



## Gli effetti della galleria di base del Brennero sul traffico delle merci attraverso l'arco alpino orientale

### *The effect of the Brenner base tunnel on the freight traffic across the Eastern Alps*

Prof. Ing. Paolo FERRARI<sup>(\*)</sup>

**Sommario** - L'interscambio delle merci fra il territorio a Sud dell'arco orientale delle Alpi e il territorio dell'Europa centro-settentrionale utilizza in modo nettamente prevalente due sistemi di trasporto: il sistema del Brennero ed il sistema dei Tauri. Il primo attraversa le Alpi al valico del Brennero, al confine fra Italia e Austria, mentre l'altro utilizza le gallerie dei Tauri in territorio austriaco. Entrambi i sistemi comprendono una autostrada e una linea ferroviaria. Questo articolo studia, attraverso la stima delle funzioni di costo di questi quattro modi di trasporto - le due autostrade e le due ferrovie - prima e dopo l'entrata in esercizio della galleria di base del Brennero, l'effetto che quest'ultima avrà sulla ripartizione modale della domanda di trasporto.

#### 1. Introduzione

L'interscambio delle merci fra il territorio a Sud dell'arco alpino orientale e il territorio dell'Europa centro-settentrionale utilizza in modo nettamente prevalente due sistemi di trasporto: il sistema del Brennero e il sistema dei Tauri. Il primo attraversa le Alpi al valico del Brennero, al confine fra Italia e Austria, mentre l'altro utilizza le gallerie dei Tauri in territorio austriaco. L'uso nettamente prevalente di questi due sistemi di trasporto risulta evidente dalle statistiche ALPINFO [1], che rappresentano la fonte di tutti i dati utilizzati in questo articolo. Entrambi i sistemi comprendono un percorso autostradale e una linea ferroviaria che corrono all'incirca l'una a fianco dell'altro, dando luogo a due itinerari alternativi che si uniscono a Rosenheim, in Germania, poco a sud di Monaco di Baviera (fig. 1).

Il percorso autostradale del Brennero, che valica il passo del Brennero alla quota di 1375 m, è formato dall'autostrada italiana A22 che ha origine a Verona, e in successione dalle autostrade austriache A13 e A12, e dall'autostrada tedesca A8 fino a Monaco di Baviera. Il percorso

**Abstract** - Freight exchange between the territory south of the Eastern Alps and the Central-Northern Europe uses primarily two transport systems: the Brenner system and the Tauern system. The first crosses the Alps at the Brenner pass, at the border between Italy and Austria, while the other uses the Tauern tunnels in the Austrian territory. Both systems comprise a motorway and a railway. This paper studies the effects of the railway base Brenner tunnel on the split of transport demand among these four transport modes - the two motorways and the two railways - through the estimate of their cost functions before and after the entry into operations of the tunnel.

#### 1. Introduction

Freight exchange between the territory south of the Eastern Alps and the Central-Northern Europe uses primarily two transport systems: the Brenner system and the Tauern system. The first crosses the Alps at the Brenner pass, at the border between Italy and Austria, while the other uses the Tauern tunnels in the Austrian territory. The predominant use of these two transport systems is clearly shown by the ALPINFO statistics [1], which are the font of all the data used in this paper. Both systems comprise a motorway and a railway, which run quite parallel to each other, giving rise to two alternative routes that join at Rosenheim in Germany, a little south of Munich in Bavaria (fig. 1).

The Brenner motorway route, which crosses the Brenner pass at an altitude of 1375 m, is constituted by the Italian A22 motorway, which originates at Verona, and then by the A13 and A12 Austrian motorways, as far as Munich in Bavaria. The Tauern motorway route is constituted by the Austrian A10 motorway - which originates at Villach in Austria, where the Italian A23 motorway and the A8 Slovenian motorway join - and then by the German A8 motorway as far as Munich in Bavaria. All these motorway

<sup>(\*)</sup> Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

<sup>(\*)</sup> University of Pisa - Department of Civil and Industrial Engineering.

autostradale dei Tauri è formato dall'autostrada austriaca A10 - che ha origine a Villach, in territorio austriaco, punto di convergenza dell'autostrada italiana A23 e dell'autostrada slovena A8 - e in successione dall'autostrada tedesca A8 fino a Monaco di Baviera. Tutti questi tronchi autostradali sono a doppia carreggiata, con due corsie per carreggiata.

Le caratteristiche geometriche del percorso autostradale del Brennero sono state fin dall'inizio quelle attuali. Invece quelle del percorso autostradale dei Tauri sono state notevolmente migliorate nel tempo. In effetti l'autostrada austriaca A10 ha due lunghe gallerie: la galleria dei Tauri, lunga 6401 m, con una quota massima di 1340 m nel punto più elevato del percorso, e la galleria di Katschberg, lunga 5898 m. Queste due gallerie furono costruite inizialmente con una sola canna bidirezionale a due corsie, e solo successivamente è stata costruita una seconda canna, così da dar luogo a due carreggiate separate lungo tutto l'itinerario. La seconda canna del tunnel di Katschberg è entrata in esercizio nel 2009, quella del tunnel dei Tauri nel 2011.

La fig. 2 riporta il numero annuo di tonnellate di merci transitate attraverso il valico autostradale del Brennero e quello del tunnel autostradale dei Tauri nel periodo tra il 1994 e il 2014. Questa figura mostra chiaramente che il volume di traffico merci lungo il percorso autostradale del Brennero è notevolmente superiore a quello lungo il percorso dei Tauri. Allo scopo di ridurre i fenomeni di instabilità del traffico dovuti alla congestione causata dal traffico elevato, e anche per motivi di sicurezza, la Società Concessionaria dell'autostrada italiana A22 ha imposto fin dal 2007 il divieto di sorpasso per i veicoli pesanti, i quali sono pertanto costretti a procedere accodati sulla corsia di destra della carreggiata [2]. Da una parte l'aumento del costo del trasporto percepito dai trasportatori a seguito di questo provvedimento, dall'altra il miglioramento delle caratteristiche geometriche dell'autostrada austriaca A10 sono state causa, almeno in parte, del trasferimento di traffico dal percorso autostradale del Brennero a quello dei Tauri, come si vede nella fig. 3, la quale mostra l'andamento nel tempo, fra il 1994 e il 2014, delle proporzioni del traffico totale attraverso l'arco orientale delle Alpi che utilizzano il percorso autostradale del Brennero e quello dei Tauri rispettivamente.

La linea ferroviaria del Brennero entrò in esercizio nel

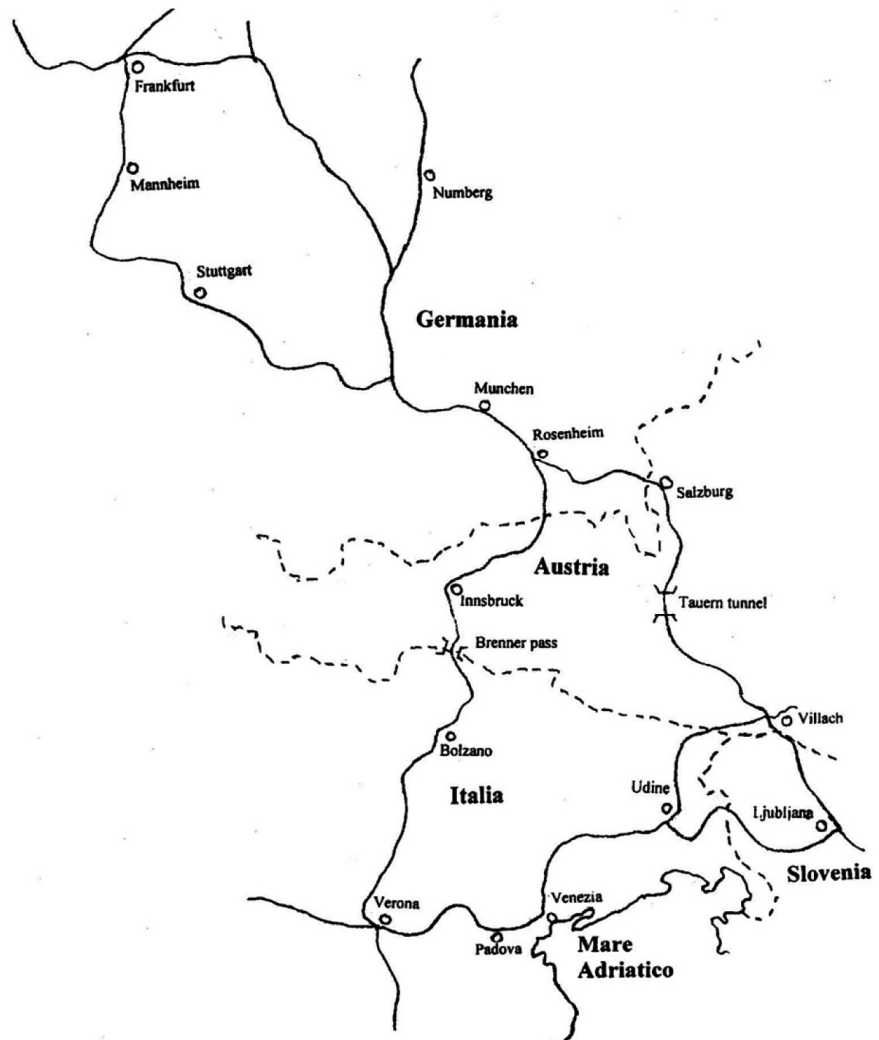


Fig. 1 - Schema dei percorsi attraverso l'arco orientale delle Alpi.  
Fig. 1 - Pattern of the routes across the Eastern Alps.

stretches have two carriageways with two lanes per carriageway.

