è il fattore di emissione di CO₂ relativa al vettore energetico v.

In letteratura sono state prodotte diverse banche dati che analizzano i vettori energetici e i materiali [12], [13], [14], [15]; in entrambi i casi, i fattori di emissione di CO₂ sono funzione del metodo utilizzato e della dimensione geografica considerata. In mancanza di dati diretti sulle emissioni di CO₂, sono da preferire i fattori aderenti alla realtà locale. Inoltre, è importante considerare in maniera omogenea le quote di CO₂ relative all'intero ciclo di produzione delle fonti energetiche e le quote relative a tutto il ciclo di vita dei materiali. Si tratta di considerare trascurabili o meno le emissioni di CO₂ prodotte a seguito dell'estrazione delle materie prime, trasporto, lavorazione e smaltimento dei materiali, e quelle relative alla produzione, trasporto della fonte energetica considerata, oltre agli eventuali produzione, utilizzo e manutenzione degli impianti utilizzati per il suo sfruttamento.

Bisogna considerare, tuttavia, che essi hanno un peso non secondario nell'intero processo e la scelta deve essere compiuta in maniera consapevole e giustificata. Le fasi qui esaminate vengono valutate nel prossimo paragrafo su un caso studio reale (il tunnel di base del Brennero), in modo da comprendere quali sono le componenti che impattano maggiormente sulle emissioni di CO₂ ed ottimizzare il processo realizzativo dell'opera stessa.

4. Emissioni di CO₂ per la costruzione del BBT

4.1. Il corridoio Verona-Monaco, descrizione dell'infrastruttura e del BBT

Il corridoio Verona-Monaco, parte centrale della linea TEN-T n°1, rientra tra le maggiori linee ferroviarie AV/AC

$$E_c = \sum_m q_m \cdot h_m + \sum_v f_v \cdot h_v \quad (1)$$

where:

- E_c indicates CO₂ emissions during construction;
- m is the type of material;
- q_m is the amount of material;
- h_m is the CO₂ emission factor for the m material;
- v is the energy carrier⁽¹⁾;
- f_v is the energy requirement obtained from each energy carrier v;
- h_v is the CO₂ emission factor related to the energy carrier v.

In literature various databases were produced to analyse the energy carriers and materials [12], [13], [14], [15]; in both cases, the CO₂ emission factors are a function of the method used and the geographic dimension considered. In the absence of direct data on CO₂ emissions, factors pertinent to the local reality are preferable. In addition, it is important to consider the CO₂ percentage concerning the entire production cycle of energy sources in a homogeneous manner and the amount related to the whole life cycle of the materials. It is a matter of considering negligible or less CO₂ emissions produced as a result of raw material extraction, transport, processing and disposal of materials, and those related to production, transport of the energy source considered, in addition to any production, use and maintenance of systems used for the exploitation thereof.

We must consider, however, that they do not have secondary importance in the whole process and the choice must be made in a conscious and justified manner. The steps here examined are evaluated in the next paragraph on a real case study (the Brenner base tunnel), so as to understand what are the components that have a major impact on CO₂ emissions and optimise the implementation process of the work itself.

4. CO₂ emissions for the construction of the BBT

4.1. Verona-Munich corridor, description of the infrastructure and of the BBT

The Verona-Munich corridor, the central part of the TEN-T n° 1 line, is one of the major HS/HC railway lines in Europe: it is the main link between Germany (Bavaria), Austria (Tyrol) and Italy (South Tyrol, Trentino and Veneto), for both freight and passenger transport. Considering the North-South direction, the corridor begins in Monaco and ends in Verona, passing through the valleys of the low-

⁽¹⁾ Per vettori energetici si intendono i mezzi, le apparecchiature o i fluidi che consentono il trasporto dell'energia. In senso figurato, tra i vettori si annovera anche l'energia elettrica, la quale viene contemporaneamente considerata sia un vettore, sia una fonte energetica.

⁽¹⁾ The meaning of energy carriers is the means, equipment or fluids that allow carrying energy. Figuratively, electricity is among carriers that is considered a carrier and an energy source at the same time.

europee: essa rappresenta il principale collegamento tra la Germania (Baviera), l'Austria (Tirolo) e l'Italia (Alto Adige, Trentino e Veneto), sia per il trasporto merci, sia per il trasporto passeggeri. Considerando la direzione Nord-Sud, il corridoio inizia a Monaco e finisce a Verona, passando attraverso le valli del basso Inn (Kufstein-Innsbruck), del Sill (Innsbruck-Brennero), dell'Isarco (Brennero-Bolzano) e dell'Adige (Bolzano-Verona). La nuova ferrovia AV/AC è divisa in tre sezioni: la tratta di accesso nord (Monaco-Kufstein, Kufstein-Kundl, Kundl-Baumkirchen); il Tunnel di Base del Brennero (BBT); la tratta di accesso sud (Fortezza-Ponte Gardena, e la circonvallazione di Bolzano, Trento e Verona).

Il BBT (fig. 2), galleria ferroviaria di base lunga circa 55 km che collega Innsbruck (A) a Fortezza (I)⁽²⁾, è l'opera più complessa della linea. Esso accorcerà l'attuale linea ferroviaria di circa 20 km nella tratta tra Innsbruck e Fortezza e di 35 km tra Monaco e Verona, con un andamento rettilineo che elimina le problematiche relative ai raggi di curvatura. Rispetto alla linea storica (dove, per la tratta Innsbruck-Brennero, si registrano punte del 26‰), il BBT prevede una pendenza determinante in direzione nord-sud del 6,7‰, e in direzione sud-nord del 4‰. Il culmine del BBT, presso il confine di stato, risulterà ad un'altezza di 794 m s.l.m., a fronte degli attuali 1.370 m.s.l.m. [16]. I tempi di percorrenza tra Verona e Monaco diminuiranno di circa 2 ore e 30 minuti, passando dalle attuali 5 ore e 23 minuti a 3 ore, diventando al contempo di circa un'ora e trenta minuti più veloci rispetto all'autovettura.

I lavori preliminari, iniziati nel 1999, si trovano attualmente in una fase avanzata di realizzazione. Gli scavi per la galleria principale sono iniziati nel 2011 e la messa in esercizio dell'intero sistema è attesa per l'anno 2025. I costi di costruzione sono stimati in circa 7,9 Mld €.

Da un punto di vista tecnico, il BBT è un sistema a due canne, che distano 70 m l'una dall'altra e sono collegate ogni 333 metri da cunicoli percorribili a piedi per permettere l'evacuazione in caso di incidente. Alcuni di essi, posti a una distanza di 2 km l'uno dall'altro, ospitano anche gli impianti tecnologici. Ogni 6 km, inoltre, i cunicoli sono atti a contenere vasche di accumulo per l'acqua, necessaria per lo spegnimento di eventuali incendi.

In asse alle due gallerie ferroviarie, ad una quota inferiore di circa 10 m, si trova il cunicolo esplorativo (o di servizio). Esso si è reso necessario soprattutto per effettuare, preliminarmente alla costruzione delle gallerie principali, le prospezioni geologiche, quali sondaggi preliminari, sondaggi verticali rispetto all'asse della galleria, misurazioni delle deformazioni, ecc. Il cunicolo ha inoltre un ruolo importante nella logistica della costruzione limitando al minimo gli impatti sull'esterno, poiché viene utilizzato per il trasporto di materiale di scavo e del materiale di costruzione della galleria principale.

er Inn (Kufstein-Innsbruck), Sill (Innsbruck-Brenner), Isarco (Brenner-Bolzano) and Adige (Bolzano-Verona) valleys. The new HS/HC railway line is divided into three sections: the North access route (Munich-Kufstein, Kufstein-Kundl Kundl-Baumkirchen); the Brenner Base Tunnel (BBT); the southern access route (Fortezza-Ponte Gardena, and the Bolzano, Trento and Verona ring section).

The BBT (fig. 2), base railway tunnel with a length of about 55 km, connecting Innsbruck (A) to Fortezza (I)⁽²⁾, is the most complex work of the line. It will shorten the current railway line of about 20 km in the section between Innsbruck and Fortezza and of 35 km between Munich and Verona, with a straight line course that eliminates problems related to the radius of curvature. Compared to the old line (where for the Innsbruck-Brennero route, there are peaks of 26 ‰), the BBT provides a crucial North – South slope of 6.7 ‰, and of 4‰ in the South – North direction of travel. The BBT peak, at the state border, will be at an elevation of 794 m above sea level, compared to the current 1.370 m above sea level [16]. Travel times between Verona and Munich will decrease by about 2 hours and thirty minutes, passing from the current 5 hours and 23 minutes to 3 hours, becoming at the same time approximately one hour and thirty minutes faster than cars.

Preliminary works that began in 1999 are currently at an advanced implementation phase. Excavations for the main gallery began in 2011 and commissioning of the entire system is expected by the year 2025. Construction costs are estimated at about 7.9 billion €

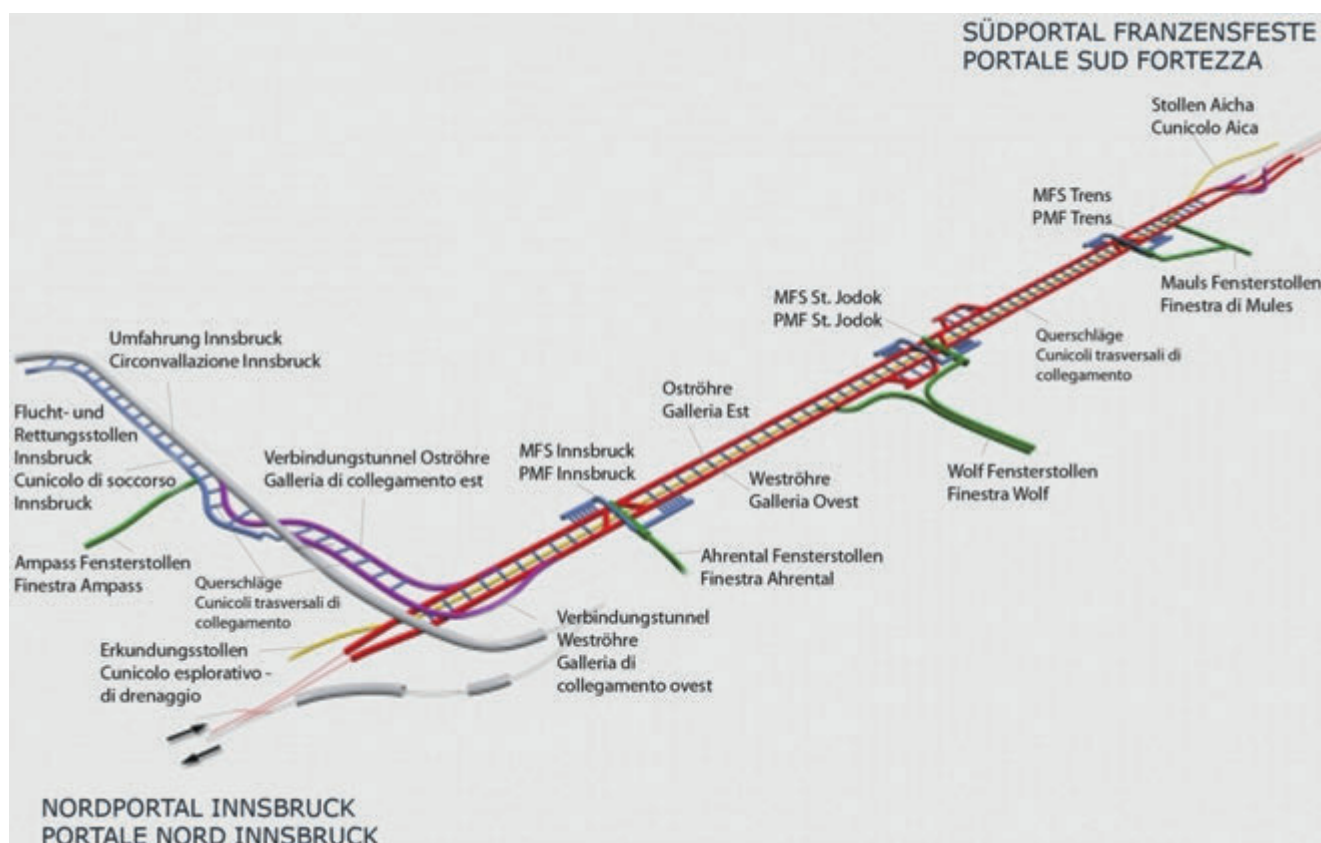
From a technical point of view, the BBT is a two-hole system, spaced 70 m from each other and connected every 333 metres by tunnels practicable on foot to allow evacuation in case of an accident. Some of them, placed at a distance of 2 km from each other, are also home to the technological systems. Furthermore every 6 km, the tunnels are also suitable to contain water storage tanks, needed to extinguish any possible fires.

In the centre line of the two railway tunnels, at an altitude less than about 10 m, lies the exploratory (or service) tunnel. It was necessary above all to implement geological explorations, before the construction of the main tunnels, such as preliminary surveys, vertical surveys compared to the axis of the gallery, deformation measurements, etc. The exploratory tunnel has also an important role in the construction logistics minimising impacts on the outside, because it is used for the transport of excavated material and construction material of the main gallery.

The gallery will host three multifunction places (Innsbruck, St Jodok and Trens), accessible from the outside through the vehicular driveways of Ahrntal, Wolf and

⁽²⁾ Se si considera anche la circonvallazione di Innsbruck, la lunghezza è pari a 64 km.

⁽²⁾ If the Innsbruck ring section is considered, the length is 64 km.



(Fonte - Source: [17])

Fig. 2 - Il sistema BBT.

Fig. 2 - The BBT system.

La galleria ospiterà tre posti multifunzione (Innsbruck, St. Jodok e Trens), accessibili dall'esterno attraverso le gallerie carrabili di Ahrental, Wolf e Mules. I posti multifunzione sono collocati a una distanza di 15-25 km tra loro e sono dotati di fermate d'emergenza per il soccorso di passeggeri in treni incidentati, di impianti per la gestione dell'esercizio e dei lavori di manutenzione.