The geometric characteristics of the Brenner motorway have been the existing ones from the very beginning. Instead those of the Tauern motorway route have been substantially improved over time. Actually the Austrian A10 motorway has two long tunnels: the Tauern tunnel, whose length is 6401 m and whose maximum altitude is 1340 m, in the highest point of the route, and the Katschberg tunnel, whose length is 5878 m. These two tunnels were built at first with only a two lanes bidirectional tube, and only later a second tube has been built, so to have two separate carriageways on all the motorway. The second tube of the Katschberg tunnel went into operations in 2009, that of the Tauern tunnel in 2011.

Fig. 2 shows the yearly number of freight tons passed across the Brenner motorway pass and through the Tauern motorway tunnel in the time period between 1994 and 2014.

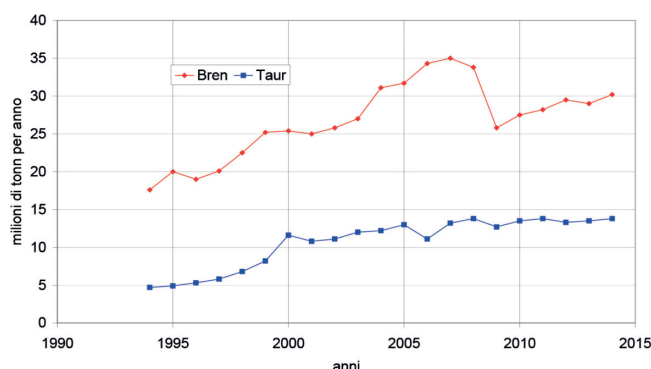


Fig. 2 - Andamento nel tempo del traffico merci al valico autostradale del Brennero e a quello dei Tauri.

Fig. 2 - Pattern over time of freight traffic at the motorway pass of Brenner and at that of Tauern.

1867, con un tracciato che si svolgeva in gran parte all'aperto. Il tracciato era tortuoso e con elevate pendenze. Per superare il notevole dislivello fra i 1371 m del valico del Brennero - attraversato all'aperto - e le quote dei territori pianeggianti ai due lati della catena alpina, in Italia e in Austria, fu necessario realizzare due tornanti utilizzando due valli laterali: la Val di Fleres in territorio italiano e la Valle di Sankt Jodok in territorio austriaco. Il tracciato originario della ferrovia è stato notevolmente migliorato nel tempo. In particolare in territorio italiano, allo scopo di evitare i gravi inconvenienti dovuti alla frequente caduta di massi dalle pareti sovrastanti la ferrovia lungo le strette valli da essa percorse, lunghi tratti all'aperto sono stati sostituiti da gallerie: la galleria Sciliar, lunga 13307 m, entrata in esercizio nel 1994, seguita qualche anno dopo dalla galleria Cardano, lunga 3939 m, entrambe nella valle dell'Isarco, mentre la galleria Fleres, lunga 7267 m, entrata in esercizio nel 1999, fu realizzata per sostituire il ramo nord del tornante in Val di Fleres.

Nonostante questi miglioramenti la ferrovia del Brennero presenta notevoli limitazioni, dovuti alla tortuosità del tracciato - il raggio di curvatura minimo è 285 m - ed alle elevate pendenze, che raggiungono il valore massimo del 26 per mille. Queste due caratteristiche limitano notevolmente la velocità di percorrenza della ferrovia. Inoltre a causa delle elevate pendenze i treni merci hanno una lunghezza massima di 450 m con un carico massimo rimorchiabile di 1200 t, ed hanno bisogno della doppia trazione in salita verso il valico. La doppia trazione rappresenta un importante fattore penalizzante, non solo per l'elevato numero di locomotori necessari per l'esercizio della linea, ma anche per il riscaldamento delle apparecchiature di sottostazione e delle linee di contatto, che impone un distanziamento fra i treni superiore a quello previsto dal sistema di blocco. Questo fatto, insieme con la necessità di lasciare libere tracce orarie per il ritorno dei locomotori di trazione multipla, determina una riduzione della potenzialità della linea.

This figure shows clearly that the freight traffic volume along the Brenner motorway is notably greater than along the Tauern motorway route. In order to reduce the traffic instability phenomena due to the congestion caused by the high traffic, the Company responsible for the A22 Italian motorway imposed since 2007 an overtaking ban for the heavy vehicles, which thus should travel one after the other on the right lane of the carriageway [2]. The increase in transport cost perceived by the carriers as a consequence of this measure on one hand, the improvements in the geometric characteristics of the Austrian A10 motorway on the other hand, have been the cause, at least in part, of the traffic shift from the Brenner motorway route to that of the Tauern, as we can see in fig. 3, which shows the pattern over time, between 1994 and 2014, of the proportions of the total traffic across the Eastern Alps that use the Brenner motorway route and that of the Tauern respectively.

The Brenner railway entered into operations in 1867. It was open air with a tortuous track and high gradients. In order to overcome the great difference in height between the 1371 m of the Brenner pass and the altitude of the territories on the two sides of the Alps, two hairpin bends were built in two side valleys: the Fleres Valley in the Italian territory and the Sankt Jodok in the Austrian territory. The railway track has been substantially improved over time. In order to avoid the great problems caused by the rocks falling from the walls above the railway along the narrow valleys it travelled, long stretches in the open air have been replaced with tunnels: the Sciliar tunnel, 13307 m long, which entered into operations in 1994 and was followed a few years later by the Cardano tunnel, 3939 m long. Both these tunnels are in Isarco Valley, whereas the Fleres tunnel, which is 7267 m long and entered into operations in 1999, was built to replace the Norther branch of the hairpin bend in the Fleres Valley.

In spite of these improvements the Brenner railway still presents notable shortcomings, due to the tortuous track - the minimum radius of the curves is 285 m - and to great gradi-

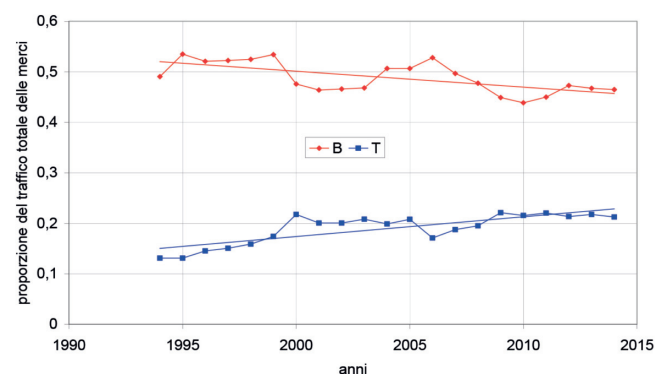


Fig. 3 - Proporzioni del traffico totale delle merci attraverso le Alpi orientali che usano il percorso autostradale del Brennero B e quello dei Tauri T.

Fig. 3 - Proportion of the total freight traffic across the Eastern Alps that use the Brenner motorway route and that of Tauern.

La linea ferroviaria dei Tauri fu aperta all'esercizio nel 1909 con un tracciato tortuoso e con pendenze elevate, fino al 29 per mille. La ferrovia supera la catena alpina attraverso il tunnel dei Tauri lungo 8371 m e con una quota massima di 1226 m, che rappresenta anche la quota massima del tracciato. La linea fu costruita inizialmente a semplice binario, ma il tratto lungo il tunnel dei Tauri fu realizzato fin dall'inizio a doppio binario. A partire dal 1969 è iniziato il raddoppio della linea, ormai quasi del tutto completato. Inoltre, allo scopo di ridurre sensibilmente la tortuosità del tracciato, sono state eseguite notevoli varianti, una delle quali ha richiesto la costruzione del tunnel di Kaponig, lungo 5096 m.

La fig. 4 riporta il numero annuo di tonnellate di merci transitate attraverso il valico ferroviario del Brennero e quello del tunnel ferroviario dei Tauri nel periodo tra il 1994 e il 2014. La fig. 4 mostra che, così come sui percorsi autostradali, il volume di traffico merci sulla ferrovia del Brennero è notevolmente superiore a quello sulla ferrovia dei Tauri.

La fig. 5 pone a confronto il traffico merci complessivo sulle autostrade del Brennero e dei Tauri con il corrispondente traffico sulle linee ferroviarie. Si osserva che il traffico ferroviario è notevolmente inferiore a quello stradale, il quale tra l'altro è andato aumentando nel tempo in misura molto più marcata.

## 2. La galleria di base del Brennero

Allo scopo di ridurre significativamente le attuali limitazioni della ferrovia del Brennero, è stata da qualche tempo proposta, ed è attualmente in parte in fase di realizzazione, una nuova linea ferroviaria da Verona a Monaco di Baviera, che si affianca a quella esistente che valica il passo del Brennero, con caratteristiche fortemente innovative rispetto a quest'ultima. L'elemento più significativo di questa nuova linea ferroviaria è una galleria di base ubicata ad Est dell'incisione del Brennero, lunga 55

ents, which reach the maximum value of 26 per thousand. These two characteristics reduce greatly the travelling speed of the railway. Besides, because of the great gradients, the freight trains have a maximum length of 450 m and a maximum gross weight of 1200 tons, and they need the multiple traction in the hill towards the pass. The multiple traction represents a great penalizing factor, not only because the railway needs a great number of engines, but also for the heating of the electrical substation equipments and of the overhead lines: this entails a space gap between the trains greater than that provided by the block system. This fact, along with the need to have free paths for the return of the additional engines, causes a reduction in the line potentiality.

The Tauern railway entered into operations in 1909, with a tortuous track and high gradients, up to 26 per thousand. The railway crosses the Alpine chain through the Tauern tunnel, which is 8371 m long and has a maximum altitude at 1226 m, which represents the maximum height of the track as well. Initially the line was single track, but the stretch along the Tauern tunnel was built double track from the very beginning. The doubling of the line began in 1969, and now is quite finished. Besides, in order to reduce the tortuousness of the track, many variants of the latter were realized, one of which needed the construction of the Kaponig tunnel, whose length is 5096 m.

Fig. 4 shows the yearly number of freight tons passed across the Brenner railway pass and through the Tauern tunnel in the time period between 1994 and 2014. The figure shows that, as well as for the motorway routes, the traffic volume of freight on the Brenner railway is substantially greater than that on the Tauern railway.

Fig. 5 compares the total freight traffic on the Brenner and the Tauern motorways with the corresponding traffic on the railways. We note that the railway traffic is notably less than that on motorways, which has also been increasing over time in a much more pronounced way.

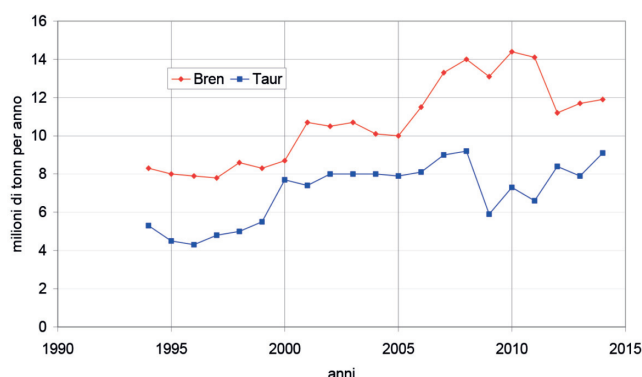


Fig. 4 - Andamento nel tempo del traffico merci al valico ferroviario del Brennero e attraverso il tunnel ferroviario dei Tauri.

Fig. 4 - Pattern over time of freight traffic at the railway Brenner pass and through the Tauern railway tunnel.

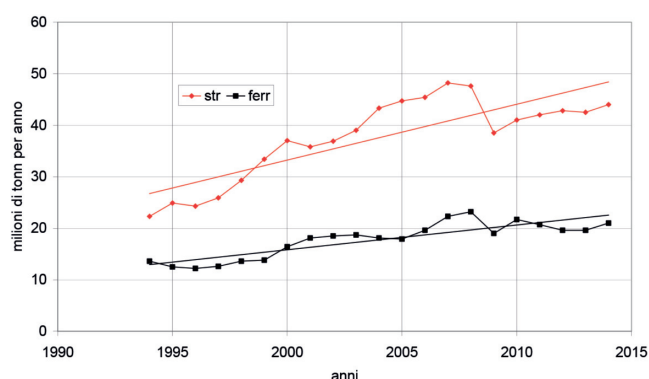


Fig. 5 - Andamento nel tempo del traffico merci attraverso i valichi autostradali e ferroviari delle Alpi orientali.

Fig. 5 - Pattern over time of freight traffic across the motorway and the railway passes of the Eastern Alps.



km. L'imbocco Sud a Fortezza ha una quota di 750 m, quella dell'imbocco Nord a Innsbruck è di 570 m, mentre la quota massima in galleria è di 790 m. La pendenza massima del tracciato è del 4 per mille sul lato Sud, del 6.7 per mille sul lato Nord. La scelta del tracciato della galleria è stato il risultato di uno studio approfondito, in cui sono state esaminate tre possibili soluzioni di tracciato: lungo l'incisione del Brennero, ad Est e ad Ovest di quest'ultima [4]. I tracciati lungo l'incisione del Brennero offrono la possibilità di un collegamento più breve fra Innsbruck e Fortezza, ma presentano molti problemi dal punto di vista geologico, per cui si è ritenuto opportuno studiare tracciati ad Est e ad Ovest dell'incisione del Brennero. I tracciati ad Est sono risultati più favorevoli tenendo presente che fra Innsbruck e Fortezza sono necessari attacchi intermedi, ed inoltre deve essere possibile il collegamento con la circonvallazione ferroviaria di Innsbruck. Tra i vari tracciati ad Est dell'incisione del Brennero è stato infine scelto quello che attualmente è in fase di realizzazione.

La galleria di base del Brennero è in realtà un sistema complesso, composto da un cunicolo esplorativo, due gallerie principali e quattro gallerie di accesso laterali ubicate ad Ampass, Ahrental e Wolf in territorio austriaco ed a Mules in Italia [3]. Queste gallerie di accesso, che collegano la superficie esterna con le gallerie principali, svolgono una funzione logistica in fase di costruzione ed avranno funzioni di emergenza in fase di esercizio della galleria. Le due gallerie principali, che saranno percorse dai treni, sono a semplice binario, hanno un diametro interno di 8.1 m e sono disposte ad interasse variabile da 40 a 70 m secondo le caratteristiche geologiche delle zone attraversate. Ogni 333 m le due gallerie saranno collegate da cunicoli trasversali aventi funzione logistica in fase di costruzione e di emergenza in fase di esercizio. Il cunicolo esplorativo si estende da una estremità all'altra del sistema galleria ed è ubicato in posizione centrale, ad una profondità di 12 m sotto le gallerie principali. Oltre ai collegamenti trasversali che possono essere utilizzati come vie di fuga in caso di emergenza, sono previste anche tre fermate di sicurezza, ubicate rispettivamente a Innsbruck, sotto St. Jodok ed a Campo di Trens, poste a distanza di circa 20 km l'una dall'altra. Ogni fermata di emergenza è lunga 470 m ed è fornita ogni 90 m di vie di fuga verso il cunicolo centrale, che sarà percorso dal treno di soccorso [3].

La realizzazione della nuova galleria di base, caratterizzata da una velocità di progetto di 250 km/h per i treni passeggeri e di 120-160 km/h per i treni merci [3], aumenterà notevolmente le prestazioni della ferrovia del Brennero, essenzialmente come conseguenza della notevole riduzione delle pendenze. Sarà quindi possibile utilizzare treni merci molto più lunghi e di maggiore portata utile, da cui deriverà un aumento della capacità della ferrovia, cioè del numero di tonnellate di merci trasportate nell'unità di tempo. Si deve però considerare che questo aumento di capacità trova un limite, da un lato nel nume-

## 2. The Brenner base tunnel

*In order to reduce substantially the existing shortcomings of the Brenner railway, a new railway from Verona to Munich was proposed a long time ago, and it is now under construction. It runs close to the existing railway that crosses the Brenner pass, with highly innovative characteristics compared to the latter. The most significant element of this new railway is a base tunnel located east of the Brenner incision, with a length of 55 km. The altitude of the south entrance at Fortezza is 570 m, that of the north entrance at Innsbruck is 790 m. The maximum gradient of the track is 4 per thousand on the south side, 6.7 per thousand on the north side. The choice of the tunnel track has been the result of a thorough study, which considered three possible track solutions: along the Brenner incision, east and west of the latter [4]. The tracks along the Brenner incision give the possibility of a shorter connection between Innsbruck and Fortezza, but they present many problems from the geological point of view, so that it was considered appropriate to examine tracks east and west of the Brenner incision. The east tracks result more favourable, considering that intermediate attacks are needed between Innsbruck and Fortezza and that the connection with the Innsbruck railway ring should be possible. At the end the track that is now under construction has been chosen among those east of the Brenner incision.*

*The Brenner base tunnel is a complex system, constituted by an exploratory tunnel, two main tunnels and four side access tunnels located at Ampass, Ahrental and Wolf in Austrian territory, and at Mules in Italy [3]. These access tunnels, which connect the outer surface to the main tunnels, will perform a logistic function during the construction, and will have an emergency function in the operating phase. The two main tunnels, which will be travelled by the trains, are single track, have 8.1 internal diameter, and are located at distance variable from 40 to 70 m, depending on the geological characteristics of the zones that are crossed. The two tunnels will be connected every 300 m by transverse passages, which will have logistic function during the construction and emergency function in the operative phase. The exploratory tunnel extends from one end to the other of the tunnel system and is located in central position, at a depth of 12 m under the main tunnels. Besides the transverse passages, which can be used as escapes in case of emergency, three safety stops are planned as well, located at Innsbruck, below St. Jodok and at Campo di Trens, located at a distance of about 20 km from each other. Each safety stop is 470 m long and has escapes every 90 m towards the central tunnel that will be travelled by the rescue train [3].*

*The entry into operations of the new base tunnel, which will have design speed of 250 km/h for the passenger trains and of 120-160 km/h for the freight trains [3], will increase substantially the performance of the Brenner railway, mainly as a consequence of the significant reduction in gradients. Freight trains with much greater length and greater payload will travel the railway, causing an increase in the railway ca-*

ro di tracce orario disponibili nei tratti di adduzione, a Sud e a Nord della galleria, il quale rimarrà quello attuale fino a quando non sarà completato il quadruplicamento dell'intera linea ferroviaria, dall'altro nella capacità di movimentazione delle merci dei centri intermodali che alimentano il trasporto delle merci sulla ferrovia. Ciò è conseguenza del fatto che il trasporto ferroviario delle merci è un sistema complesso, di cui la linea ferroviaria è solo uno dei componenti.

Il calcolo della capacità attuale della ferrovia del Brennero è stato oggetto di numerosi studi, i quali sono giunti a conclusioni notevolmente discordanti fra loro [11], [13]. Allo scopo di eseguire una stima attendibile della attuale capacità di trasporto della ferrovia del Brennero è opportuno partire dalla conoscenza del numero minimo di tracce orario disponibili giornalmente sulla linea, che si realizza, secondo RFI, nel tratto a Sud del Brennero ed è uguale a 180 [14], valore molto prossimo a 173 calcolato da CROCE [6]. Secondo fonti RFI sulla linea transitano attualmente in media 64 treni passeggeri al giorno, valore uguale a quello rilevato da GRIMALDI [9], di cui 53 regionali e 11 a lunga percorrenza, per cui baseremo il nostro studio sull'ipotesi di 116 tracce totali a disposizione del traffico merci. Supponendo che il numero medio giornaliero di treni merci sia lo stesso nelle due direzioni, detto  $x$  tale numero in ciascuna direzione, si ha che occorrono  $x$  locomotori supplementari per la doppia trazione verso il valico del Brennero. Questi locomotori vengono raggruppati in treni mediamente composti da tre elementi nella fase di discesa, come si vede nella fig. 6, la quale riporta la foto di un treno di tre locomotive "Locomotion" in discesa verso Innsbruck lungo il tornante di Sankt Jodok.