Il BBT si collega all'infrastruttura esistente nelle stazioni di Innsbruck e di Fortezza. Nella città austriaca, dalla stazione centrale, un collegamento a cielo aperto corre parallelo ai binari esistenti. L'adiacente circonvallazione, ora adibita al trasporto merci, verrà potenziata realizzando un cunicolo di soccorso e la finestra di accesso di Ampass, per renderla adatta al trasporto passeggeri. Le gallerie di collegamento tra la circonvallazione e il BBT sono a binario unico e permettono, senza far ricorso ad intersezioni a raso, di variare il binario legale dal destro, usato in Austria, al sinistro, tipico dell'Italia. Nel suo percorso, il BBT attraversa due volte il fiume Sill (tramite ponti), e l'Isarco (in sotterraneo), raggiungendo la stazione di Fortezza, dove i binari della nuova linea ferroviaria vengono collocati a sud-ovest. Attraverso un collegamento a raso rispetto alla tratta storica, i treni possono venire deviati dall'una all'altra linea.

Mules. The multifunction places are set at a distance of 15-25 km between them and are equipped with emergency stops to rescue passengers in train accidents, systems for operation management and maintenance works.

The BBT connects to the existing infrastructure in the stations of Innsbruck and Fortezza. In the Austrian town, an open-air connection runs parallel to existing tracks from the central station. Creating a rescue tunnel and the Ampass access window, will enhance the adjacent ring section, now used for freight transport, and will make it suitable for passenger transport. The connection tunnels between the ring section and the BBT are single track and, without recourse to on grade intersections, allow changing the right line from right-side, used in Austria, to left-side, typical of Italy. Along its path, the BBT crosses the Sill River twice (with bridges), and the Isarco (underground), reaching the Fortezza station, where the tracks of the new railway are placed south-west. Through an on grade connection compared to the historical one, trains can be diverted from one line to the other.

4.2. Data collection and calculation assumptions

As stated in the definition of methodology, the data and information listed below are primarily derived from the

4.2. Raccolta dati e ipotesi di calcolo

Come precisato in sede di definizione metodologica, i dati e le informazioni di seguito riportati derivano principalmente dalla documentazione tecnica fornita dalla società BBT SE e dalle rilevazioni dirette effettuate presso i cantieri di Aica e Mules, nonché da un confronto diretto con i progettisti dell'opera. Inoltre, per coprire tutti i settori, si sono raccolte informazioni da esperienze di costruzione di opere analoghe; al contempo sono state approfondite le diverse tecniche costruttive richiedendo informazioni a ditte specializzate ed effettuando specifiche ricerche in letteratura. Infine, nel presente paragrafo si fa riferimento a una serie di tabelle e di dati che in taluni casi non è stato possibile riportare nella loro interezza, considerata la complessità dei calcoli. Si è pertanto deciso di riportare solo quelli fondamentali alla comprensione dell'intero processo; il lettore interessato trova ulteriori approfondimenti in [18].

Per quanto riguarda i vettori energetici e i materiali, al fine di poter eseguire un confronto tra le varie voci di calcolo considerate, sono stati utilizzati quei fattori che tengono in considerazione le emissioni di CO₂ relative all'intero ciclo di produzione delle fonti energetiche, e a tutto il ciclo di vita dei materiali. Inoltre sono stati preferiti quelli coerenti con il contesto territoriale (tabella 1). Per il cemento pozzolanico e Portland, i tipi di cemento maggiormente utilizzati nei cantieri, i dati sono stati forniti direttamente da BBT SE.

I valori utilizzati risultano in linea con i dati presenti in letteratura relativi ad altri tipi di cemento o ad altre realtà geografiche [15], [19]. In riferimento all'acciaio, non essendo disponibili valori nazionali per Italia ed Austria, si è fatto riferimento ai valori forniti dal centro di ricerca per l'economia energetica di Monaco [15]. Per il calcolo delle emissioni derivanti dalla combustione dei derivati petroliferi, il riferimento sono le indicazioni dell'IPCC [12]. Infine, i fattori di emissione dell'energia elettrica derivano dai mix italiani ed austriaci forniti dal gruppo Terna, azienda che gestisce la trasmissione della rete nazionale italiana. Essendo l'infrastruttura per il

technical documentation supplied by the company BBT SE and from surveys conducted directly at the Aica and Mules sites, as well as from a direct confrontation with the designers of the work. Also, to cover all sectors, information was gathered from experiences of similar construction works; at the same time different construction techniques were studied requesting information to specialised companies and carrying out specific research in the literature. Finally, this paragraph refers to a series of tables and data that in some cases was impossible to report in their entirety, considering the complexity of the calculations. It was therefore decided to report only those essential to the understanding of the entire process; the interested reader will find further information in [18].

As far as energy carriers and materials are concerned, in order to make a comparison between the various items considered in the calculation, those factors were used taking into account CO₂ emissions related to the whole production cycle of energy sources and to the whole life cycle of the materials. Furthermore those consistent with the territorial context were preferred (table 1). For pozzolanic and Portland cement, the cement types most commonly used in construction sites, the data has been provided directly by BBT SE.

The values used are in line with the data in literature about other types of cement or other geographical areas [15], [19]. With reference to steel, national values not being available for Italy and Austria, reference was made to the values provided by the Research Centre for energy economy of Munich [15]. For the calculation of emissions from the combustion of petroleum derivatives, reference is to be made to the IPCC indications [12]. Finally, electricity emission factors derive from Italian and Austrian mixes provided by the Terna group, a company that manages the Italian national network transmission. As the infrastructure is 60% in Austria and 40% in the Italian territory, 0.304 kg CO₂/kWh was taken as conversion factor, the weighted average of the values of the two nations. If the electricity produced not at national level had been taken into considera-

TABELLA 1 – TABLE 1

Fattori di emissione di CO₂ dei materiali e dei vettori energetici maggiormente impiegati nella costruzione del BBT
CO₂ emission factors for materials and energy carriers mainly used in the construction of the BBT

| Materiale <i>Material</i> | Fattore emissione <i>Emission factor</i> [Kg CO ₂ /t] | Fonte <i>Source</i> | Vettore energetico <i>Energy carrier</i> | Fattore emissione <i>Emission factor</i> [Kg CO ₂ /kWh] | Fonte <i>Source</i> |
|---|---|-------------------------------|--|---|-------------------------------|
| Acciaio strutturale <i>Structural steel</i> | 1.980 | [15] | Gas naturale <i>Natural gas</i> | 0,202 | [12] |
| Acciaio macchine <i>Machine steel</i> | 1.449 | [15] | Gasolio <i>Diesel oil</i> | 0,267 | [12] |
| Cemento Portland <i>Portland cement</i> | 622 | [21] | Energia elettrica (A) <i>Electric power (A)</i> | 0,216 | [22] |
| Cemento pozzolanico <i>Pozzolanic cement</i> | 576 | [21] | Energia elettrica (IT) <i>Electric power (IT)</i> | 0,435 | [22] |

60% in territorio austriaco e per il 40% in territorio italiano, si è preso come fattore di conversione 0,304 kg CO₂/kWh, media pesata dei valori delle due nazioni. Se fosse stata considerata l'energia elettrica prodotta non a livello nazionale, ma regionale (Alto Adige per l'Italia e Tirolo per l'Austria), le emissioni sarebbero risultate significativamente inferiori: nel 2009, la componente idroelettrica (la cui produzione è tra le meno impattanti in termini di CO₂) in Alto Adige ha rappresentato il 96,1% della produzione totale di energia elettrica, a fronte di un 10,9% a livello nazionale [20] e valori elevati sono stati raggiunti anche in Tirolo.

La scelta di far riferimento ai valori nazionali dipende da questioni di opportunità: essendo la rete elettrica dell'Alto Adige collegata con quella delle regioni limitrofe, non è possibile determinare con precisione da quale fonte sia stata prodotta l'energia consumata a livello locale. La scala nazionale, in forma cautelativa, rappresenta quindi la dimensione preferibile. Infine si segnala che, nell'incertezza di determinare quale sarà l'evoluzione futura dei mix elettrici nazionali, si è fatto riferimento ai fattori di conversione relativi al 2008, anno che è stato scelto come riferimento nell'analisi perché consente di disporre di una serie di dati completa. Questi valori sono la base per il calcolo delle attività nelle diverse fasi descritte in figura 1.

4.3. Scavo delle gallerie

L'operazione di scavo prevede la ciclica ripetizione delle fasi di perforazione e di trasporto del materiale di scavo ai depositi.

4.3.1. Perforazione

Per la perforazione si utilizzano due metodi: quello convenzionale, con escavatori ed esplosivo e quello meccanizzato, con la Tunnel Boring Machine (TBM). Sono scavati con metodo convenzionale le finestre di accesso, il 38% delle due canne principali (galleria est e ovest), i cunicoli trasversali di collegamento, le componenti delle stazioni multifunzione e della circonvallazione di Innsbruck [23], [24] e il 35% del cunicolo esplorativo [25], per un totale di 119 km. Lo scavo convenzionale prevede che vengano mediamente effettuate due volate al giorno, ciascuna delle quali permette, a seconda della conformazione della roccia, un avanzamento dai 3 ai 4 m [26].

Nei cantieri si utilizza una macchina tipo Jumbo, la cui potenza è pari a 255 kW [27]. La macchina, alimentata elettricamente, è in funzione mediamente 7 giorni su 7, 6 ore al giorno. Ipotizzando un avanzamento medio giornaliero di 5 m, le emissioni derivanti dalla macchina Jumbo sono pari a 94,72 kg/m. In seguito alla fase di brillamento, vengono impiegati altri escavatori, attrezzati con speciali martelli o scalpelli idraulici: essi servono alla

tion, but the regional one (South Tyrol for Italy and Tyrol for Austria), emissions would have been significantly lower: in 2009, the hydroelectric component (whose production is among the less impacting in terms of CO₂) in South Tyrol accounted for 96.1% of the total electricity production, compared with 10.9% nationally [20] and high values were reached in Tyrol also.

The decision to refer to national values depends on matters of opportunity: being the electricity network in South Tyrol connected with that of the neighbouring regions, it is not possible to accurately determine from what source the energy consumed locally has been produced. The national scale, in a precautionary form, is the preferable dimension. Finally it should be noted that, in the uncertainty of determining what the future evolution of national electric mixes will be, reference was made to the conversion factors for the year 2008, a year that was chosen as reference in the analysis because it allows having a complete data set. These values are the basis for the calculation of activities in the different stages described in fig. 1.

4.3. Excavation of the galleries

The excavation provides for the cyclic repetition of the drilling and transportation phases of excavated material to deposits.

4.3.1. Drilling

Two methods are used for drilling: the conventional one, with excavators and explosives and the mechanised one, with the Tunnel Boring Machine (TBM). Access windows are excavated using the conventional method, 38% of the two main tubes (east and west tunnel), the cross connection burrows, the components of the multi-function stations and of the Innsbruck ring section [23], [24] and 35 % of the exploratory tunnel [25], for a total of 119 km. The conventional excavation provides for the execution of two drilling and blasting operations a day on average, each of which allows, a progress of 3 to 4 m, depending on the conformation of the rock [26].

A jumbo type machine is used on construction sites, whose power is equal to 255 kW [27]. The electrically powered machine is in operation on average 7/ 7 days, 6 hours a day. Assuming an average daily progress of 5 m, the emissions from the Jumbo machine amounted to 94.72 kg/m. Following the blasting phase, other excavators are used, equipped with special hydraulic hammers or chisels: they serve to the accommodation and cleaning of the excavation surface. Their contribution, equal to 54 kg/m, determines the overall emission of the conventional excavation equal to 149 kg/m. The explosive is also among the factors that

⁽³⁾ Materiale roccioso frantumato che risulta dalla perforazione delle gallerie in roccia.

⁽³⁾ Crushed rocky material from the drilling of rock galleries.

sistemazione e la pulizia della superficie di scavo. Il loro contributo, pari a 54 kg/m, determina un'emissione complessiva dello scavo convenzionale pari a 149 kg/m. Tra i fattori che nella fase di brillamento contribuiscono alle emissioni di CO₂, rientra anche l'esplosivo. Considerandone necessario 1,3 kg per m³ di roccia da scavare, ed essendo la quantità di smarino⁽³⁾ che deriva dallo scavo convenzionale pari a circa 9,3 Mio m³ [23], [24], la quantità di esplosivo totale richiesto è pari a circa 12 Mio kg, la cui reazione di ossidazione produce 7.012 t di CO₂. Considerando anche questo contributo, si stimano 24.693 t di CO₂ per lo scavo convenzionale del BBT (tabella 2).

Lo scavo meccanizzato coinvolge il 62% delle gallerie principali e il 65% del cunicolo esplorativo (per un totale di 102 km [25]). Esso avviene tramite TBM. Delle dieci TBM previste per l'intera opera, tre di diametro 6,3 m sono impiegate nello scavo del cunicolo esplorativo e sette nello scavo delle gallerie. Per stimare il fabbisogno energetico si considera una macchina a "doppio scudo", che permette di effettuare lo scavo simultaneamente alla posa dei conci prefabbricati per il rivestimento interno (si veda la sezione successiva). La potenza dei motori della testa è pari a 1.960 kW [28]: circa l'80% della potenza totale è

contribuire a CO₂ emissions during blasting. Considering the necessary quantity of 1.3 kg per m³ of rock to be excavated, and being the minimum spoil⁽³⁾ quantity resulting from the excavation about 9,3 million m³ [23], [24], the total amount of explosive necessary is equal to approximately 12 million kg, whose oxidisation reaction produces 7.012 t of CO₂. Considering this contribution too, 24.693 t of CO₂ are estimated for the conventional excavation of the BBT (table 2).