L'esercizio della linea richiede quindi  $x$  tracce orario al giorno per i treni in salita e  $x + x/3$  tracce orarie per i treni in discesa. Tenendo presente che i treni in discesa hanno una velocità alquanto superiore a quella dei treni in salita, e che quindi la distanza temporale fra due tracce orarie successive in discesa è alquanto inferiore a quella fra le tracce in salita, si può supporre che l'intervallo temporale - pari a un giorno - comprendente  $x$  tracce orarie in salita sia uguale a quello comprendente  $x + x/3$  tracce orario in discesa. Poiché il numero giornaliero di tracce orario a disposizione dell'esercizio è 116, nell'insieme delle due direzioni, si ha che,  $x + (x + x/3) = 116$ , da cui  $x = 50$ . Quindi il numero massimo di treni merci che oggi possono transitare giornalmente sulla linea è  $2x = 100$ .

Valori molto diversi fra loro sono stati attribuiti al carico utile di un treno avente portata massima di 1200 t, quale è quello che - come si è visto - può transitare sulla attuale ferrovia del Brennero. BBT-GEIE nello studio preliminare del 2002 [5] assume un valore di 401.06 t, l'Osservatorio Val di Susa nel Quaderno n. 1 riguardante il collegamento ferroviario Torino-Lione [12] ha ipotizzato un valore di 510 t, mentre il valore rilevato al Gottardo è 530 t. D'altra parte JANIC, nel suo studio [10] sul trasporto

capacity, i.e. in the number of tons carried in unit time. However one has to consider that this capacity increase is bounded on one hand by the number of paths on the stretches north and south of the tunnel, which will remain that existing one until the whole four track update of the railway will be completed, on the other hand by the handling capacity of the intermodal centres that feed the freight railway transport. This is a consequence of the fact that the railway freight transport is a complex system, of which the railway is only one component.

The computation of the capacity of the existing Brenner railway has been subject of many researches, which reached very different conclusions [11], [13]. In order to obtain a reliable estimate of the freight transport capacity of the existing Brenner railway, we have to start from the knowledge of the minimum number of daily paths available on the railway, which occurs, according RFI, in the stretch south of the Brenner, and it is equal to 180 [14], which is a value very close to 173 computed by CROCE [6]. According to some RFI fonts, the railway is currently travelled on the average by 64 passenger trains every day - value that is equal to that surveyed by GRIMALDI [9] - of which 53 are regional trains and 11 long-distance trains. Thus we will found our computations on the hypothesis of 116 paths available to freight traffic. By supposing that the average number of freight trains is the same in the two directions, given the number  $x$  in each direction, we have that  $x$  additional engines are needed for the double traction towards the Brenner pass. These engines are assembled in trains made up of three elements in the descent phase, as we see in fig. 6, which shows the photo of three engines "Locomotion" downhill to Innsbruck along the Sankt Jodok hairpin bend.

Thus the operation of the railway needs  $x$  daily paths for the uphill trains and  $x + x/3$  paths for the downhill trains. By considering that the speed of the downhill trains is rather greater than that of the uphill trains, and thus that the time gap between two successive paths for the downhill trains is rather less than that for the uphill trains, we can suppose



Fig. 6 - Un treno di locomotori "Locomotion" in discesa verso Innsbruck.

Fig. 6 - A train of three engines "Locomotion" downhill towards Innsbruck.



intermodale delle merci attribuisce ad un treno della portata lorda di 1560 t un carico utile di 837 t, pari al 53.6%. Tenendo conto di tutti questi valori, e del fatto che molti di essi sono probabilmente valori medi, inferiori alla portata utile massima di un treno di 1200 t, si è ritenuto opportuno attenersi al criterio abbastanza diffuso di assumere, in assenza di dati sicuri, un valore del carico utile pari al 50% della portata lorda, assumendo quindi che il carico utile di un treno di 1200 t sia 600 t.

Si ha quindi che la capacità attuale della ferrovia del Brennero, cioè il massimo numero di tonnellate che possono essere trasportate giornalmente è  $100 \cdot 600 = 60000$  t. Considerando, come in [12], 260 giorni di punta equivalenti all'anno, si ha che la capacità annua della ferrovia è  $60000 \cdot 260 = 15.6$  milioni di t/anno. Poiché dai dati ALPINFO [1] risulta che nel 2014 sono transitate attraverso il valico ferroviario del Brennero 11.9 milioni di tonnellate di merce, si ricava che la ferrovia del Brennero ha ancora una discreta riserva di capacità rispetto all'attuale flusso di merci.

Dopo la costruzione della galleria di base potranno transitare sulla ferrovia del Brennero treni lunghi 750 m trainati da un solo locomotore. BBT, la Società responsabile della progettazione della galleria di base del Brennero, in documenti redatti in epoche diverse [15], [16] attribuisce una portata lorda massima di 1600 t ad un treno lungo 750 m trainato lungo la galleria da un unico locomotore. Lo stesso valore è indicato per la galleria di base del Gottardo a pag. 148 del citato Quaderno n. 1 dell'Osservatorio Val di Susa. Si assume quindi un carico utile di 800 t, pari alla metà del carico massimo rimorchiabile, per un treno lungo 750 m attraverso la galleria del Brennero. Tenendo inoltre conto che si libereranno le tracce orario attualmente impegnate dai treni di locomotori in fase di rientro, il massimo numero di treni merci che potrà transitare giornalmente sarà uguale a 116, per cui si può assumere che la futura capacità di trasporto giornaliera della ferrovia sia uguale a  $116 \cdot 800 = 92800$  t, con un incremento di 1.55 rispetto al valore attuale.

Ci proponiamo ora di valutare l'effetto di questo incremento di capacità sulla distribuzione del traffico totale fra le due autostrade e le due ferrovie che attraversano le Alpi orientali. A tale scopo sarà utilizzato il modello dinamico di ripartizione modale presentato in [7], il quale sarà sinteticamente esposto nei limiti strettamente necessari a rendere comprensibile la sua successiva applicazione.

### 3. Il modello dinamico di ripartizione modale utilizzato per calcolare l'effetto dell'aumento di capacità della ferrovia del Brennero

Un trasportatore, che intende spedire merci fra due punti situati nei due territori in esame a Sud e a Nord delle Alpi, ha a disposizione quattro alternative di trasporto: due di esse costituite da itinerari stradali che attraversano le Alpi utilizzando l'autostrada del Brennero e l'autostra-

*that the time interval comprising  $x$  paths for uphill trains is equal to that comprising  $x + x/3$  paths for the downhill trains. As the daily number of paths available in the whole of the two directions is 116 we have that  $x + (x + x/3) = 116$ , from which  $x = 50$ . Thus the maximum daily number of freight trains that can travel the existing railway is  $2x = 100$ .*

*Very different values have been attributed to the payload of a train whose gross weight is 1200 tons, as that which can travel the existing Brenner railway. The preliminary study carried out by BBT-GEIE in 2002 [5] assumes a value of 401.06 tons, the Observatory Val di Susa in the dossier n. 1 concerning the Turin-Lion [12] railway supposes a value of 510 tons, while the value surveyed on the Gotthard railway is 530 tons. On the other hand JANIC in his paper [10] on the intermodal transport attributes a payload of 837 tons to a train whose gross weight is 1560 tons, equal to 53.6%. Taking account of all these values, and considering that some of them are average values, less than the maximum payload of a train whose gross weight is 1200 tons, we have considered appropriate to conform to a relative common criterion to assume - in the absence of certain data - a value of payload equal to 50% of the gross weight, thus assuming that the payload of a 1200 tons train is 600 tons.*

*Thus we have that the capacity of the existing Brenner railway, i.e. the maximum daily number of tons that can be carried is  $100 \cdot 600 = 60000$  tons. Considering, as in [12], 260 equivalent peak days per year, we have that the yearly capacity of the railway is  $60000 \cdot 260 = 15.6$  million tons. Since the ALPINFO [1] data show that 11.9 million tons crossed the Brenner railway pass in 2014, we see that the Brenner railway has still a fair spare capacity compared to the existing current flow.*

*After the building of the base tunnel trains 750 m long, pulled by only one engine can travel the Brenner railway. BBT, the Company responsible for the design of the Brenner tunnel, assigns - in various documents drawn up in different epochs [15], [16] - a maximum gross weight of 1600 tons to a train 750 m long hauled by only one engine along the tunnel. The same value is indicated for the Gotthard tunnel at p. 148 of the aforementioned dossier n.1 of the Observatory Val di Susa. Thus we assume a payload of 800 tons, equal to half of the gross weight, for a train whose length is 750 m along the Brenner tunnel. Considering that the paths used by the additional engines in the return phase are now available, the maximum daily number of freight trains that can pass is 116, so that we can assume that the future daily transport capacity of the railway is  $116 \cdot 800 = 92800$  tons, with an increase of 1.55 compared to the present value.*