Mechanised excavation involves 62% of the major galleries and 65% of the exploratory tunnel (for a total of 102 km [25]). It is done using the TBM. Of the ten TBM planned for the entire work, three with a 6.3 m diameter are used in the excavation of the exploratory tunnel and seven in the excavation of the galleries. To estimate the energy requirement a "double shield" machine is considered that allows excavating simultaneously to the laying of prefabricated blocks for the inner lining (see next section). The power of the engines of the head is equal to 1.960 kW [28]: about 80% of the total power is used to perform the operation of the excavation itself, while the remaining 20% (490 kW) is used by the machine for complementary operations. The

TABELLA 2 – TABLE 2

Emissioni di CO₂ derivanti dalla fase di scavo convenzionale
CO₂ emissions deriving from the conventional excavation phase

| a) Fase di brillamento – macchina “Jumbo” - a) Blasting phase - “Jumbo” machine | | | | | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Avanz. medio Average progress [m/d] | Potenza Power [kW] | Funzionamento Operation [h/d] | Alimentazione Power supply | Consumo energetico Power consumption [kWh] | Consumo energetico unitario Unit power consumption [kWh/m] | Fattore conversione CO ₂ CO ₂ Conversion factor [kg/kWh] | CO ₂ unitario Unit CO ₂ [kg/m] | | | | |
| (1) | (2) | (3) | | (4)=(2)·(3) | (5)=(4)/(1) | (6) | (7)=(5)·(6) | | | | |
| 5 | 260 | 6 | Elettrica Electric | 1.560 | 312 | 0,304 | 94,72 | | | | |
| b) Fase di sistemazione e pulizia superficie di scavo – escavatore b) Arrangement and excavation surface cleaning phase – excavator | | | | | | | | | | | |
| Avanz. Medio Average progres | Consumo carburante Fuel consumption [l/h] | Funzionamento Operation [h/d] | Alimentazione Power supply | Consumo carburante Fuel consumption [l/d] | Peso specifico gasolio Diesel oil specific weight [kg/dm³] | Consumo carburante Fuel consumption [kg/d] | Potere calorifico Heating value [kWh/kg] | Consumo energetico Power consumption [kWh] | Consumo energetico unitario Unit power consumption [kWh/m] | Fattore conversione CO ₂ CO ₂ Conversion factor [Kg/kWh] | CO ₂ unitario Unit CO ₂ [kg/m] |
| (1) | (2) | (3) | | (4)=(2)·(3) | (5) | (6)=(4)·(5) | (7) | (8)=(6)·(7) | (9)=(8)/(1) | (10) | (11)=(10)·(9) |
| 5 | 50 | 2 | diesel | 100 | 0.85 | 85 | 11,9 | 1.012 | 202,3 | 0,267 | 54,01 |
| CO ₂ per metro di scavo convenzionale CO ₂ per metre of conventional excavation | | | | | | | (A) = a) + b) | [kg/m] | | 148,73 | |
| Lunghezza gallerie scavate in convenzionale Length of conventionally excavated | | | | | | | (B) | [km] | | 118,87 | |
| CO ₂ totale prodotta durante le esplosioni Total CO ₂ produced during explosions | | | | | | | (C) | [t] | | 7.012,00 | |
| Totale CO ₂ scavo convenzionale Total CO ₂ conventional excavation | | | | | | | (D) = (A)·(B)+(C) | [t] | | 24.693,43 | |

usata per eseguire l'operazione di scavo vera e propria, mentre il rimanente 20% (490 kW) è utilizzato dalla macchina per operazioni complementari. La TBM, alimentata elettricamente, è in funzione 24 ore al giorno, ma l'operazione di scavo si concentra in 12 ore. Ipotizzando un avanzamento giornaliero medio pari a 15 m, in linea con altre opere ([29], [30], [31], [32]), le emissioni di CO₂ derivanti dallo scavo meccanizzato della TBM di diametro 6,3 m sono pari a 714 kg/m (tabella 3, sezione a).

Le TBM utilizzate per lo scavo delle gallerie principali hanno un diametro pari a 9,6 m. Per esse, adottando un metodo analogo a quello descritto poc'anzi, è stata stimata un'emissione di CO₂ pari a 1.166 kg/m (tabella 3, sezione b). Le emissioni di CO₂ dovute allo scavo meccanizzato ammontano a 101.913 t. Ad esse, va aggiunto il contributo derivante dalla costruzione delle TBM e dal trasporto dal sito di produzione fino al cantiere.

Le macchine, costruite quasi interamente in acciaio, hanno dimensioni e pesi eccezionali. Con le necessarie operazioni di manutenzione e/o di riadattamento, una stessa macchina viene utilizzata in più opere, stimando una vita media di circa 30 anni. Secondo le indicazioni

electrically powered TBM is in operation 24 hours a day, but excavation is focused in 12 hours. Assuming an average daily progress rate of 15 m, in line with other works ([29], [30], [31], [32]), the CO₂ emissions resulting from the mechanical excavation of the TBM with a diameter of 6.3 m are equal to 714 kg/m (table 3, section a).

The TBM used for the excavation of the main galleries have a diameter equal to 9.6 m. For these, using a method similar to that described above, an emission of CO₂ equal to 1,166 kg/m was estimated (Table 3, section b). CO₂ emissions due to mechanical excavation amounted to 101,913 tons. The contribution resulting from the construction of the TBM and transport from the production site to the site should be added to these.

Machines, built almost entirely of steel, have exceptional dimensions and weights. With the necessary maintenance and/or rehabilitation, the same machine is used in multiple works, estimating an average life of about 30 years. According to the information provided by the Company Seli SpA, we assume a period of about 10 years of non-use of the machines and an average duration of three

TABELLA 3 – TABLE 3

Emissioni di CO₂ derivanti dalla fase di scavo meccanizzato
CO₂ emissions resulting from the mechanised excavation phase

| a) TBM diametro 6,3 m | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|--|---------------------------------------|--|---|--|---------------------------|--|------------------------|
| Avanza- mento Progress [m/d] | Potenza Power [kW] | | Funziona- mento Operation [h/d] | Alimen- tazione Supply Power | Consumo energetico Power con- sumption [kWh] | Consumo energetico unitario Unit power consumption [kWh/m] | Fattore con- versione Conversion factor [kg/t] | CO ₂ [kg/m] | Lunghezza scavo Excavation length [km] | CO ₂ [t] |
| (1) | | (2) | (3) | | (4)=(2)·(3) | (5)=(4)/(1) | (6) | (7)=(5)·(6) | (8) | (9)=(7)·(8) |
| 15 | testa della TBM <i>TBM head</i> | 1.960 | 12 | elettrica <i>electric</i> | 23.520 | 2.352 | 0,304 | 714,07 | 37,35 | 26.670,41 |
| | resto della TBM <i>rest of the TBM</i> | 490 | 24 | elettrica <i>electric</i> | 11.760 | | | | | |
| | totale TBM <i>total TBM</i> | 2.450 | | | 35.280 | | | | | |
| b) TBM diametro 9,6 m | | | | | | | | | | |
| Avanza- mento Progress [m/d] | Potenza Power [kW] | | Funziona- mento Operation [h/d] | Alimen- tazione Supply Power | Consumo energetico Power con- sumption [kWh] | Consumo energetico unitario Unit power consumption [kWh/m] | Fattore con- versione Conversion factor [kg/t] | CO ₂ [kg/m] | Lunghezza scavo Excavation length [km] | CO ₂ [t] |
| (1) | | (2) | (3) | | (4)=(2)·(3) | (5)=(4)/(1) | (6) | (7)=(5)·(6) | (8) | (9)=(7)·(8) |
| 15 | testa della TBM <i>TBM head</i> | 3.200 | 12 | elettrica <i>electric</i> | 38.400 | 3.840 | 0,304 | 1.165,82 | 64,54 | 75.242,02 |
| | resto della TBM <i>rest of the TBM</i> | 800 | 24 | elettrica <i>electric</i> | 19.200 | | | | | |
| | totale TBM <i>total TBM</i> | 4.000 | | | 57.600 | | | | | |
| Totale CO ₂ scavo meccanizzato - <i>Total mechanised excavation CO₂</i> | | | | | | | | | [t] | 101.912,43 |

fornite dalla ditta Seli SpA, si ipotizza un periodo di circa 10 anni di non utilizzo delle macchine e una durata temporale media di tre anni per cantiere. Approssimando quindi a 6 il numero totale di opere per le quali è utilizzata una stessa TBM durante il suo ciclo di vita, è stato applicato un coefficiente riduttivo di 1/6 alle emissioni di CO₂ dovute alla produzione delle macchine, ottenendo un contributo pari a 3.103 t. Il trasporto delle macchine, infine, avviene via camion per parti, successivamente assemblate in cantiere. Per il cuscinetto della TBM, la componente più fragile e non scomponibile della macchina, si ricorre ad un trasporto di tipo eccezionale. Per il trasporto di tutte le TBM dal luogo di costruzione (Aprilia, LT) al cantiere di Aica (circa 700 km) è stata stimata un'emissione di CO₂ pari a 364 t.

4.3.2. Trasporto del materiale di scavo

La fase successiva riguarda il trasporto dello smarino, il cui volume complessivo ammonta a circa 21,5 Mio m³. Esso è funzione della gestione del materiale, per la quale si possono individuare tre possibilità [33]: il materiale è pregiato ed adatto alla produzione di inerti per il calcestruzzo (classe A); il materiale è utilizzabile per rilevati e rinterri (classe B); il materiale non è utilizzabile ed è destinato al deposito in maniera definitiva (classe C).

A partire da questa classificazione, viene stabilita la quantità di smarino allocata nei depositi temporanei (prima di essere riutilizzata) e quella invece destinata ai depositi definitivi, considerando che il materiale di buona qualità non riutilizzato nei cantieri può essere anche venduto. Si distinguono quindi due fasi: il trasporto dal luogo di scavo fino ai portali e dai portali fino ai depositi. Il trasporto dello smarino dai fronti di scavo fino ai portali avviene prevalentemente all'interno delle gallerie; si adotta il trasporto esterno solo in casi inevitabili.

Durante le fasi di scavo meccanizzato, lo smarino viene evacuato tramite nastro trasportatore, modalità che si combina in modo ideale con le macchine TBM. Anche nelle fasi di scavo convenzionale viene preferito il nastro trasportatore; tuttavia, possono anche essere adottati camion o dumper.

Per il calcolo delle emissioni di CO₂ di seguito riportate, viene fatto riferimento al nastro trasportatore utilizzato nel cantiere di Aica, con capacità pari a 300 m³/h, alimentazione di tipo elettrico e potenza pari a 90 kW/km. I camion utilizzati in cantiere sono di classe Euro IV, con una capacità di 12 t e un consumo di 30 l ogni 100 km [34]. La CO₂ emessa per il trasporto dello smarino dal fronte di scavo fino ai portali è stata stimata conoscendo le quantità di materiale di scavo, le modalità di trasporto e i depositi a cui sono destinate.

Le emissioni sono pari a 18.361 t: 5.745 via camion e 12.616 via nastro. La seconda fase del trasporto del materiale di scavo, dai portali fino ai depositi, avviene via nastro trasportatore: replicando il metodo descritto in precedenza, nota la distanza dal deposito, si calcolano le emissioni di CO₂ dovute al trasporto dello smarino dai portali fino ai depositi, che ammontano a 2.086 t. Infine, è stato valutato

years per construction site. Being approximately 6 the total number of works for which the same TBM is used during its lifetime, a reductive factor of 1/6 of CO₂ emissions due to the production of machines was applied, resulting in a contribution of 3,103 t. Transport of machines in parts finally takes place via truck that are then assembled on site. For the TBM bearing, the most fragile component of the machine that cannot be dismantled, we resort to an exceptionally large goods vehicle. To transport all TBMs from the manufacturing site (Aprilia, LT) to the Aica construction site (about 700 km) CO₂ emissions of 364 were estimated.

4.3.2. Transport of excavation material

The next phase is the transport of the spoils, whose total volume amounts to approximately 21.5 million m³. It is a function of material management, for which there are three possibilities [33]: the material is valuable and suitable for the production of aggregates for concrete (class A); the material is usable for embankments and backfills (class B); the material is unusable and is intended to be permanently stored (class C).

Starting from this classification, the amount of spoils allocated in the temporary deposits is established (before being reused) and that intended for final deposits, considering that good quality material not reused in construction can also be sold. Two phases can be distinguished: transport from the excavation site to the portals and from the portals to the deposits. Transporting the spoils from the front lines of excavation to the portals is done mainly within the galleries; external transport occurs only in unavoidable cases.

During the mechanised excavation phases, the spoils are evacuated using a conveyor belt, which combines perfectly with the TBM machines. The conveyor is preferred even during conventional excavation; however, trucks or dumpers can also be used.

For the calculation of CO₂ emissions shown below, reference is made to the conveyor belt used in the Aica construction site, with a capacity of 300 m³/h, electrically powered and a capacity of 90 kW/km. Trucks used on the site are Euro IV class, with a capacity of 12 t and a consumption of 30 l per 100 km [34]. CO₂ emissions to transport spoils from the excavation front lines to the portals were estimated by knowing the amount of excavated material, transport arrangements and deposits for which they are intended.

Emissions are equal to 18361 t: 5745 via truck and 12616 using the conveyor. The second phase of the transport of excavation material, from the portals to the deposits, takes place using a conveyor belt: replicating the method described above, knowing the distance from the storage, the CO₂ emissions caused by transporting the spoils from the portals to deposits are calculated, which totalled 2.086 t. Finally, the contribution was evaluated in terms of CO₂ production due to transport of excavated material destined for sale.

il contributo in termini di produzione di CO₂ dovuto al trasporto del materiale di scavo destinato alla vendita.

Secondo la delibera della Giunta Provinciale di Bolzano n. 3937 del 27.10.2008, il materiale di scavo può essere trasportato tramite camion per distanze inferiori ai 20 km. Oltre tale distanza, si deve ricorrere a sistemi di trasporto alternativi. Avendo identificato le ditte produttrici di calcestruzzo nel raggio di 20 km, si nota come la loro distanza dai cantieri BBT sia inferiore alla distanza media dalle cave di utilizzo dove essi si approvvigionano. Da ciò, ne deriva che il contributo della vendita del materiale di scavo (stimato in misura non superiore al 3% dello smarino) sia da considerarsi di riduzione al totale delle emissioni di CO₂; conseguentemente, tale quantità è stata trascurata nel calcolo.

4.4. Produzione materiali da costruzione e stabilizzazione dell'ammasso roccioso

La stabilizzazione dell'ammasso roccioso include la produzione dei materiali da costruzione, il loro trasporto in cantiere e la loro applicazione in opera. Quando la galleria è scavata con metodo convenzionale, dapprima viene dimensionato un rivestimento primario, al fine di garantire il sostegno per la durata della fase di costruzione, quindi viene aggiunto un rivestimento definitivo.

Il rivestimento primario è ottenuto tramite l'applicazione di uno strato di calcestruzzo proiettato (spritzzbeton) di spessore variabile, rinforzato con acciaio sotto forma di reti metalliche o di fibre. Il rivestimento definitivo, invece, consiste in calcestruzzo gettato in opera, dello spessore variabile da 30 a 60 cm a seconda del tipo di roccia; il calcestruzzo è armato solo nelle tratte più critiche, prevalentemente in corrispondenza delle stazioni multifunzione, dei cameroni e dei cunicoli trasversali.

Con lo scavo meccanizzato, il rivestimento primario della galleria può avvenire in modo analogo a quello appena descritto, ma più frequentemente si ricorre a conci prefabbricati posati in opera dalla TBM. Il calcestruzzo armato rappresenta il materiale che incide in misura maggiore sulle emissioni di CO₂. Note le quantità di materiali necessarie per la sua fabbricazione, per calcolare le emissioni di CO₂ dovute alla sua produzione, si scompone il processo nelle sue diverse fasi (frantumazione dell'inerte, produzione del cemento, impianto di betonaggio, produzione del calcestruzzo prefabbricato, applicazione del calcestruzzo proiettato, produzione dell'acciaio).

4.4.1. Calcestruzzo

Il calcestruzzo è una miscela composta da legante, acqua, inerti e, a seconda delle necessità, additivi. Parte del materiale utilizzato come inerte viene recuperato dalla fase di perforazione delle gallerie, utilizzando direttamente lo smarino trasportato presso i portali di accesso (si veda il paragrafo precedente). Per poterlo riutilizzare è prima necessario frantumarlo tramite un frantoio semovente a mascelle: per tale operazione, si sono state stimate emissioni pari a 2.628 t (tabella 4).

According to the resolution of the Provincial Council of Bolzano n° 3937 of 27.10.2008, the excavated material can be transported by truck for distances of less than 20 km. Beyond that distance, one must resort to alternative transport systems. Having identified concrete producers within 20 km, we can observe that their distance from the BBT sites is less than the average distance from the procurement quarries used by the former. From this, it follows that the contribution from the sale of excavated material (estimated as no more than 3% of the spoils) is considered as a reduction of the total CO₂ emissions: consequently, that amount has been neglected in the calculation.

4.4. Construction materials production and stabilisation of rock mass

Rock mass stabilisation includes the production of construction materials, their transport on site and application. When the tunnel is excavated using the conventional method, first a primary lining is dimensioned to ensure support for the duration of the construction phase, subsequently a final coating is added.

Primary coating is obtained through the application of a layer of sprayed concrete (shotcrete) of variable thickness, reinforced with steel in the form of metal or fibre wire net. The final coating, instead, consists of in situ concrete, with a variable thickness from 30 to 60 cm depending on the type of rock; concrete is armed only in the most critical stretches, mainly at the multifunction stations, halls and cross tunnels.

With the mechanised excavation, the primary lining of the tunnel can be done in the same way as just described, but prefabricated segments installed by the TBM are most frequently used. Reinforced concrete is the material that has greater CO₂ emissions. Knowing the amount of materials needed for its manufacture, to calculate CO₂ emissions from its production, the process is broken down in its various stages (aggregates grinding, cement production, batching plant, prefabricated concrete production, application of shotcrete, steel production).

4.4.1. Concrete

Concrete is a mixture of binder, water, aggregates and additives, as required. Some of the material used as aggregate is retrieved from the drilling phase of the galleries, using the spoils transported to access portals (see previous paragraph). For reuse, it must first be crushed using a self-moving jaw crusher: to perform this operation 2628 t of emissions were estimated (table 4).

The quantities used in the construction of the BBT amount to almost 6 Million m³ ([33], [36]). Taking as reference the composition type for Rck 35 concrete, the most used in works of this kind, almost 2.4 million tons of cement are needed for its production.

TABELLA 4 – TABLE 4

CO₂ per la frantumazione dell'inerte
CO₂ for crushing of aggregates

| Inerti per calcestruzzo Aggregates for concrete [m ³] | Potenza frantoio Crusher power [kW] | Alimentazione Power supply | Capacità frantoio Crusher capacity [t/h] | Densità inerti Aggregates density [kg/m ³] | Capacità oraria frantoio Hourly capacity of crusher [m ³ /h] | Tempo funzionamento Operation time [h] | Consumo energetico Power Consumption [kWh] | Fattore di conversione Conversion factor [Kg/kWh] | CO ₂ [t] |
|---|---|-------------------------------|--|--|---|--|--|---|-----------------------------|
| (1) | (2) | | (3) | (4) | (5)=(3)/(4)·10 ³ | (6)=(1)/(5) | (7)=(2)·(6) | (8) | (9)=(7)·(8)/10 ³ |
| 6.231.000,00 | 187 | Elettrica Electric | 250 | 1.857,00 | 134,63 | 46.283,87 | 8.655.083,32 | 0,304 | 2.627,68 |

(Fonte - Source: (2) (3): [35]; (4): [23]).

Le quantità utilizzate nella costruzione del BBT ammontano a quasi 6 Mio m³ ([33], [36]). Prendendo a riferimento la composizione tipo per un calcestruzzo Rck 35, la più utilizzata in opere di tale natura, servono quasi 2,4 Mio t di cemento per la sua produzione.

Nei cantieri è utilizzato prevalentemente cemento pozzolanico (70% del cemento totale), ma una componente considerevole (30% del calcestruzzo totale) è rappresentata dal cemento Portland, utilizzato prevalentemente per la produzione dello spritzbeton. Il coefficiente di emissione del cemento è il risultato di una media ponderata, derivata dai rispettivi fattori di emissione dei due cementi. Dai calcoli riportati in tabella 5, per la produzione del cemento risulta necessaria una quantità totale di CO₂ pari a 1.561.007 t.

On construction sites Pozzolan cement is primarily used (70% of total cement), but a considerable component (30% of the total concrete) is Portland cement, mainly used for the production of shotcrete. The emission coefficient of concrete is the result of a weighted average, derived from the respective emission factors of the two cements. From the calculations shown in table 5, a total quantity of 1.561.007 tons of CO₂ is necessary for the manufacture of cement.

Concrete production takes place mainly on site, by mixing using the batch plant. Using the technical data obtained directly from the Mules site [37], this phase involves a total emission of CO₂ equal to 2213 t (table 6). Only the precast segments used in the construction of the Aica tunnel

TABELLA 5 – TABLE 5

Emissioni di CO₂ per la produzione del cemento
CO₂ emissions for cement production

| Calcestruzzo Concrete [N/mm ²] | Cemento in 1 m ³ di cls tipo Cement in 1 m ³ of standard concrete [kg/m ³] | Calcestruzzo utilizzato Concrete used [m ³] | Cemento utilizzato Used concrete [t] | Fattore conversione cemento portland (30%) Portland cement conversion factor (30%) [kgCO ₂ /t] | Fattore conversione cemento pozzolanico (70%) Pozzolan cement conversion Factor (70%) [kgCO ₂ /t] | CO ₂ produzione cemento totale Total CO ₂ production from cement [t] |
|--|--|---|--|---|--|--|
| | (1) | (2) | (3)=(1)·(2)·10 ⁻³ | (4) | (5) | (6)=[(4)·0,3+(3)·0,7]·(3)/10 ³ |
| Rck 35 | 400 | 5.972.260 | 2.388.904 | 622 | 576 | 1.561.007,02 |

(Fonte - Source: (4), (5): [21]).

La produzione del calcestruzzo avviene prevalentemente in cantiere, attraverso la miscelazione tramite impianto di betonaggio. Utilizzando i dati tecnici ricavati direttamente presso il cantiere di Mules [37], questa fase comporta un'emissione complessiva di CO₂ pari a 2.213 t (tabella 6). Solo i conci prefabbricati utilizzati per la costruzione del cunicolo di Aica (400.000 t di calcestruzzo, pari al 7% del calcestruzzo totale) sono prodotti fuori opera. È stata stimata un'emissione complessiva di CO₂ pari a 13.084 t, sulla base dei dati forniti da misurazioni dirette, condotte dalla ditta produttrice (Ipa Precast SpA di Calcinatè).

(400.000 tons of concrete, equal to 7% of the total concrete) are produced off work. A total emission of CO₂ of 13084 t was estimated, based on data provided by direct measurements carried out by the manufacturer (Ipa Precast SpA in Calcinatè).

The last step is the application of shotcrete, using the Sika - PM 500 machine. Equipped with a pump with a power of 37 kW, this machine is operated electrically, it has a maximum theoretical capacity of 30 m³/h and a regime of about 25 m³/h. Emissions from its use are 1638 t (table 7).

TABELLA 6 – TABLE 6

Emissioni di CO₂ dell'impianto di betonaggio
CO₂ emissions of the batching plant

| Capacità Capacity [m ³ /h] | Quantità cls per rivestimento definitivo Concrete quantity for final coating [m ³] | Tempo funzionamento Operation Time [h] | Potenza Power [kW] | Alimentazione Power supply | Consumo energetico Power consumption [kWh] | Fattore conversione Conversion factor [Kg/kWh] | CO ₂ [kg] | CO ₂ [t] |
|---|---|---|--------------------------|-------------------------------|--|--|-------------------------|-----------------------------|
| (1) | (2) | (3)=(2)/(1) | (4) | | (5)=(3)·(4) | (6) | | (7)=(5)·(6)/10 ³ |
| 100 | 5.563.810 | 55.638,10 | 131 | elettrica | 7.288.590 | 0,304 | 2.212.816 | 2.212,82 |

(Fonte - Source: (1), (4): [37]).

L'ultimo passaggio consiste nell'applicazione del calcestruzzo proiettato, tramite la macchina Sika – PM 500. Dotata di una pompa con 37 kW di potenza, tale macchina ha un funzionamento elettrico, una portata teorica massima di 30 m³/h ed una portata operativa di regime di circa 25 m³/h. Le emissioni derivanti dal suo utilizzo sono 1.638 t (tabella 7).

4.4.2. Steel

Knowing the total amount of concrete and the different types adopted, the amount of steel contained in the form of steel fibres, wire mesh or centrings is calculated through the analysis of some standard type cross sections. About 20 radial anchors per metre of gallery are used in conventionally excavated sections, measuring 6 m and each weighing 23.6

TABELLA 7 – TABLE 7

Consumo energetico per l'applicazione del calcestruzzo proiettato – sistema BBT
Energy consumption for application of shotcrete – BBT system

| Portata Capacity [m ³ /h] | Potenza pompa Power pump | Alimentazione Power supply | Quantità di cls Quantity of concrete [m ³] | Funzionamento Operation [h] | Consumo energetico Power consumption [kWh] | Fattore conversione Conversion factor [Kg/kWh] | CO ₂ [kg] | CO ₂ [t] |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------------|--|--|-------------------------|------------------------|
| (1) | (2) | | (3) | (4)=(3)/(1) | (5)=(2)·(4) | (6) | (7)=(5)·(6) | |
| 25 | 37 | elettrica | 1.680.000,00 | 67.200,00 | 2.486.400,00 | 0,304 | 1.638.070,00 | 1.638,07 |

(Fonte - Source: (1), (2): [38]).

4.4.2. Acciaio

Note la quantità totale di calcestruzzo e le tipologie adottate, la quantità di acciaio contenuto sotto forma di fibre di acciaio, reti metalliche o centine è calcolata attraverso l'analisi di alcune sezioni trasversali tipo. Nelle tratte scavate in convenzionale sono utilizzati circa 20 ancoraggi radiali per metro di galleria, della lunghezza di 6 m e peso di 23,6 kg ciascuno [39], per un totale di 56.125 t di acciaio. Dove è necessario oltrepassare un fiume per accedere al portale di imbocco, vengono costruiti ponti di attraversamento (per il BBT, quattro) e richiedono l'utilizzo di 610 t di acciaio. Complessivamente, la quantità totale di acciaio utilizzata per la costruzione del sistema BBT (e comprendente armatura, ancoraggi, ponti) ammonta a circa 181.000 t, per i quali sono stimate emissioni di CO₂ pari a 358.555 t (tabella 8).

kg [39], for a total of 56125 t of steel. Where a river must be crossed to access the entrance portal, crossing bridges are built (four, for the BBT) and require the use of 610 tons of steel. Altogether, the total amount of steel used in the construction of the BBT system (including armour, anchors, bridges) amounts to approximately 181.000 tons, for which CO₂ emissions of 358,555 t are estimated (table 8).

4.4.3. Trasporto materiale da costruzione

Nelle tratte di galleria dove sono utilizzati i conci prefabbricati, devono essere considerate anche le emissioni dovute al loro trasporto. Nel caso del cantiere di Aica, la prima parte del percorso comprende il tragitto dalla ditta di produzione, con sede a Calcinante (BG), fino al cantiere

4.4.3. Building material transport

In the gallery routes where precast segments are used, emissions from transport should also be considered. In the case of the Aica construction site, the first part of the route includes the journey from the production company, headquartered in Calcinante (BG), up to the construction site. This contribution is estimated at 2,011 tons of CO₂. For other building lots this journey is not considered because the segments are produced directly on site. The second part of the transport takes place on site, via rail with shuttle trains from external deposits to the application site. According to the site manager of Aica during excavation, 20 daily round trips are performed (16 for the transport of the precast segments and 4 for maintenance). Assuming train

Emissioni di CO₂ derivanti dalla produzione di acciaio
CO₂ emissions from steel production

| Acciaio per armatura Reinforcement steel [t] | Ancoraggi radiali Radial anchors [t] | Ponti Bridges [t] | Totale acciaio Total steel [t] | Fattore conversione acciaio Steel conversion factor [kg/t] | CO ₂ [kg] | CO ₂ [t] |
|--|--|-------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------|------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4)=(1)+(2)+(3) | (5) | (6)=(4)·(5) | |
| 124.353 | 56.125 | 610 | 181.088 | 1.980 | 358.554.897 | 358.554,90 |
| Nota (3): 1 MJ = 0,278 kWh | | | | | | |
| (Fonte - Source: (1): [40]; (2): [39], [41]). | | | | | | |

re. Tale contributo è stimato in 2.011 t di CO₂. Per gli altri lotti di costruzione questo tragitto non viene considerato perché i conci sono prodotti direttamente in cantiere. La seconda parte del trasporto avviene in cantiere, su rotaia per mezzo di treni shuttle dai depositi esterni fino al luogo di applicazione. Secondo il direttore di cantiere di Aica, durante la fase di scavo, si effettuano quotidianamente 20 viaggi in andata e 20 in ritorno (di cui 16 per il trasporto dei conci prefabbricati e 4 di manutenzione). Ipotizzando un consumo del treno pari a un litro di carburante ogni 5 km, la CO₂ emessa per trasportare i conci prefabbricati utilizzati per la costruzione del sistema BBT è pari a 502 t.