*Now we intend to estimate the effect of this increase in capacity on the distribution of the whole freight traffic among the two motorways and the two railways that cross the Eastern Alps. For this purpose we'll utilize the dynamic model of modal split presented in [7], which will be explained to the extent strictly necessary to make its successive application understandable.*

da dei Tauri rispettivamente, le altre due costituite da itinerari intermodali che attraversano le Alpi utilizzando la ferrovia del Brennero e la ferrovia dei Tauri rispettivamente. D'ora in avanti chiameremo ciascuna delle due autostrade e delle due ferrovie genericamente *modo di trasporto*. Il trasportatore assegna a ciascuna tonnellata di merce da spedire al tempo  $t$  un numero, detto *costo del trasporto*, per ciascuna delle quattro alternative: più alto è questo numero, meno preferibile è l'alternativa. Se estraiamo casualmente una tonnellata di merce dall'insieme delle tonnellate spedite al tempo  $t$  fra i due territori dalla totalità dei trasportatori, il numero assegnato a questa tonnellata per ciascuna alternativa di trasporto varia con la distanza della spedizione, l'atteggiamento del trasportatore che esegue la spedizione circa la sicurezza, l'affidabilità e la flessibilità dell'alternativa, e con il tipo di merce. Poiché:

- a) le distanze delle spedizioni sono diverse per i vari punti di origine e destinazione, i quali sono dispersi nei due territori;
- b) gli atteggiamenti dei trasportatori sono distribuiti in modo aleatorio nella popolazione dei trasportatori;
- c) il tipo di merce trasportata varia casualmente nell'insieme delle tonnellate spedite,

si ha che il costo del trasporto è una variabile aleatoria. Supponiamo che la media  $c_i^t$  di questa variabile aleatoria, detta anch'essa *costo del trasporto*, relativa all'insieme di itinerari che utilizzano al tempo  $t$  il modo di trasporto  $i$  fra i quattro che attraversano le Alpi orientali, è una funzione del rapporto fra il flusso delle merci che usa il modo  $i$  e la capacità di quest'ultimo. Questa ipotesi, la cui validità è stata ampiamente provata nello studio dei sistemi di trasporto, trova la sua giustificazione nel fatto che, man mano che il flusso si avvicina alla capacità, aumenta l'interferenza fra i veicoli che utilizzano contemporaneamente uno stesso modo di trasporto, dando luogo tra l'altro ad aumento dei tempi di attesa e ad allungamenti notevolmente dispersi dei tempi di viaggio, i quali, oltre a ridurre le prestazioni medie del modo di trasporto, ne riducono notevolmente l'affidabilità.

Si ha quindi:

$$c_i^t = c_i (X_i^t T^t / K_i^t) \quad (1)$$

dove  $T^t$  è il numero totale di tonnellate spedite nell'unità di tempo al tempo  $t$  fra i due territori, che chiamiamo *domanda di trasporto*,  $X_i^t$  è la frazione di  $T^t$  che usa il modo  $i$ , e  $K_i^t$  è la capacità di quest'ultimo, cioè il massimo numero di tonnellate che possono essere trasportate col modo  $i$  nell'unità di tempo al tempo  $t$ . Si osserva che  $c_i^t$  varia nel tempo, a parità di flusso  $X_i^t T^t$  di merci trasportate, a causa delle variazioni infrastrutturali, tecnologiche ed organizzative del modo di trasporto, che danno luogo a variazioni della capacità  $K_i^t$ .

Supponiamo come in [7] che un trasportatore attribuisca a ciascuna alternativa un costo al tempo  $t + 1$  sulla base della sua conoscenza della performance dell'al-

### 3. The dynamic model of modal split used to compute the effect of the increase in capacity of the Brenner railway

A carrier, who intends to send freight between two points located in the two territories we are considering north and south of the Eastern Alps, can use four transport alternatives: two of them constituted by the road routes that cross the Alps using the Brenner motorway and the Tauern motorway respectively, the other two constituted by intermodal routes that cross the Alps using the Brenner railway and the Tauern railway respectively. From now on we'll name generically each of the two motorways and of the two railways transport mode. The carrier assigns to each ton of freight he intends to send a number, named transport cost, for each of the four alternatives: the higher this number is, the less preferable the alternative is. If we draw randomly one ton from the set of tons carried at time  $t$  between the two territories by the whole of the carriers, the number attributed to this ton for each transport alternative varies with the shipping distance, the attitude of the carrier towards the safety, reliability and flexibility of the alternative, and with the type of freight. Since:

- a) the shipping distances are different for the various origin and destination points, dispersed in the two territories;
- b) the carriers' attitude are randomly distributed in the carrier population;
- c) the type of freight varies randomly for each ton drawn from the set of the sent tons,

we have that transport cost is a random variable. We suppose that the mean  $c_i^t$  of this random variable - which is also named transport cost - relative to the set of the itineraries that use at time  $t$  the transport mode  $i$  among the four that cross the Eastern Alps, is a function of the ratio between the freight flow that uses the mode  $i$  and the capacity of the latter. This hypothesis, whose validity has been widely proved in the studies on the transport systems, has its basis in the fact that, as flow approaches the capacity, the interference between the vehicles that use the same transport mode at the same time increases, giving rise to an increase in the waiting times and in the very dispersed lengthenings of travel times, which reduces substantially the reliability, and in general the performance, of the transport modes.

Thus we have:

$$c_i^t = c_i (X_i^t T^t / K_i^t) \quad (1)$$

where  $T^t$  is the total number of tons sent in an unit time at time  $t$  between the two territories, which we name transport demand,  $X_i^t$  is the fraction of  $T^t$  that uses mode  $i$ ,  $K_i^t$  is the capacity of the latter, i.e. the maximum number of tons that can be carried with mode  $i$  in a unit time at time  $t$ . We remark that  $c_i^t$  varies over time,  $X_i^t$  being the same, because of the changes in infrastructures, technologies and organization of the transport mode, which gives rise to changes in capacity  $K_i^t$ .



ternativa al tempo  $t$ , la cui media dipende dal rapporto  $X_i^t T^t / K_i^t$ . Poiché le alternative non hanno elementi di tracciato in comune è lecito ritenere che i costi del trasporto siano variabili aleatorie indipendenti. Supponendo che siano distribuiti secondo la legge di probabilità di Gumbel, abitualmente utilizzata nello studio della ripartizione modale, si ha che la frazione  $\bar{X}_i^t$  della domanda  $T^{t+1}$  al tempo  $t + 1$  che converrebbe trasportare col modo  $i$  è:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-c_i(X_i^t T^t / K_i^t)]}{\sum_{j=1}^4 \exp[-c_j(X_j^t T^t / K_j^t)]} \quad (2)$$

Un trasportatore si sposta da un modo di trasporto ad un altro che ritiene più conveniente con un certo ritardo dovuto a numerosi fattori, tra cui limitata fiducia nelle future possibilità di un nuovo modo di trasporto, difficoltà nel modificare la sua organizzazione logistica, e in generale semplice inerzia. Pertanto solo una frazione di coloro che ritengono il modo  $i$  migliore di quello usato al tempo  $t$  abbandoneranno quest'ultimo al tempo  $t + 1$ . Ciò significa che  $X_i^{t+1} - X_i^t$  è solo una frazione di  $\bar{X}_i^t - X_i^t$ , per cui si ha:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta[\bar{X}_i^t - X_i^t] \quad (3)$$

dove il coefficiente  $\beta$ ,  $0 < \beta < 1$ , che supponiamo essere costante, rappresenta la frazione di coloro che ritengono conveniente cambiare modo di trasporto ed effettivamente si spostano sul modo più conveniente nell'unità di tempo. Esso è una misura della rapidità con cui i trasportatori cambiano modo di trasporto: quanto più alto è  $\beta$  tanto più rapidi sono i trasportatori nelle loro scelte.

L'applicazione iterata della (3) fornisce l'evoluzione nel tempo della frazione  $X_i^t$  della domanda  $T^t$  che usa ciascun modo  $i$ , e quindi, conoscendo l'evoluzione di  $T^t$ , l'andamento nel tempo del flusso di merci su ciascuna delle due autostrade e delle due ferrovie che attraversano le Alpi orientali. L'uso della (3) richiede il calcolo di  $\bar{X}_i^t$  che, come si vede dalla (2), dipende dalle espressioni delle funzioni di costo  $c_i(X_i^t T^t)$ . Noi supponiamo, come in [7] e in [8], che  $c_i(X_i^t T^t)$  abbia una espressione polinomiale del secondo ordine:

$$c_i(X_i^t T^t / K_i^t) = a_{i,1} + a_{i,2} X_i^t T^t / K_i^t + a_{i,3} [X_i^t T^t / K_i^t]^2 \quad (4)$$

La validità di questa ipotesi sarà verificata nella Sezione 4, in cui l'uso della (4) nella applicazione del modello al calcolo dei flussi delle merci attraverso le Alpi orientali fornisce evoluzioni nel tempo dei flussi sui quattro modi di trasporto che si adattano abbastanza bene ai dati rilevati.

Supponiamo di conoscere, in ciascuna epoca di una sequenza  $\Sigma$  di intervalli temporali unitari (per esempio un anno), i valori della domanda  $T^t$  e delle frazioni  $X_i^t$  che utilizzano ciascun modo di trasporto  $i$ . Se le capacità  $K_i^t$

Suppose as in [7] that the carrier assigns to each alternative a cost at time  $t + 1$  on the basis of his knowledge of the performance of the alternative at time  $t$ , whose average depends on the ratio  $X_i^t T^t / K_i^t$ . Since the alternatives have no common track elements, we can think that transport cost are independent random variables. By supposing that they are distributed according the Weibull probability law - an hypothesis usually assumed in the studies of modal split - we have that the fraction  $\bar{X}_i^t$  of demand  $T^{t+1}$  that would be convenient to carry with mode  $i$  at time  $t + 1$  is:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-c_i(X_i^t T^t / K_i^t)]}{\sum_{j=1}^4 \exp[-c_j(X_j^t T^t / K_j^t)]} \quad (2)$$

A carrier shifts from a transport mode to another deemed more suitable with a delay due to many factors including limited confidence in the future possibilities of a new transport mode, difficulties in adapting the logistic organization, and simple inertia, in general. Thus only some of those who deem mode  $i$  better than that they are using at time  $t$  will abandon the latter at time  $t + 1$ . This means that  $X_i^{t+1} - X_i^t$  is only a fraction of  $\bar{X}_i^t - X_i^t$ , so we have:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta[\bar{X}_i^t - X_i^t] \quad (3)$$

where coefficient  $\beta$ ,  $0 < \beta < 1$ , which we suppose to be constant, represents the fraction of carriers deeming it advantageous to change transport mode and actually do switch to the most suitable mode in a unit time. It is a measure of the speed with which carriers change transport mode: the higher  $\beta$  is, the quicker carriers are to switch.