4.5. Operatività delle gallerie

La fase di costruzione prevede l'installazione di un impianto di illuminazione, ventilazione e raffreddamento delle gallerie, per garantire agli operai le condizioni adeguate all'esecuzione dei lavori: anche esse concorrono alle emissioni di CO₂. Per analizzare tali componenti, è possibile distinguere la fase di costruzione grezza dalla fase di attrezzaggio: nella prima, vengono realizzati lo scavo delle gallerie, dei cunicoli e le lavorazioni relative all'opera grezza; nella seconda vengono realizzate le sovrastrutture ferroviarie, gli impianti elettrici e le componenti tecnologiche.

4.5.1. Illuminazione in galleria

Nelle gallerie è installato un sistema di illuminazione con lampade da 36W, posizionate ad un intervallo di 10 m lungo la parete del tunnel. Tale impianto è operativo 24 ore al giorno, per 351 giorni all'anno (viene considerata una interruzione dei lavori di due settimane).

Nella fase di costruzione grezza dell'opera, la lunghezza della tratta illuminata varia in funzione dell'avanzamento dello scavo: le emissioni dovute all'illuminazione (quantificate in 4.802 t) vengono calcolate considerando una lunghezza fissa riferita al punto medio di ogni componente. Per il cunicolo esplorativo e le finestre di accesso intermedio il valore stimato è pari a 2.026 t. In questo caso, si considera l'illuminazione non solo durante la fase di scavo, ma anche durante il loro funzionamento, per consentire le operazioni di costruzione delle altre componenti del sistema.

consumption equal to one litre of fuel every 5 km, the CO₂ emitted to transport the precast construction segments used to build the BBT System totalled 502 t.

4.5. Operability of galleries

The construction phase involves the installation of a lighting system, ventilation and cooling of tunnels, to guarantee workers adequate conditions to the completion of the work: they also contribute to CO₂ emissions. To analyse these components, the building phase can be distinguished from the tooling phase: in the first, the excavation of tunnels, burrows and processes regarding raw work is performed; in the second, the railway superstructures, the electrical systems and technological components are made.

4.5.1. Tunnel lighting

A lighting system is installed in the galleries with 36W lamps, located at an interval of 10 m along the wall of the tunnel. This system is operational 24 hours a day, 351 days a year (an interruption of work of two weeks is taken into account).

During the building of the raw work, the length of the illuminated section varies depending on the progress of the excavation: emissions due to lighting (quantified in 4802 t) are calculated on the basis of a fixed length referring to the midpoint of each component. For the exploratory tunnel and intermediate access windows the estimated value is equal to 2,026 tons. In this case, we consider not only lighting during the excavation phase, but also during their operation, to allow construction of the other system components.

During tooling, for which we assume an average duration of 3 years and 6 months, emissions are estimated at 6366 t. Altogether, therefore, for the lighting of the BBT system galleries, CO₂ emissions amounted to 13195 t.

4.5.2. Tunnel ventilation and cooling

As for the calculation of lighting, also in the case of ventilation and cooling the CO₂ emissions are distinguished between the rough construction phase and the tooling phase. In the case of ventilation, all work areas have to be provided with fresh air, which is passed through pipelines up to

Nella fase di attrezzaggio, per la quale si ipotizza una durata media pari a 3 anni e 6 mesi, le emissioni sono stimate in 6.366 t. Complessivamente, quindi, per l'illuminazione delle gallerie del sistema BBT, le emissioni di CO₂ risultano pari a 13.195 t.

4.5.2 Ventilazione e raffreddamento delle gallerie

Come per il calcolo dell'illuminazione, così anche nel caso di ventilazione e raffreddamento le emissioni di CO₂ vengono distinte tra la fase di costruzione grezza e la fase di attrezzaggio. Nel caso della ventilazione, tutte le zone di lavoro devono essere approvvigionate con aria fresca, che viene fatta passare attraverso condotte fino alla zona di scavo secondo i valori limite di quantità e velocità d'aria. Al contempo, l'aria viziata viene fatta fuoriuscire dal portale principale.

Per ottenere queste prestazioni, agli imbocchi della galleria sono installati ventilatori di grosse dimensioni, mentre sono previsti ventilatori ausiliari nei settori di avanzamento, nelle condotte, nelle paratie climatiche e nelle chiuse. Per il raffreddamento delle canne si impiegano macchine refrigeranti che sottraggono calore all'aria e la cedono all'acqua di raffreddamento. Condotte appositamente realizzate trasportano l'acqua calda usata per il raffreddamento degli impianti fuori dalla galleria, dove torri di raffreddamento garantiscono lo scambio di calore con l'aria esterna. Per la fase di costruzione grezza si fa riferimento al settore di cantiere più critico, ossia l'area di Ahrental, ipotizzando un consumo energetico unitario simile anche per gli altri due settori di costruzione (Mules e Wolf). Nella fase di costruzione grezza le emissioni di CO₂ per la ventilazione e il raffreddamento di tutto il sistema BBT ammontano a 77.132 t (tabella 9).

Infine, la fase di attrezzaggio delle gallerie è stata analizzata con un calcolo simile a quello di tabella 9. Conoscendo le potenze richieste dagli impianti per la ventilazione e il raffreddamento dell'intero sistema [42], le emissioni di CO₂ stimate risultano pari a 73.578 t. Complessivamente, quindi, le emissioni di CO₂ dovute alla ventilazione e al raffreddamento di tutto il sistema BBT nella fase di costruzione grezza e attrezzaggio risultano pari a 150.710 t.

4.6. Operatività dei cantieri

Le nove aree di cantiere sono localizzate presso gli imbocchi e gli accessi laterali al tunnel. Il lato italiano conta quattro cantieri: in corrispondenza dell'imbocco del cunicolo esplorativo di Aica, dell'attacco intermedio Mules, nella zona del sottoattraversamento dell'Isarco e presso la stazione di Fortezza ([16], [23], [24], [25], [41], [43], [44], [45]). Il lato austriaco prevede l'installazione di cinque aree: all'imbocco della finestra di accesso di Tulfes, Ampass, Ahrental e Wolf, e nei pressi della stazione di Innsbruck [45].

4.6.1. Impianto di illuminazione aree esterne, funzionamento di uffici e officine meccaniche

Il calcolo delle emissioni dovute all'illuminazione delle aree esterne, al funzionamento degli uffici e delle offi-

the excavation area according to the limit values of quantity and air speed. At the same time, stale air is forced out of the main portal.

To achieve these benefits, large fans have been installed at the tunnel entrances, while auxiliary fans are provided in the advancement areas, in the pipelines, in the weather bulkheads and in locks. Refrigeration machines are used for cooling pipes that remove heat from the air and release it to the cooling water. Specially made pipelines carry the hot water used for the cooling of equipment out of the tunnel, where cooling towers ensure the exchange of heat with the outside air. For the phase of rough construction reference is made to the more critical construction site sector that is the Ahrental area, assuming unit energy consumption also similar for the other two construction sectors (Mules and Wolf). In the rough construction phase CO₂ emissions for ventilation and cooling of the entire BBT system amounted to 77.132 t (table 9).

Finally, the tooling of the tunnels was analysed using a calculation similar to that of table 9. Knowing the power required by the ventilation and cooling systems of the entire plant [42], the estimated CO₂ emissions amounted to 73.578 tons. Overall, therefore, CO₂ emissions due to ventilation and cooling of the entire BBT system during rough construction and tooling amounted to 150.710 tons.

4.6. Operability of the construction sites

The nine areas of the site are located at the entrances and side entrances to the tunnel. The Italian side has four sites: at the entrance of the exploratory tunnel in Aica, the intermediate joint of Mules, in the Isarco underpass crossing area and at the station of Fortezza ([16], [23], [24], [25], [41], [43], [44], [45]). The Austrian side includes the installation of five areas: at the entrance of the access window of Tulfes, Ampass, Ahrental and Wolf, and near Innsbruck station [45].

4.6.1. Lighting of outdoor areas, operation of offices and workshops

The calculation of emissions from the lighting of the outer areas, the operation of offices and workshops is based on direct measurements carried out at the Unterplattner area of the AICA construction site (table 10). Using a current clamp the intensity of electric current of the lighting outside of the offices and the mechanical workshop was measured. It is thus possible to determine the energy consumption of the site (1.085 kWh/day), equal to 31.34 kWh/day per hectare of surface. The operating time of the lighting of the exterior areas of the construction site is a function of the hours of darkness at latitude 45 ° N = 4.321,35, whose annual average value is equal to 11.84 hours per day. Offices and workshops are in operation for 11 hours a day, from 7 to 18 hours.

TABELLA 9 – TABLE 9

Emissioni di CO₂ per la ventilazione e il raffreddamento nella fase di costruzione grezza
 CO₂ emissions for ventilation and cooling in the rough construction phase

| Ventilazione - settore Ahrenal - Ventilation - Ahrenal sector | | | |
|--|------------|---|------------------|
| Potenza richiesta dai ventilatori in fase di costruzione grezza (massima lunghezza di scavo) <i>Power required by the fans during rough construction (maximum excavation length)</i> | [kW] | (1) | 4.369,00 |
| Durata temporale fase costruzione grezza gallerie <i>Duration of the rough construction phase of galleries</i> | [a] | (2) | 3,5 |
| Durata temporale fase costruzione grezza gallerie <i>Duration of the rough construction phase of galleries</i> | [h] | (3) | 29.484 |
| Consumo energetico dei ventilatori <i>Power consumption of the ventilators</i> | [kWh] | (4) | 53.990.170 |
| Raffreddamento - settore Ahrenal - Cooling - Ahrenal sector | | | |
| Potenza richiesta dall'impianto di raffreddamento in fase di costruzione grezza (massima lunghezza di scavo) <i>Power demand from the cooling system in the rough construction phase (maximum excavation length)</i> | [kW] | (5) | 2.484 |
| Durata temporale fase costruzione grezza gallerie <i>Duration of the rough construction phase of galleries</i> | [a] | (6) | 3,5 |
| Durata temporale fase costruzione grezza gallerie <i>Duration of the rough construction phase of galleries</i> | [h] | (7) | 29.484 |
| Consumo energetico dell'impianto di raffreddamento <i>Energy consumption of the cooling system</i> | [kWh] | (8) | 30.696.174 |
| Ventilazione e raffreddamento - tutto il sistema BBT - Ventilation and cooling - entire BBT system | | | |
| Settori considerati: Ahrenal, Mules, Wolf <i>Sectors considered: Ahrenal, Mules, Wolf</i> | [n] | (9) | 3 |
| Fattore conversione CO ₂ <i>CO₂ conversion factor</i> | [kg/kWh] | (10) | 0,304 |
| CO₂ totale Total CO₂ | [t] | (7)=[(4)+(5)]·(9)·(10)·10⁻³ | 77.132,32 |
| Nota (3 e 7): il sistema è in funzione 24 ore al giorno, per 351 giorni su 365 <i>Note (3 and 7): the system is in operation 24 hours a day, for 351 days out of 365</i> | | | |
| Nota (4 e 8): consumo energetico stimato considerando l'avanzamento del fronte di scavo su intervalli temporali di 2 mesi <i>Note (4 and 8): energy consumption estimated considering the advancement of the excavation front of temporal intervals of 2 months</i> | | | |
| (Fonte - Source: (1), (5): [42]; (2), (6): [25]). | | | |

cine meccaniche si basa su misurazioni dirette effettuate presso l'area Unterplattner del cantiere di Aica (tabella 10). Tramite una pinza amperometrica è stata misurata l'intensità di corrente elettrica dell'impianto di illuminazione esterna, degli uffici e dell'officina meccanica. È possibile così determinare il consumo di energia del cantiere (1.085 kWh/giorno), pari a 31,34 kWh/giorno per ettaro di superficie. Il tempo di funzionamento dell'impianto di illuminazione delle aree esterne di cantiere è funzione delle ore di buio alla latitudine 45° N = 4.321,35, il cui valore medio annuale è pari a 11,84 ore al giorno. Gli uffici e le officine meccaniche sono invece in funzione per 11 ore al giorno, dalle ore 7 alle ore 18.

I valori calcolati presso Unterplattner e riferiti al funzionamento di uffici e officine meccaniche sono stati considerati analoghi anche per gli altri cantieri. Per quanto riguarda l'illuminazione, invece, il consumo di

The values calculated at Unterplattner and referring to the operation of offices and engineering workshops have been considered similar also for the other sites. As for the illumination, however, the consumption of each site varies as a function of its extension. Whereas construction sites are in operation every day, 24 hours a day, for a total of 351 days out of 365, a total of 15.299 t of CO₂ were estimated (table 11).

4.6.2. Water treatment plant

In this phase we calculate the emissions produced to treat the water coming out from the galleries as a result of the excavation, before being pumped back into waterways: in all the steps described above, the suspensions produced during excavation and consolidation operations and the accidental loss of oil, are handled by special treatment plants for water purification [46].

Consumo energetico giornaliero dell'area di cantiere Unterplattner ad Aica
Daily energy consumption of the Unterplattner site area in Aica

| | Intensità corrente <i>Power load</i> [A] | Tensione elettrica <i>Voltage</i> [V] | Fasi <i>Phases</i> [n] | cosΦ | Potenza <i>Power</i> [kW] | Tempo funzionamento <i>Operation time</i> [h/d] | Consumo energetico <i>Power consumption</i> [kWh/d] |
|--|---|--|------------------------------|------|---------------------------------------|--|--|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5)=(1)·(2)·(4)·(3) ^(-1/2) | (6) | (7)=(6)·(5) |
| Illuminazione esterna <i>Outdoor lighting</i> | 20 | 400 | 3 | 0,85 | 11,78 | 11,84 | 139,45 |
| Uffici <i>Offices</i> | 96 | 400 | 3 | 0,85 | 56,53 | 11 | 621,88 |
| Officina meccanica <i>Engineering workshop</i> | 50 | 400 | 3 | 0,85 | 29,44 | 11 | 323,89 |
| Totale consumo energetico <i>Total energy consumption</i> | | | | | | [kWh/d] | 1.085,22 |
| Totale consumo energetico per ettaro di superficie <i>Total energy consumption per hectare of area</i> | | | | | | [kWh/d-ha] | 31,34 |

ogni cantiere varia in funzione della sua estensione. Considerando che i cantieri sono in funzione tutti i giorni, 24 ore su 24, per un totale di 351 giorni su 365, sono state stimate complessivamente 15.299 t di CO₂ (tabella 11).

4.6.2. Impianto di trattamento delle acque

In questa fase si calcolano le emissioni prodotte per trattare l'acqua che fuoriesce dalle gallerie a seguito dello scavo, prima di essere reimpressa nei corsi d'acqua: in tutte le fasi precedentemente descritte, le sospensioni prodotte durante le operazioni di scavo e di consolidamento, nonché le perdite accidentali di oli, sono gestite da appositi impianti di trattamento per la depurazione dell'acqua [46].

La stima del consumo energetico si basa per via comparativa, a partire da misurazioni dirette effettuate dalla ditta BAUER AG nei cantieri di Armsteg, Faido ed Erstfeld per la Galleria di Base del Gottardo. Si assume una potenza richiesta dagli impianti di trattamento pari a 0,15 kW per m³/h d'acqua⁽⁴⁾. Le venute di acqua sono state calcolate da uno studio idrogeologico elaborato da GEOTEAM per conto di BBT SE, che fornisce le valutazioni sia per le portate ipotizzabili durante le fasi di scavo in regime transitorio (portata di picco), sia per le portate stabilizzate a distanza di mesi/anni dal termine dello scavo delle opere. Tali valori hanno natura cautelativa: nei cantieri di Aica e Mules sono state infatti registrate portate considerevolmente inferiori rispetto ai valori previsti. Le emissioni di CO₂ derivanti dall'utilizzo dell'impianto di trattamento delle acque del sistema BBT sono state quantificate in 15.911 t (tabella 12).

⁽⁴⁾ Tali valori non tengono conto della potenza richiesta per l'eventuale sollevamento delle acque di drenaggio fino all'impianto di trattamento. Questo aspetto dipende dalla specifica disposizione degli impianti di ogni cantiere e da come le acque vengono convogliate alle vasche.

The energy consumption estimate is based on a comparison, from direct measurements carried out by BAUER AG on the construction sites of Armsteg, Faido and Erstfeld for the Gotthard Base Tunnel. A power demand of 0.15 kW per m³/h of water⁽⁴⁾ by the treatment facilities is assumed. The water coming is calculated from a hydrogeological study elaborated by GEOTEAM on behalf of BBT SE, which provides feedback both for the assumed flow rates during the excavation stages in transient regime (peak flow rate), and for the stabilised flows at a distance of months/years from the end of the excavation works. These values have a precautionary nature: in the Aica and Mules sites considerably lower flow rates than those expected are recorded. CO₂ emissions from the use of the water treatment plant of the BBT system were quantified in 15.911 t (table 12).

The water coming out of the exploratory and drainage tunnel and the main galleries reach the treatment plants by gravity. Only water coming from the excavation of the access windows require lifting equipment, for which additional CO₂ emissions of 1.171 tons are expected. Overall, therefore, CO₂ emissions due to water treatment plants amount to 17.080 tons.

5. Summary of CO₂ emissions and discussion of results

The amount of CO₂ emitted during the construction phase of the BBT is estimated a total 2.280.550 t (fig. 3,

⁽⁴⁾ Such values do not take into account the power necessary for the possible raise of the drainage water up to the treatment plant. This aspect depends both on the specific plants arrangement in each single site and on the way to convey the drainage water to the tanks.

TABELLA 11 – TABLE 11

Emissioni di CO₂ delle aree di cantiere
CO₂ emissions of construction sites

| | Superficie Area [ha] | Costruzione grezza Rough construction [a] | Attrezzaggio Tooling [a] | Illuminazione Lighting [kWh/d-ha] | Consumo uffici Consumption of offices [kWh/d] | Consumo officine Consumption of workshops [kWh/d] | Funzionamento Operation [d] | Consumo energetico totale Total energy consumption [kWh] | Fattore conversione Conversion factor [kg/kWh] | CO ₂ [t] |
|---|----------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|---|---|-----------------------------|--|--|-------------------------------|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8)=[(2)+(3)]·(7)·[(4)·(1)+(5)+(6)] | (9) | (10)=(8)·(9)·10 ⁻³ |
| Cantieri Italia - Construction sites Italy | | | | | | | | | | |
| Aica (Unterplattner) | 4,45 | 1,5 | 7 | 31,34 | 1.349,47 | 1.349,47 | 351 | 6.534.671 | 0,435 | 2.842,58 |
| Aica (Hinterriger) | 4,30 | 1,5 | 7 | | | | | 6.520.797 | | 2.836,55 |
| Sottoattraversamento dell'Isarco Under crossing of the Isarco | 8,71 | 6,3 | 3 | | | | | 7.254.727 | | 3.155,81 |
| Fortezza | 5,10 | 0,9 | 1 | | | | | 1.318.958 | | 573,75 |
| Mules | 9,56 | 8,8 | 4 | | | | | 10.551.871 | | 4.590,06 |
| Cantieri Austria - Construction sites Austria | | | | | | | | | | |
| Wolf | 1,29 | 7,7 | 4,3 | 31,34 | 1.349,47 | 702,85 | 351 | 8.812.810 | 0,216 | 3.833,57 |
| Ahrental | 9,70 | 7,1 | 5,2 | | | | | 10.158.693 | | 4.419,03 |
| Innsbruck | 0,87 | 2,9 | 4 | | | | | 5.035.832 | | 2.190,59 |
| Ampass | 11,65 | 5,8 | 4,8 | | | | | 7.770.231 | | 3.380,05 |
| Tulfes | 15,65 | 2,3 | 2,3 | | | | | 3.392.008 | | 1.475,52 |
| Totale Total | | | | | | | | | | 15.298,77 |
| Nota (3): per il cantiere di Aica non è prevista fase di attrezzaggio. Alla rispettiva voce, sono considerati gli anni in cui il cantiere è in funzione per la realizzazione delle gallerie principali. Note (3): Tooling is not provided for the AICA site. In that item, the years when the site is in operation for the realisation of the main galleries are considered. | | | | | | | | | | |
| (Fonte - Source: [23], [24], [25], [41], [43]). | | | | | | | | | | |

Le acque che fuoriescono dal cunicolo esplorativo e di drenaggio e dalle gallerie principali raggiungono gli impianti di trattamento per gravità. Solo le acque che provengono dallo scavo delle finestre di accesso necessitano di impianti di sollevamento, per le quali sono previste ulteriori emissioni di CO₂ pari a 1.171 t. Complessivamente, quindi, le emissioni di CO₂ dovute agli impianti di trattamento delle acque ammontano a 17.080 t.

5. Riepilogo emissioni di CO₂ e discussione dei risultati

La quantità di CO₂ emessa durante la fase di costruzione del BBT è stimata complessivamente in 2.280.550 t (fig. 3, tabella 13). La produzione del materiale da costruzione rappresenta la percentuale più elevata, pari a circa l'85% delle emissioni totali. Il 7% è prodotto per garantire l'illuminazione, la ventilazione e il raffreddamento delle gallerie. A seguire, le operazioni di scavo incidono per il 7%, il funzionamento dei cantieri per l'1%. Tra le singoli

table 13). Production of the building material represents the largest proportion, approximately 85% of total emissions. 7% is produced to ensure lighting, ventilation and cooling of tunnels. Excavation operations then follow accounting for 7%, the operation of the sites for 1%. Among the individual elements cement production is highlighted, which with 1.500.00 t, is equal to 68% of total emissions. This is due to the large amount of material required for the construction of the work, estimated at 2.4 million tons, and to the production process that is very costly in terms of energy: blast furnaces are used to produce all the necessary klinker for the realisation of the cement, that reach very high temperatures.

To have a comparable order of magnitude, the total is divided in the 18 years forecasted for the construction phase and tooling of the work, thus achieving about 127 kt CO₂. This value is comparable to the annual emission of an Italian town of about 20.000 inhabitants (e.g. Bres-

Emissioni di CO₂ degli impianti di trattamento delle acque
CO₂ emissions from water treatment plants

| | Localiz- zazione <i>Locali- sation</i> | Portata stabilizzata <i>Stabilised capacity</i> [m³/h] | Potenza <i>Power</i> [kW/(m³/h)] | Potenza <i>Power</i> [kW] | Tempo <i>Time</i> [a] | Tempo <i>Time</i> [h] | Consumo energetico <i>Power consumption</i> [kWh] | Fattore conversione <i>Conversion factor</i> [kg/kWh] | CO ₂ [t] |
|---|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3)=(1)·(2) | (4) | (5)=(4)·8670 | (6)=(3)·(5) | (7) | (8)=(6)·(7)·10 ⁻³ |
| Lato Austria - <i>Austrian side</i> | | | | | | | | | |
| Finestra Wolf <i>Wolf Window</i> | Wolf | 18,00 | 0,15 | 2,70 | 2,00 | 17.520 | 47.304 | 0,216 | 10,22 |
| Finestra Ahrental <i>Ahrental Window</i> | Ahrental | 82,80 | | 12,42 | 1,33 | 11.651 | 144.703 | | 31,26 |
| Cunicolo <i>Burrow</i> | Innsbruck | 374,40 | | 56,16 | 6,00 | 52.560 | 2.951.770 | | 637,58 |
| Cunicolo e gallerie principali <i>Burrow and main galleries</i> | Innsbruck | 1.116,00 | | 167,40 | 6,00 | 52.560 | 8.798.544 | | 1.900,49 |
| Lato Italia - <i>Italian side</i> | | | | | | | | | |
| Finestra Mules <i>Mules window</i> | Mauls | 90,00 | 0,15 | 13,50 | 1,17 | 10.220 | 137.970 | 0,435 | 60,02 |
| Cunicolo di Aica <i>Aica burrow</i> | Aica | 514,80 | | 77,22 | 1,50 | 13.140 | 1.014.671 | | 441,38 |
| Cunicolo <i>Burrow</i> | Aica | 1.098,00 | | 164,70 | 5,00 | 43.800 | 7.213.860 | | 3.138,03 |
| Cunicolo e gallerie principali <i>Burrow and main galleries</i> | Aica | 2.826,00 | | 423,90 | 6,00 | 52.560 | 22.280.184 | | 9.691,88 |
| Totale - <i>Total</i> | | | | | | | | | 15.910,85 |
| (Fonte - Source: [46], [47], [48]). | | | | | | | | | |

voci si evidenzia la produzione del cemento, che con 1.500.000 t, equivale al 68% delle emissioni totali. Questo è dovuto alla grande quantità di materiale necessario per la costruzione dell'opera, quantificato in 2,4 Mio t, e al processo produttivo molto dispendioso a livello energetico: per produrre tutto il clinker necessario alla realizzazione del cemento, sono impiegati altiforni che raggiungono temperature molto elevate.

Per avere un ordine di grandezza comparabile, il totale viene suddiviso nei 18 anni previsti per la fase di costruzione e di attrezzaggio dell'opera, ottenendo così circa 127 kt CO₂. Questo valore è equiparabile all'emissione annua di un comune italiano di circa 20.000 abitanti (es. Bressanone), considerando un'emissione media per abitante pari a 6,3 t CO₂ [49].

Inoltre, è interessante paragonare

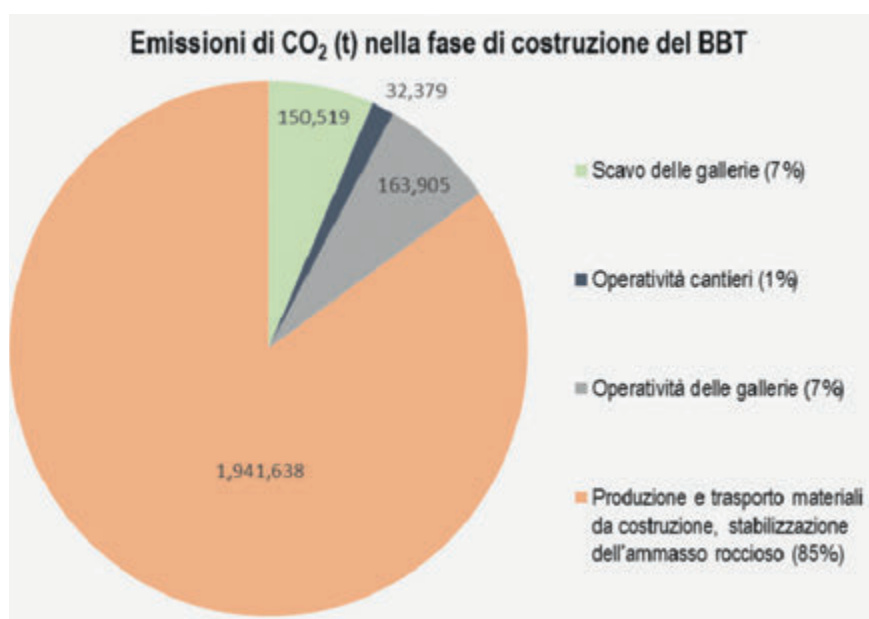


Fig. 3 - Emissioni di CO₂ nella fase di costruzione del BBT.
Fig. 3 - CO₂ emissions in the construction phase of the BBT.