The iterated application of Eq (3) furnishes the evolution over time of the fraction  $X_i^t$  of demand  $T^t$  that use each mode  $i$ , and thus the pattern over time of the freight flow on each of the two motorways and of the two railways that cross the Eastern Alps. The use of Eq (3) needs the computation of  $\bar{X}_i^t$  which, as we see from Eq (2), depends on the expression of cost functions  $c_i(X_i^t T^t)$ . We suppose, as in [7] and in [8], that  $c_i(X_i^t T^t)$  has a second order polynomial expression:

$$c_i(X_i^t T^t / K_i^t) = a_{i,1} + a_{i,2} X_i^t T^t / K_i^t + a_{i,3} [X_i^t T^t / K_i^t]^2 \quad (4)$$

The validity of this hypothesis will be verified in Section 4, where the use of Eq (4) in the application of the model to the computation of freight flows across the Eastern Alps furnishes the evolutions over time of the flows on the four transport modes, which fit quite well the experimental values.

Suppose to know, in each epoch of sequence  $\Sigma$  of unit time intervals (e.g. one year), the values of demand  $T^t$  and of the fractions  $X_i^t$  that use each transport mode. If capacity  $K_i^t$  maintains a constant value  $K_i$  during the sequence  $\Sigma$ , it is possible to put  $a_{i,2} / K_i = b_{i,2}$ ,  $a_{i,3} / K_i^2 = b_{i,3}$ , to write Eq (4) in this way:

mantengono un valore costante  $K_i$  durante la sequenza  $\Sigma$ , è possibile porre  $a_{i,2} / K_i = b_{i,2}$ ,  $a_{i,3} / K_i^2 = b_{i,3}$ , scrivere la (4) in questo modo:

$$c_i(X_i^t T^t) = a_{i,1} + b_{i,2} X_i^t T^t + b_{i,3} (X_i^t T^t)^2 \quad (5)$$

e stimare quindi il coefficiente  $\beta$  e i coefficienti della (5) mediante il metodo di stima descritto in [7]. Introducendo la (5) nella (2) si calcolano le espressioni  $\bar{X}_i$  che compaiono nella (3), la cui iterata applicazione fornisce l'evoluzione nel tempo della frazione  $X_i^t$  della domanda che utilizza ciascun modo di trasporto, e quindi del flusso  $X_i^t T^t$  di merci su quest'ultimo.

#### 4. L'effetto dell'aumento di capacità della ferrovia del Brennero sulla ripartizione della domanda fra i quattro modi di trasporto attraverso le Alpi orientali

Utilizzando i dati forniti da ALPINFO [1] sono stati calcolati i valori delle tonnellate di merci transitate annualmente sui quattro modi di trasporto considerati finora nei rispettivi punti di attraversamento delle Alpi orientali nel periodo compreso fra il 1994 e il 2014. Sommando questi valori relativamente a ciascun anno sono stati ottenuti quelli della domanda totale  $T^t$ , i quali sono riportati nella fig. 7, interpolati dalla curva generata dalla seguente equazione:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + 0.055 \left[ 1 - \left( \frac{T^t}{65} \right)^{25} \right] \right] \quad (6)$$

Si osserva che la curva interpola abbastanza bene i valori sperimentali, ad eccezione di scostamenti anomali fra il 2007 e il 2009, probabile conseguenza della notevole instabilità economica di quegli anni. Negli anni suc-

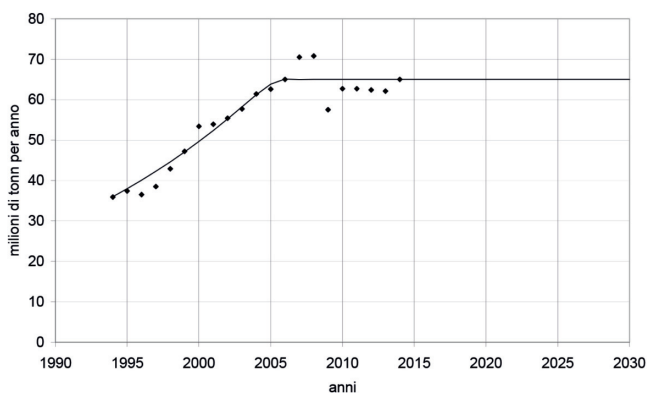


Fig. 7 - Andamento nel tempo della domanda annua di trasporto delle merci attraverso le Alpi orientali.

Fig. 7 - Pattern over time of the yearly freight transport demand across the Eastern Alps.

$$c_i(X_i^t T^t) = a_{i,1} + b_{i,2} X_i^t T^t + b_{i,3} (X_i^t T^t)^2 \quad (5)$$

and thus to compute the  $\beta$  coefficient and the coefficients of Eq (5) through the estimation method explained in [7]. By introducing Eq(5) into Eq (2) we compute the expressions  $\bar{X}_i$  that are in Eq (3), whose iterated application furnishes the evolution over time of the fraction of demand that uses each transport mode, and thus of the freight flow  $X_i^t T^t$  on the latter.

#### 4. The effect of the increase in capacity of the Brenner railway on the split of demand between the four transport modes across the Eastern Alps

By using the data furnished by ALPINFO [1] we have computed the values of freight tons passed on the four transport modes we are considering, in the respective cross points of the Eastern Alps in the time period between 1994 and 2014. By summing these values regarding each year we have obtained those of the total demand  $T^t$ , which are shown by fig. 7, interpolated by the curve generated by the following equation:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + 0.055 \left[ 1 - \left( \frac{T^t}{65} \right)^{25} \right] \right] \quad (6)$$

We note that the curve fits quite well the experimental values except abnormal deviations between 2007 and 2009, probable consequence of the great economic instability of those years. In the successive years transport demand remained quite constant, close to the value of about 65 million tons per year, which we suppose can be assumed as asymptotic value, and thus as value that will remain also in the next years, given the present general conditions of world economy.

By computing the ratios between the values of freight tons carried yearly with each transport mode and the values of the total demand, we have obtained - for the time period between 1994 and 2014 - the sequences of the demand fractions on the four transport modes. By using these sequences we have estimated, through the estimation method explained in [7], parameter  $\beta$  of Eq (3) and the coefficients of the cost function (5) for the four transport modes. So we have estimated  $\beta = 0.055$ , while the estimates of the coefficients furnish the following expressions for the cost functions, where  $T^t$  is expressed in million tons per year:

mode 1: Brenner railway

$$c_1(X_1^t T^t) = 1.835 + 0.702 X_1^t T^t + 0.021 (X_1^t T^t)^2$$

mode 2: Brenner motorway (7)

$$c_2(X_2^t T^t) = 1.827 - 0.303 X_2^t T^t + 0.023 (X_2^t T^t)^2$$

mode 3: Tauern railway

$$c_3(X_3^t T^t) = 2.322 + 0.031 X_3^t T^t + 0.164 (X_3^t T^t)^2$$

mode 4: Tauern railway

$$c_4(X_4^t T^t) = 2.000 - 0.009 X_4^t T^t + 0.107 (X_4^t T^t)^2$$

cessivi la domanda si è mantenuta all'incirca costante, prossima al valore di 65 milioni di t/anno, che si ritiene di poter assumere come valore asintotico, e quindi come valore che, date le attuali condizioni generali dell'economia mondiale, si ritiene che si conserverà anche nei prossimi anni.

Calcolando i rapporti fra i valori delle tonnellate di merci trasportate annualmente su ciascun modo di trasporto e i valori della domanda totale, si sono ottenuti - per il periodo fra il 1994 e il 2014 - le sequenze delle frazioni della domanda sui quattro modi di trasporto. Utilizzando queste sequenze sono stati stimati, mediante il metodo di stima esposto in [7], il parametro  $\beta$  della (3) ed i tre coefficienti della funzione di costo (5) per i quattro modi di trasporto. In questo modo è stato stimato che  $\beta = 0.055$ , mentre la stima dei coefficienti fornisce le seguenti espressioni per le funzioni di costo, in cui  $T^t$  è espresso in milioni di t/anno:

modo 1: ferrovia del Brennero

$$c_1(X_1^t T^t) = 1.835 + 0.702X_1^t T^t + 0.021(X_1^t T^t)^2$$

modo 2: autostrada del Brennero (7)

$$c_2(X_2^t T^t) = 1.827 - 0.303X_2^t T^t + 0.023(X_2^t T^t)^2$$

modo 3: ferrovia dei Tauri

$$c_3(X_3^t T^t) = 2.322 + 0.031X_3^t T^t + 0.164(X_3^t T^t)^2$$

modo 4: autostrada dei Tauri

$$c_4(X_4^t T^t) = 2.000 - 0.009X_4^t T^t + 0.107(X_4^t T^t)^2$$

Assegnando le espressioni (7) alle funzioni  $c_i$  nella (2), e ponendo  $\beta = 0.055$  nella (3), questa fornisce le sequenze delle stime delle frazioni  $X_i^t$  di  $T^t$  che usano i quattro modi di trasporto, partendo dai valori iniziali  $X_i^0$  e  $T^0$ , i quali sono quelli ricavati dai dati rilevati da ALPINFO [1] nel 1994. Le traiettorie delle quattro sequenze così ottenute

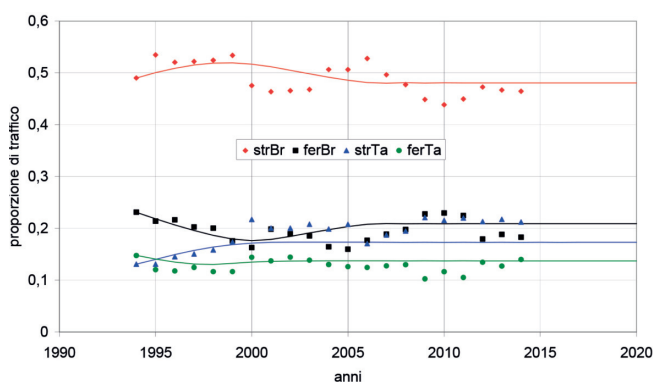


Fig. 8 - Andamento delle proporzioni della domanda di trasporto delle merci attraverso le Alpi orientali relative ai quattro modi di trasporto, sovrapposte ai punti ottenuti dai dati rilevati.

Fig. 8 - Pattern over time of the proportions of freight transport demand across the Eastern Alps relative to the four transport modes, superimposed on the points obtained from the surveyed data.

By assigning the expressions (7) to cost functions  $c_i$  in Eq (2), and putting  $\beta = 0.055$  in Eq (3), the latter furnishes the sequences of the estimates of the fractions  $X_i^t$  of  $T^t$  that use the four transport modes, starting from the initial values  $X_i^0$  and  $T^0$ , which are those surveyed by ALPINFO [1] in 1994. The patterns over time of the four sequences so obtained are shown in fig. 8, superimposed on the surveyed points.

Supposing that the capacities  $K_i$  of the four transport modes - and thus the coefficients of functions (7) - keep the values of the period 1994-2014 also in the successive years, functions (7) can be utilized to compute the sequel of the evolution of fractions  $X_i^t$  in the successive years. The sequel of the evolution until 2020 is shown in fig. 8, where we see that the trajectories are horizontal lines, consequence of the fact that both the total demand and the capacities remain constant over time. We note in fig. 8 that the fraction of demand that uses the Brenner motorway at first increases over time, then decreases tending to its asymptotic value, whereas the fraction that uses the Tauern motorway increases progressively up to its asymptotic value, according to what we have seen in fig.3. Instead the proportions of demand that use both the railways at first decrease, in a more pronounced way for the Brenner motorway, then increase over time tending towards their respective asymptotic values.

Fig. 9 shows the patterns over time of the freight flows carried yearly by the four transport modes. We note that the flows on motorways have been increasing in a more pronounced way than on the railways, according to what we have seen in fig. 5. We note also that the freight flow on the Brenner motorway is substantially greater than that on the other transport modes.

The trajectories in both figures 8 and 9 interpolate quite well the points computed on the basis of the surveyed data, and that represents a confirmation of the validity of the hypotheses on which the model is based. The greater fluctuations around the average values in the years between 2005 and 2010 are due to the marked economic instability of that time period.

Fig. 10 shows the pattern of the transport cost as a function of the yearly freight flows on the four transport modes, computed using the expressions (7). We note that, the freight flows being the same, the transport costs on modes 1 and 2 through the Brenner pass are markedly less than those on modes 3 and 4 through the Tauern tunnels. This is due to the fact that the average lengths of the road and rail itineraries between the origin and destination points through the Brenner pass are notably less than those of the itineraries through the Tauern tunnels. Moreover we observe that the transport cost of the two motorways are markedly less than those of the corresponding railways. This means that the capacity of the two motorways is rather greater than that of the corresponding railways, which on the other hand is bounded also by the capacities of the intermodal centres that feed the rail transport.



sono riportate nella fig. 8, sovrapposte ai punti corrispondenti ai dati rilevati.

Supponendo che le capacità  $K_i$  dei quattro modi di trasporto - e quindi i coefficienti delle (7) - conservino i valori del periodo 1994-2014 anche negli anni successivi, le (7) possono essere utilizzate per calcolare il seguito della evoluzione delle frazioni  $X_i^t$  negli anni successivi al 2014. Il seguito della evoluzione fino al 2020 è mostrato nella Fig. 8, nella quale si vede che le traiettorie sono linee orizzontali, conseguenza del fatto che sia la domanda totale che le capacità dei quattro modi di trasporto si mantengono costanti nel tempo. Nella fig. 8 si nota che la frazione di domanda che usa l'autostrada del Brennero dapprima cresce nel tempo, quindi diminuisce tendendo al suo valore asintotico, mentre quella che utilizza l'autostrada dei Tauri aumenta progressivamente fino al suo valore asintotico, ciò in accordo con quanto si è visto nella fig. 3. Invece le proporzioni di domanda che usano entrambe le ferrovie dapprima diminuiscono, in modo più netto per la ferrovia del Brennero, quindi crescono nel tempo tendendo ai rispettivi valori asintotici.

La fig. 9 mostra l'andamento nel tempo dei flussi di merce trasportata annualmente dai quattro modi di trasporto. Si osserva che i flussi sulle autostrade sono andati aumentando in modo più marcato che sulle ferrovie, ciò in accordo con quanto si è visto nella fig. 5. Si nota ancora che il flusso delle merci sull'autostrada del Brennero è notevolmente maggiore di quello sugli altri tre modi di trasporto.

Le traiettorie in entrambe le figg. 8 e 9 interpolano abbastanza bene i punti calcolati in base ai dati rilevati, e ciò costituisce una conferma della attendibilità delle ipotesi poste a base del modello. Le più elevate fluttuazioni intorno ai valori medi negli anni tra il 2005 e il 2010 sono da attribuire alla notevole instabilità economica di quel periodo.

La fig. 10 mostra l'andamento del costo del trasporto in funzione del flusso annuo di merci sui quattro modi di trasporto calcolato utilizzando le (7). Si osserva che, a parità di valori del flusso di merci i costi del trasporto sui modi 1 e 2 attraverso il valico del Brennero sono notevolmente inferiori a quelli sui modi 3 e 4 attraverso le gallerie dei Tauri. Ciò è dovuto al fatto che le lunghezze medie dei percorsi stradali e ferroviari tra i punti di origine e destinazione attraverso il valico del Brennero sono notevolmente inferiori a quelle dei percorsi attraverso le gallerie dei Tauri. Si osserva inoltre che i costi del trasporto relativi alle due autostrade sono sensibilmente inferiori a quelli relativi alle corrispondenti ferrovie. Ciò significa che la capacità delle due autostrade è alquanto maggiore di quella delle corrispondenti ferrovie, la quale è d'altra parte limitata anche dalla capacità dei centri intermodali che alimentano il traffico ferroviario.

Si è visto nella Sezione 2 che a seguito dell'entrata in esercizio della galleria di base la capacità della ferrovia

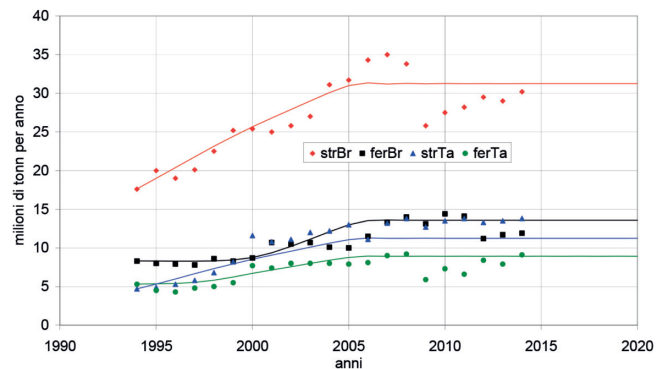


Fig. 9 - Andamento nel tempo dei flussi di merci trasportati annualmente sui quattro modi di trasporto, sovrapposti ai punti corrispondenti ai dati rilevati.

Fig. 9 - Pattern over time of the freight flows carried yearly on the four transport modes, superimposed on the points corresponding to the surveyed data.

We have seen in Section 2 that, as a consequence on the entry into operations of the base tunnel, the capacity of the Brenner railway will increase with a ratio of 1.55 compared to the current value. By defining, as said above, mode 1 the Brenner railway, putting  $i = 1$  in the Eq (4) and Eq (5), and denoting  $\hat{b}_{1,2}$  and  $\hat{b}_{1,3}$  the coefficients of the cost function for the Brenner railway modified as a consequence of the capacity increase, we have  $\hat{b}_{1,2} = a_{1,2}/(1.55K) = b_{1,2}/1.55$ ,  $\hat{b}_{1,3} = a_{1,3}/(1.55K)^2 = b_{1,3}/1.55^2$ , where  $b_{1,2}$  and  $b_{1,3}$  are the coefficients of the first of the cost functions (7), so that the expression of the new cost function for the Brenner railway is:

$$c_1(X_1^t T^t) = 1.835 + 0.453 \cdot X_1^t T^t + 0.0087 \cdot (X_1^t T^t)^2 \quad (8)$$

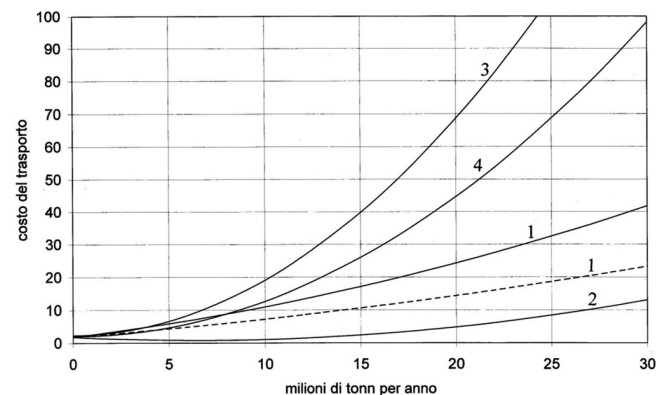


Fig. 10 - Funzioni di costo della ferrovia del Brennero 1, dell'autostrada del Brennero 2, della ferrovia dei Tauri 3 e dell'autostrada dei Tauri 4. La linea 1 tratteggiata è la funzione di costo della ferrovia del Brennero dopo l'entrata in esercizio della galleria di base.