TABELLA 13 – TABLE 13

Sintesi delle emissioni di CO₂ nella fase di costruzione del BBT
Summary of CO₂ emissions in the construction phase of the BBT

| Macrofasi <i>Macrophases</i> | Fattori di calcolo <i>Calculation factors</i> | CO ₂ emessa <i>CO₂ emitted</i> [t] | Somme e percentuali <i>Amounts and percentages</i> [%] |
|---|--|--|--|
| Scavo delle gallerie <i>Excavation of galleries</i> | Scavo meccanizzato <i>Mechanised excavation</i> | 101.913 | 150.519 (7%) |
| | Produzione TBM <i>TBM production</i> | 3.103 | |
| | Trasporto TBM <i>TBM transport</i> | 364 | |
| | Scavo convenzionale <i>Conventional excavation</i> | 17.680 | |
| | Esplosione <i>Explosion</i> | 7.012 | |
| | Trasporto materiale di scavo (via camion) <i>Transport of excavated material (by truck)</i> | 5.745 | |
| | Trasporto materiale di scavo (via nastro) <i>Transport of excavated material (by conveyor)</i> | 14.702 | |
| Produzione e trasporto materiali da costruzione; stabilizzazione dell'ammasso roccioso <i>Production and transport of construction materials; stabilisation of the rock mass</i> | Frantumazione inerte <i>Crushing of aggregate</i> | 2.628 | 1.941.638 (85%) |
| | Cemento <i>Cement</i> | 1.561.007 | |
| | Calcestruzzo prefabbricato <i>Precast concrete</i> | 13.084 | |
| | Impianto betonaggio <i>Batching plant</i> | 2.213 | |
| | Applicazione spritzbeton <i>Application of shotcrete</i> | 1.638 | |
| | Acciaio <i>Steel</i> | 358.555 | |
| | Trasporto materiale da costruzione (via trenino shuttle) <i>Transport of building material (via shuttle train)</i> | 502 | |
| | Trasporto materiale da costruzione cunicolo di Aica (via camion) <i>Transport of building material of AICA burrow (by truck)</i> | 2.011 | |
| Operatività delle gallerie <i>Operability of galleries</i> | Illuminazione gallerie <i>Tunnel lighting</i> | 13.195 | 163.905 (7%) |
| | Ventilazione e raffreddamento <i>Ventilation and cooling</i> | 150.710 | |
| Operatività cantieri <i>Construction site operability</i> | Illuminazione aree esterne, funzionamento uffici e officine meccaniche <i>Lighting of outdoor areas, operation of offices and engineering workshops</i> | 15.299 | 32.379 (1%) |
| | Trattamento delle acque <i>Water Treatment</i> | 17.080 | |
| Totale <i>Total</i> | | | 2.288.441 |

le emissioni di CO₂ prodotte durante la realizzazione del tunnel con quelle generate dal traffico stradale e ferroviario durante l'arco temporale di un anno. Considerato l'asse del Brennero, nella tratta da Kufstein a Verona, a seconda degli scenari con o senza tunnel e dell'anno di riferimento, le emissioni annue totali da traffico sono comprese tra circa 1,5 Mio t e 2 Mio t [8], un valore paragonabile (ancorché leggermente inferiore) alle emissioni totali prodotte per la realizzazione dell'opera. L'effettivo ri-

sanone), considering an average emission per capita of 6.3 t of CO₂ [49].

Also, it is interesting to compare the CO₂ emissions produced during the construction of the tunnel with those generated from road and rail traffic during the time span of one year. Considering the Brenner line, in the Kufstein to Verona stretch, depending on the scenarios with or without tunnel and on the reference year, the to-

sparmio ottenibile dal passaggio delle merci dalla strada alla rotaia e i tempi di compensazione dell'opera sono comunque un aspetto complesso, per i quali occorre considerare diversi scenari e politiche di accompagnamento alla messa in esercizio della linea AV/AC. In linea con uno scenario virtuoso, fatto di politiche di supporto alla nuova linea ferroviaria, è stato calcolato che la compensazione potrebbe avvenire dopo circa 19 anni dall'inizio dei lavori di costruzione [18]. È opportuno ribadire, comunque, che si tratta solo di uno degli scenari possibili, e che la sua realizzazione si verifica solo a determinate condizioni, rese possibili da una accorta politica dei trasporti.

Volendo infine valutare il contributo a scala locale [50], risulta che l'infrastruttura che ricade nel territorio altoatesino, ovvero la tratta Brennero-Fortezza e parte della linea di Accesso Sud che va da Fortezza fino a Salorno, comporta, per la sola fase di costruzione, emissioni pari a 1.855.000 t di CO₂. Tale quantità è pari a circa una volta e mezza le emissioni prodotte nel 2008 dal traffico stradale in Alto Adige [51].

6. Conclusioni

La metodologia proposta nel presente articolo consente di valutare in maniera quantitativa e sintetica le emissioni di anidride carbonica legate alla realizzazione di un grande tunnel ferroviario, colmando le lacune metodologiche riscontrate in letteratura. L'esplicazione puntuale del modello teorico e l'applicazione al caso studio del Brennero, consentono la trasferibilità dell'analisi ad infrastrutture di trasporto analoghe, anche a scala differente. L'approccio scelto (*Hybrid LCA*), ben si adatta ad opere estremamente complesse, articolate e la cui fase di realizzazione si protrae nel lungo periodo. Esso prevede una accurata fase di raccolta dei dati, sia durante la fase di progettazione, sia durante la fase di realizzazione, da farsi direttamente in loco e in stretta collaborazione con progettisti e ditte costruttrici, attraverso rilevazioni in cantiere, oltre alla ricerca di dati in letteratura il più possibile aderenti al contesto in esame. Questo permette di fornire indicazioni utili per quantificare l'impatto della fase di realizzazione dell'opera e di migliorare in itinere il processo nella direzione della sostenibilità ambientale.

Il metodo presentato è stato volutamente mantenuto semplice e non richiede l'utilizzo di particolari tecnologie, in modo tale da consentirne la replicabilità. Tale scelta, però, sconta al contempo la necessità di assumere nella fase di calcolo alcune ipotesi semplificative necessarie per agevolare il computo e di cui è necessario essere consapevoli in fase di valutazione dei risultati. Inoltre, poiché i tempi di costruzione di tali opere sono solitamente nell'ordine dei decenni e conseguentemente la documentazione progettuale di riferimento per l'analisi si basa sullo stato di previsione, è necessario assumere ipotesi sulle scelte e sulle tecniche costruttive che saranno utilizzate. Tra i principali elementi di incertezza vi sono inoltre da annoverare quelli legati alla scelta dei fattori di emissione

tal annual emissions from traffic are between 1.5 million tons and 2 million tons [8], a value comparable (albeit slightly less) to the total emissions for the construction of the work. The actual savings achieved by the passage of goods from road to rail and compensation times of the work is still a complex issue, on which we must consider different scenarios and support policies for the commissioning of the HS/HC line. In line with a virtuous scenario, made of support policies to the new railway line, it was calculated that compensation could take place after about 19 years from the beginning of construction works [18]. It is worth repeating, however, that this is only one of the possible scenarios, and that its fulfilment only occurs under certain conditions, made possible by a wise transport policy.

Finally assessing the contribution at a local level [50], it appears that the infrastructure which falls within the South Tyrol territory, which is the Brenner-Fortezza stretch and part of the South access line from Fortezza to Salorno, involves, just for the construction phase, emissions equal to 1.855.000 tons of CO₂. This amount is equal to about one and a half times the emissions from road traffic in 2008 in South Tyrol [51].

6. Conclusions

The methodology proposed in this article allows evaluating, in a quantitative and synthetic manner, carbon dioxide emissions related to the construction of a large railway tunnel, filling methodological gaps identified in literature. The careful explanation of the theoretical model and its application to the Brenner case study, allow the transferability of the analysis to similar transport infrastructures, even at a different scale. The chosen approach (HybridLCA), is well suited to extremely complex and articulated works, whose progress continues in the long run. It provides an accurate data collection phase, both during the design process, and during the implementation phase, to be performed directly on site and in close collaboration with designers and construction companies, through surveys on site, in addition to data research in literature as much as possible pertinent to the context in question. This allows providing useful information to quantify the impact of the progress of the work and improve the ongoing process towards environmental sustainability.

The method presented has been deliberately kept simple and does not require the use of specific technologies, so as to allow its replicability. This choice, however, was affected by the need during the calculation to make simplification hypotheses necessary to facilitate calculation and which one must be aware of when evaluating the results. Moreover, because the timing of construction of such works is usually in the order of decades and consequently the reference design documentation for the analysis is based on forecasts, assumptions must be made on choices and construction techniques that will be used.

di CO₂. Mancando in letteratura un'armonizzazione di tali valori e dei metodi utilizzati per il loro calcolo, essi possono differenziarsi significativamente a seconda delle fonti utilizzate e della scala territoriale di riferimento, influenzando notevolmente i risultati finali. Le ipotesi introdotte possono portare in parte a sottostimare, in parte a sovrastimare i fattori di calcolo, restituendo comunque nel complesso una stima attendibile delle emissioni di CO₂.

Nel caso del BBT, i risultati hanno permesso di fornire importati elementi utili per rendere più efficiente il processo di costruzione, individuando su quali voci intervenire per contenere le emissioni. Nello specifico, avendo individuato nella produzione del cemento la fase più impattante, la BBT SE ha potuto ridurre le emissioni di CO₂ nella produzione del calcestruzzo, sostituendo il cemento con scorie di altoforno e ceneri volanti fino ad una percentuale pari al 25%. Trattandosi di materiali di scarto, in particolare di particelle che derivano dalla combustione del carbone, esse non incidono sulle emissioni finali di CO₂. Inoltre sono stati ottimizzati gli interventi di costruzione, semplificando la struttura delle fermate di emergenza lungo la linea, costruendo rivestimenti a spessore unico nei tratti in cui le condizioni geologiche lo permettevano e annullando la costruzione del tunnel di accesso inizialmente previsto a Wolf Nord.

Infine, il metodo qui sviluppato può costituire un utile strumento per i decisori politici. Sulla base dei risultati ottenuti, infatti, si può monitorare il processo di costruzione, e si possono prevedere gli effetti di eventuali vincoli e norme prima di renderli operativi, in modo tale da stabilire in maniera precisa e collaborativa con i tecnici le condizioni migliori per contenere le emissioni nella fase di realizzazione delle opere. In una più ampia prospettiva, l'analisi diventa parte integrante di un processo di revisione metodologica, in grado di portare alla inclusione della CO₂ tra gli elementi da considerare in fase di pianificazione infrastrutturale [52], [53]. Tale processo è complesso e comprende diverse fasi. Alcune di esse hanno valenza operativa: la fase di esercizio [8], la valutazione dell'impatto a scala nazionale [54], regionale [50]. Altre sono collegate all'attribuzione di un valore economico equo [55], [56], [57], [58]. Altre ancora, infine, riguardano il coinvolgimento di diversi attori [59], [60] e possono includere l'utilizzo di metodi di indagine [61], [62], [63] nel processo decisionale per costruire un percorso condiviso. Nel loro insieme, questi differenti approcci permettono di valutare quanto la realizzazione delle grandi infrastrutture di trasporto incida nel bilancio delle emissioni a diverse scale, integrandosi con altre analisi legate alla domanda o all'offerta di trasporto [64], [65], [66]. È così possibile stabilire concrete misure compensative e mitigative a favore del territorio, garantendo al contempo informazione e condivisione dell'operato. In questo modo i decisori politici hanno elementi utili per definire azioni vantaggiose a scala locale, e per contribuire ad una equa distribuzione di oneri e benefici che le grandi opere portano con sé nei territori attraversati.

Among the main elements of uncertainty there are also those related to the choice of CO₂ emission factors. Since harmonisation of these values and the methods used for their calculation are lacking in literature, they can differ significantly depending on the sources used and the reference territorial scale, greatly influencing the final results. The assumptions introduced can lead to partly underestimate, partly overestimate the calculation factors, however resulting in an overall reliable estimate of CO₂ emissions.

In the case of the BBT, the results have made it possible to provide important useful elements to help streamline the construction process by identifying the areas of intervention to contain emissions. Specifically, having identified the most impacting phase in cement production, the BBT SE was able to reduce CO₂ emissions in the production of concrete, replacing cement with blast furnace waste and flying ash up to a percentage equal to 25%. In the case of waste materials, in particular of particles that result from coal combustion, they do not affect the final emissions of CO₂. Construction work was also optimised, simplifying the structure of emergency stops along the line, building thick single coatings in stretches where geological conditions allowed doing so and eliminating the construction of the access tunnel initially planned at Wolf Nord.

Finally, the method developed here can be a useful tool for policy makers. Based on the results obtained, in fact, the building process can be monitored, and the effects of potential constraints and operational rules before making them operational, so as to determine with technicians precisely and in a collaborative manner the best way to curb emissions during the execution of works. In a wider perspective, the analysis becomes an integral part of a methodological revision process, which could lead to the inclusion of CO₂ between the elements to consider when planning infrastructures [52] [53]. This process is complex and includes several stages. Some of them have operational significance: the working phase [8], the assessment of the impact at national and [54], [50] regional level. Others are linked to the attribution of a fair economic value [55] [56] [57] [58]. Others, finally, concern the involvement of different actors [59], [60] and may include the use of methodologies [61] [62] [63] in the decision making process to build a shared path. On the whole, these different approaches allow assessing how the realisation of major transport infrastructures affect the balance of emissions at different scales, integrating with other analyses related to the demand or transport offer [64] [65] [66]. It is thus possible to establish important compensatory and mitigative measures in favour of the territory, ensuring information and sharing of the work at the same time. In this way, policy makers have useful elements to define favourable actions at local level, and to contribute to a fair distribution of burdens and benefits that great works carry with them in territories crossed.

Riconoscimento

Questa ricerca è stata sviluppata presso l'Accademia Europea di Bolzano e parzialmente finanziata nel quadro del contratto No. D0363 stipulato tra l'Accademia stessa e la società BBT SE.

Un cospicuo quantitativo di dati è stato fornito da BBT SE, il cui supporto alla ricerca è qui riconosciuto.

Acknowledgment

This research was developed at the European Academy in Bolzano and partly funded under grant No. D0363 by both the European Academy of Bolzano and BBT public limited company. A noticeable amount of data and values used in the article was provided by BBT-SE, whose support is here gratefully acknowledged.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] EEA, European Environment Agency, (2009), *"Transport at a crossroads"*, TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union. EEA Report No. 1/2008, European Environment Agency, Copenhagen.
- [2] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, (2007), *"Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change"*, Climate Change 2007: Synthesis Report, Geneva.
- [3] EC, European Commission, (2011), *"White Paper. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system"*, Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF> [Accessed: 07th February 2012].
- [4] VAN ESSEN H., BELLO O., DING, J., (2003), *"To shift or not to shift, that's the question. The environmental performance of freight and passenger transport modes in the light of policy making"*, Delft.
- [5] EC, European Commission, (2003), *"Europe at a crossroads. The need for sustainable transport"*, Luxemburg.
- [6] CAVALLARO F., MAINO F., MORELLI V., (2013), *"A new method for forecasting CO₂ operation emission along an infrastructure corridor"*, European Transport / Trasporti Europei, 55(4).
- [7] NOCERA S., CAVALLARO F., (2011), *"Policy Effectiveness for containing CO₂ Emissions in Transportation"*, Procedia-Social Behavioral Science, 20, 703-713.
- [8] NOCERA S., MAINO F., CAVALLARO F., (2012), *"A heuristic method for determining CO₂ efficiency in transportation planning"*, European Transport Research Review, 4(2), 91-106.
- [9] CASS D., MUKHERJEE A., (2011), *"Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations"*, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 137, No. 11, November 1, 2011.
- [10] KEOLEIAN G.A., KENDALL A., DETTLING J.E., SMITH V.M., CHANDLER R.F., LEPECH M.D., VICTOR C.L., (2005), *"Life cycle modeling of concrete bridge design: Comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints"*, J. Infrastruct. Syst., 11(1), 51-60.
- [11] Italferr, (2010), *"Rapporto di sintesi sulla emissione (rimozione) della CO₂"*, Progetto Definitivo *"Potenziamento linea Rho-Arona: tratta Rho – Gallarate"*, Online at: http://www.italferr.it/cms-file/allegati/italferr/Rapporto_di_sintesi_Gallarate_Rho_rev2.pdf [01-05-2015].
- [12] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, (2006), *"2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme"*, in EGGLESTON H.S., BUENDIA L., MIWA K. et al. (a cura di), Japan: IGES.
- [13] Oeko-Institute e. V., (2011), *"GEMIS - Global Emission Model for Integrated Systems"*, [Online], Available at: <http://www.oeko.de/service/gemis/en/> [Accessed: 01st March 2011].
- [14] Swiss Center for Life Cycle Inventories, (2011), *"Ecoinvent database"*, [Online], Available at: <http://ecoinvent.ch/> [Accessed: 01st March 2011].
- [15] FFE, *"Forschungsstelle für Energiewirtschaft"*, (2009). Available at: <http://www.ffe.de/taetigkeitsfelder/ganzheitliche-energie-emissions-undkostenanalysen/200-gabie-ganzheitliche-bilanzierung-von-prozessen-undprodukten> [Accessed: 07th July 2009].
- [16] BBT SE, (2008) *"Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Diritto delle ferrovie. Elaborazione tecnica del progetto, Programma di esercizio - Relazione tecnica"*, (29.02.2008).

- [17] BBT SE, (2009), *"Il sistema della Galleria di Base del Brennero"*, [Online], Available at: http://www.bbt-se.com/index.php?option=com_content&task=view&id=111&Itemid=223&lang=it [Accessed: 1st April 2009].
- [18] MAINO F., CAVALLARO F., (2014), *"Il contributo delle grandi infrastrutture ferroviarie alla riduzione delle emissioni di CO₂: il caso della Galleria di Base del Brennero"*, EURAC, Bolzano/Bozen. ISBN: 978-88-98857-04-3.
- [19] GUGGENBERGER T., (2009), *"Einfluss der Zementart auf das Tragverhalten von Befestigungselementen in Beton"*, Diplomarbeit. Available at: https://zidapps.boku.ac.at/abstracts/oe_list.php?paID=3&paSID=7540&paSF=-1&paCF=0&paLIST=0&language_id=DE [Accessed: 07th July 2009].
- [20] ASTAT, Istituto Provinciale di statistica, (2010), *"Produzione e consumo di energia elettrica"*, Notiziario ASTAT n. 45, 08/2010, Bolzano.
- [21] BBT SE, (2009), *"Fattori di emissione specifici dei cementi utilizzati nella costruzione del BBT"*, Comunicazione personale (01.12.2009).
- [22] Terna, (2009), *"Dati statistici sull'energia elettrica in Italia. Confronti internazionali"*, [Online], Available at: <http://www.terna.it/LinkClick.aspx?filetick=et0PgmBzvheblE%3d&tabid0418&mid02501> [Accessed: 01st March 2011].
- [23] BBT SE, (2008), *"Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto definitivo"*, Elaborazione tecnica del progetto Fase di costruzione Gestione dei materiali, da 1+008,136 a 32+087,528 (29.02.2008).
- [24] BBT SE, (2008), *"Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto definitivo, Elaborazione tecnica del progetto"*, Fase di costruzione Gestione dei materiali, da 32+087,528 a 57+137,800 (29.02.2008).
- [25] BBT SE, (2008), *"Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Programma lavori con fine lavori 2020 e spostamento PMF Steinach"*, (29.02.2008).
- [26] BBT SE, (2009), *"Il cantiere di Mules"*, [Online], Available at: http://www.bbt-se.com/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=23&Itemid=154 [Accessed: 1st April 2009].
- [27] Sandvik Mining and Construction, (2007), *"Sandvik DT1130-C Data"*. Technical Specification 6-9290-M. Tampere.
- [28] Seli Group, (2009), *"Technical data of TBM Model TB 630 E/TS"*.
- [29] NFM Technologies, (2004), *"Tunneling Machines, Trasvase Guadiaro - Majaceite 4.88m Diameter Double Telescopic Shield Hard Rock TBM"*.
- [30] AlpTransit San Gottardo SpA, (2005), *"La nuova linea ferroviaria del San Gottardo"*, Lucerna.
- [31] EHRBAR H., (2008), *"Gotthard base Tunnel, Switzerland - Experience with different tunneling methods"*, Seminario International South American Tunnelling, Lucerna.
- [32] HSL-Zuid, (2011), *"Tunnel Boring Machine Aurora"*, [Online], Available at: http://www.hslzuid.nl/hsl/uk/bouw/ment/Bored_Tunnel_Groene_Hart/aurora/index.jsp [Accessed: 07th July 2011].
- [33] BBT SE, (2009), *"Eckdaten"*, [Online], Available at: http://www.bbt-se.com/index.php?option=com_content&task=view&id=67&Itemid=143 [Accessed: 1st April 2009].
- [34] Infrac, (2010), *"The Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA)"*, [Online], Available at: <http://www.hbefa.net>. [Accessed: 07th July 2009].
- [35] Gowem, (2011), GCR 106, Available at: http://www.gowem.it/macchine/macchine.aspx?id_macchine=389 [Accessed: 01st April 2011].
- [36] BBT SE, (2009), *"Sul binario per il futuro. La Nuova Ferrovia del Brennero con la Galleria di Base"*.
- [37] LIEBHERR, (2008), *"Liebherr Mischtechnik GmbH. Berechnung Ausschlußwert Betonmix 2,25-A-R/DW"*,
- [38] Sika, (2004), *"Concrete Spraying System Sika – PM500, Technical data sheet"*.
- [39] Atlas Copco, (2011), *"Construction & Mining Technique"*, Available at: http://pol.atlascopco.com/SGSite/default_prod.asp?redirpage=products/product_group.asp&redirid=Rock+bolts [Accessed: 18th April 2011].
- [40] BBT SE (2009), *"Quantità di acciaio utilizzata per l'armatura del calcestruzzo"*, Comunicazione personale (01.12.2009).

- [41] BBT SE, (2008). *Potenziamento asse ferroviario Monaco – Verona, Galleria di Base del Brennero, Progettazione delle opere, Sistema della galleria principale, Provvedimenti di sostegno, Classe di avanzamento GL-T5* (29.02.2008).
- [42] BBT SE, (2009), “*Ventilazione – raffreddamento – illuminazione*”, Rapporto interno.
- [43] BBT SE, (2008), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto definitivo*”, Relazione tecnica (29.03.2008).
- [44] BBT SE, (2008), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto definitivo Variante 1 – Spost. PMF al km 44+962 rich. Prov. Bolzano*”, – nota del 23.06.2008 (02.07.2008).
- [45] BBT SE, (2008), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto definitivo, Planimetria*”, (29.02.2008).
- [46] BBT SE, (2006), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progetto esecutivo, Cunicolo esplorativo Aica-Mules, Relazione ambientale-prescrizione VIA - verifica di ottemperanza - stralcio inerente gli impianti di trattamento delle acque*”.
- [47] BBT SE, (2008), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Progettazione tecnica, Tunnel di Base, Progetto definitivo, Rapporto di Idrogeologia*”, (30.04.2008).
- [48] BBT SE, (2008), “*Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona, Galleria di Base del Brennero, Geologia, geotecnica, idrogeologia, Galleria principale, Relazione tecnica G 1.2a-04, Idrogeologia*”, (29.02.2008).
- [49] CATONI P.G., IORIO G., (2011), “*Statistiche energetiche regionali 1988-2008 Trentino-Alto Adige*”, ENEA, Roma.
- [50] MAINO F., CAVALLARO F., (2013), “*Impatto a scala regionale di una grande infrastruttura ferroviaria. Le emissioni di CO₂ della linea AC del Brennero*”, in FERLAINO F., ROTA F.S. (eds), “*La montagna italiana. Confini, identità e politiche*”, Franco Angeli, Milano, pp. 161-185 ISBN 978-88-204-4080-0.
- [51] RUFFINI F.V., (2011), “*Energia-Alto Adige-2050. Energia-Alto Adige-2050 - Strategia per il CLIMA*”, [Online], Available at: http://www.provincia.bz.it/acque-energia/download/Energia-Alto_Adige-2050.pdf [Accessed: 01st March 2012].
- [52] NOCERA S., CAVALLARO F., (2014), “*The ancillary role of CO₂ Reduction in Urban Transport Plans*”, Transportation Research Procedia 3 (2014) 760 – 769, doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.055.
- [53] CAPPELLI A., LIBARDO A., NOCERA S. (2013), “*Teorie, Strategie ed Iniziative per lo sviluppo efficiente dei servizi di trasporto pubblico regionale / Theories, Strategies and Actions for the Efficient Development of Regional Transit*”, Ingegneria Ferroviaria 68-11: 943-962.
- [54] NOCERA S., CAVALLARO F., (2012), “*Economic Evaluation of Future Carbon Dioxide Impacts from Italian Highways*”, Procedia Social and Behavioral Sciences, vol. 54, pp. 1360-1369. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.850.
- [55] NOCERA S., CAVALLARO F., (2014), “*A methodological framework for the economic evaluation of CO₂ emissions from transport*”, J. Adv. Transp. 48(2): 138 - 164 doi: 10.002/atr.1249.
- [56] Nocera S., Tonin S., (2014), “*A Joint Probability Density Function for reducing the Uncertainty of Marginal Social Cost of Carbon Evaluation in Transport Planning*”, in DE SOUSA J.F., & ROSSI, R. (eds.), “*Computer-based Modelling and Optimization in Transportation*”, Advances in Intelligent Systems and Computing, 262: 113.126. doi: 10.1007/978-3-319-04630-3_9.
- [57] NOCERA S., TONIN S., CAVALLARO F., (2015), “*The Economic Impact of Greenhouse Gas Abatement through a Meta-Analysis: Valuation, Consequences and Implications in terms of Transport Policy*”, Transport Policy, Volume 37, January 2015, Pages 31-43. doi: 10.1016/j.tranpol. 2014.10.004.
- [58] NOCERA S., TONIN S., CAVALLARO F., (2015), “*Carbon Estimation and Urban Mobility Plans: Opportunities in a Context of Austerity*”, Research in Transportation Economics, Volume 51, September 2015, pages 71-82. Doi: 10.1016/j.retrec.2015.07.009.
- [59] CAVALLARO F., MAINO F. (2014), “*An approach to manage conflicts in the construction of new transport infrastructures: the case of the Brenner HS/HC railway line*”, in: PASSERINI G., BREBBIA C.A. (Eds.), “*Environmental Impact II*”, WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol. 181, pp. 503-515. Doi: 10.2495/EID140431.
- [60] NOCERA S., MURINO M., CAVALLARO F., (2014), “*On the Perspective of using Multiple Agent Multi Criteria Decision Making for determining a fair Value of Carbon Emissions in Transport Planning*”, Procedia Social and Behavioral Sciences, Volume 160, 19 December 2014, pp. 274-283, doi 10.1016/j.sbspro.2014.12.139.

- [61] BELL M.G.H., KAPARIAS I., NOCERA S., ZAVITSAS K. (2012), *"Risultati di una recente indagine sulla presenza in Europa di architetture di sistemi telematici per i trasporti / Presence of Urban ITS Architectures in Europe: Results of a Recent Survey"*, Ingegneria Ferroviaria 67-5: 447-467.
- [62] GAL-TZUR A., GRANT-MULLER S.M., KUFLIK T., MINKOV E., NOCERA S., SHOOR I. (2014), *"The Potential of Social Media in Delivering Transport Policy Goals"*, Transport Policy 32: 115-123. doi: 10.1016/j.tranpol.2014.01.007
- [63] GRANT-MULLER S.M., GAL-TZUR A., MINKOV E., NOCERA S., KUFLIK T., SHOOR I. (2015), *"Enhancing Transport Data Collection through Social Media Sources: Methods, Challenges and Opportunities for Textual Data"*, IET Intelligent Transport Systems. Volume 9, Issue 4, 1 May 2015, Pages 407-417. doi: 10.1049/iet-its.2013.0214.
- [64] LIBARDO A., NOCERA S. (2008), *"Transportation Elasticity for the Analysis of Italian Transportation Demand on a Regional Scale"*, Traffic Engineering and Control 49-5: 187-192.
- [65] CAPPELLI A., NOCERA S. (2006), *"Freight modal split models: data base, calibration problem and urban application"* WIT Transactions on the Built Environment 89, pp. 369-375. doi: 10.2495/UT060371.
- [66] NOCERA S., TSAKARESTOS A. (2004), *"Demand responsive transport systems for rural areas in Germany - an overview of the projects MOBINET and MOB2"*, Traffic Engineering & Control, 45-10: 378-383.

150 ANNI DI FERROVIA A VOLTERRA

Presso il CIFI è disponibile, **su prenotazione**, il DVD contenente un documentario storico della linea FS Cecina-Volterra Saline Pomarance, che si appresta a compiere 150 anni (ved. articolo su "La Tecnica Professionale" n. 9/settembre 2010).

Il filmato, della durata di circa 30 minuti, è stato realizzato nel 1989 da Claudio Migliorini e contiene scene già consegnate alla storia, come le ultime corse delle automotrici diesel ALn 990 e i servizi merci con locomotiva 245, cessati ormai da molti anni. Non manca un breve capitolo sul prolungamento della linea fino a Volterra, realizzato con dentiera sistema *Strub* a causa della forte pendenza (100 per mille, record per le FS), prolungamento che è stato in esercizio dal 1912 fino al 1958.

Nonostante siano passati più di vent'anni dalle riprese, il documentario si rivela ancor oggi di attualità, poiché lo schema orario ivi descritto (4 coppie di treni) è rimasto in essere fino ai giorni nostri, anche se le ALn 990 hanno lasciato il posto alle più moderne automotrici diesel ALn 668 (alcune serie sono già presenti nel filmato) e ALn 663.



Il CIFI per coprire le spese di produzione e confezionamento, è in grado di fornire i DVD al costo unitario di soli € 13,50. Per sconti, spese di spedizione e modalità di acquisto consultare la pagina "Elenco di tutte le pubblicazioni CIFI" sempre presente nella Rivista.