Fig. 10 - Cost functions of the Brenner railway 1, of the Brenner motorway 2, of the Tauern railway 3 and of the Tauern motorway 4. The broken line 1 is the cost function of the Brenner railway after the entry into operations of the base tunnel.

del Brennero aumenterà con un rapporto 1.55 rispetto al valore attuale. Definendo, come già detto in precedenza, modo 1 la ferrovia del Brennero, e ponendo  $i = 1$  nelle (4) e (5), e indicando con  $\hat{b}_{1,2}$  e  $\hat{b}_{1,3}$  i coefficienti della funzione di costo per la ferrovia del Brennero modificata in seguito all'aumento di capacità, si ha che  $\hat{b}_{1,2} = a_{1,2}/(1.55K) = b_{1,2}/1.55$  e  $\hat{b}_{1,3} = a_{1,3}/(1.55K)^2 = b_{1,3}/1.55^2$ , dove  $b_{1,2}$  e  $b_{1,3}$  sono i coefficienti della prima delle (7), per cui l'espressione della nuova funzione di costo per la ferrovia del Brennero è:

$$c_1(X_i^t T^t) = 1.835 + 0.453 \cdot X_i^t T^t + 0.0087 \cdot (X_i^t T^t)^2 \quad (8)$$

Introducendo le funzioni di costo (7) nella (2), dopo aver sostituito la prima delle (7) con la (8), e ponendo  $\beta = 0.055$  nella (3), la iterata applicazione di quest'ultima fornisce le stime della evoluzione nel tempo, dopo la modifica della capacità della ferrovia del Brennero, delle frazioni  $X_i^t$  di  $T^t$  che usano i quattro modi di trasporto, partendo dai valori iniziali  $X_i^0$  e  $T^0$ , i quali sono quelli che si prevede si realizzeranno immediatamente prima dell'entrata in servizio della nuova galleria di base. Considerando che questa non avverrà certamente prima del 2020, questi valori iniziali coincidono con quelli asintotici calcolati precedentemente, cioè:  $T^0 = 65$ ,  $X_1^0 = 0.209$ ,  $X_2^0 = 0.481$ ,  $X_3^0 = 0.137$ ,  $X_4^0 = 0.173$ . Inoltre la domanda totale conserva dopo l'anno zero il valore iniziale  $T^0 = 65$ , come risulta chiaro dalla fig. 2.

Le traiettorie delle sequenze così ottenute, a partire dall'anno zero di entrata in esercizio della galleria di base, sono riportate nella fig. 11, la quale pone in evidenza che l'entrata in esercizio della galleria di base esercita la sua influenza su tutti i quattro modi di trasporto, determinando il trasferimento di una frazione della domanda di trasporto totale, e quindi dei flussi di merci, dagli altri modi di trasporto alla ferrovia del Brennero. Dalla fig. 11 si vede che questo trasferimento avverrà nei primi anni dopo l'entrata in esercizio della galleria, con le traiettorie tendenti rapidamente ai rispettivi valori asintotici: ciò è una conseguenza del fatto che si è supposto che la domanda totale si mantenga costante nel tempo.

La tabella 1 sintetizza le conseguenze sui flussi di merci attraverso le Alpi orientali prodotte dalla galleria di base del Brennero: essa riporta i valori iniziali - immediatamente prima dell'entrata in esercizio della galleria - ed asintotici, sia delle proporzioni della domanda totale che dei flussi sui quattro modi di trasporto. Da questi dati si ricava che una proporzione pari al 5.9% della domanda totale si trasferisce alla ferrovia del Brennero dagli altri modi di trasporto, con una diminuzione pari al 3.2% per l'autostrada del Brennero, al 1.2% per la ferrovia dei Tauri e all'1.5% per l'autostrada dei Tauri. Conseguentemente il flusso di merci sulla ferrovia del Brennero aumenta del 28.06% rispetto al valore iniziale, mentre le percentuali di diminuzione dei flussi sempre rispetto ai valori iniziali sono il 6.66% per l'autostrada del Brennero, l'8.73% per la ferrovia dei Tauri e l'8.45% per l'autostrada dei Tauri.

Introducing cost functions (7) into Eq (2), after replacing the first of the functions (7) with function (8), and putting  $\beta = 0.055$  in Eq (3), the iterated application of the latter furnishes the estimates of the evolution over time of the fractions  $X_i^t$  of  $T^t$  that use the four transport modes, after the change in capacity of the Brenner railway, starting from the initial values  $X_i^0$  and  $T^0$ , which are those immediately before the entry into operations of the new base tunnel. Considering that the latter will not occur before 2020, these initial values are equal to the asymptotic values computed previously, i.e.:  $T^0 = 65$ ,  $X_1^0 = 0.209$ ,  $X_2^0 = 0.481$ ,  $X_3^0 = 0.137$ ,  $X_4^0 = 0.173$ . Moreover the total demand maintains after year zero the initial value  $T^0 = 65$ , as it is clear in fig. 2.

The trajectories of the sequences so obtained, starting from the year zero of the entry into operations of the base tunnel, are shown in fig. 11, which highlights that the entry into operations of the base tunnel exerts its influence on all the four transport modes, causing the shift of a fraction of the total transport demand, and thus of the freight flows, from the other transport modes to the Brenner railway. Fig. 11 shows that this shift will occur in the first years after the entry into operations of the tunnel, with the trajectories tending quickly to the respective asymptotic values: this is a consequence of the fact that we have supposed that the total demand remains constant over time.

Table 1 synthesizes the consequences on the freight flows across the Eastern Alps caused by the Brenner base tunnel: it shows the initial values - immediately before the entry into operations of the tunnel - and the asymptotic ones, of the proportion of the total demand and of the flows on the four transport modes as well. We see from these data that a proportion of the total demand equal to 5.9% shifts to the Brenner railway from the other transport modes, with a decrease

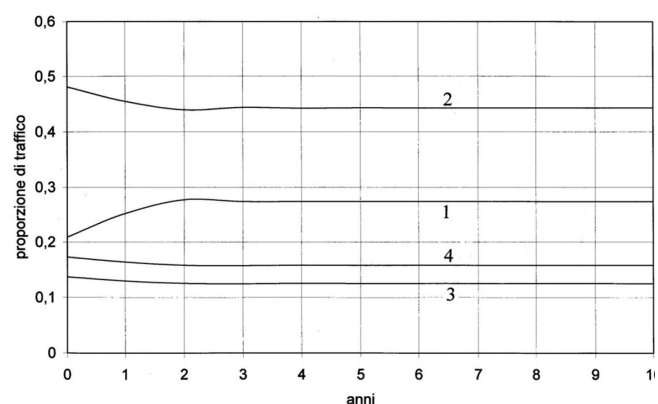


Fig. 11- Andamento delle proporzioni, dopo l'entrata in esercizio della galleria di base, della domanda di trasporto merci attraverso le Alpi orientali relative alla ferrovia del Brennero 1, all'autostrada del Brennero 2, alla ferrovia dei Tauri 3, ed all'autostrada dei Tauri 4.

Fig. 11- Patterns of the proportions of the transport demand across the Eastern Alps relative to the Brenner railway 1, the Brenner motorway 2, the Tauern railway 3 and the Tauern motorway 4, after the entry into operations of the base tunnel.

TABELLA 1 - TABLE 1

Proporzioni della domanda totale e flussi di merci che attraversano le Alpi orientali sui quattro modi di trasporto dopo l'entrata in esercizio della galleria di base del Brennero

*Proportions of the total demand and freight flows that cross the Eastern Alps on the four transport modes after the entry into operations of the base tunnel*

Modi di Trasporto Ways of transport	Proporzioni Proportions		Flussi (milioni di t/anno) Flows (millions of t/year)	
	Iniziali Initials	Asintotici Asymptotic	Iniziali Initials	Asintotici Asymptotic
Ferrovia Brennero Brenner Railway	0.209	0.274	13.58	17.79
Autostrada Brennero Brenner Motorway	0.481	0.443	31.25	28.79
Ferrovia Tauri Tauri Railway	0.137	0.125	8.93	8.14
Autostrada Tauri Tauri Motorway	0.173	0.158	11.24	10.27

5. L'effetto del quadruplicamento dell'intera linea ferroviaria Verona-Monaco sulla ripartizione della domanda fra i quattro modi di trasporto

I risultati finora ottenuti hanno mostrato che gli effetti della galleria di base del Brennero si esplicano, e in misura confrontabile, su tutti i quattro sistemi di trasporto delle Alpi orientali, il che evidenzia il ruolo centrale che la ferrovia del Brennero svolge sul trasporto delle merci attraverso questo arco alpino, dovuto essenzialmente alla posizione geografica del tracciato ferroviario rispetto alla distribuzione nei territori dei punti di origine e destinazione della domanda. Si può prevedere che l'aumento di capacità che deriverà in futuro dal quadruplicamento della intera linea ferroviaria Verona-Monaco di Baviera, e dalla adozione di sistemi di controllo avanzati, potrà determinare un sostanziale trasferimento della domanda di trasporto delle merci attraverso le Alpi orientali dalla strada alla ferrovia, attribuendo all'asse ferroviario del Brennero nelle Alpi orientali un ruolo analogo a quello svolto dal sistema ferroviario del Gottardo-Sempione nell'arco occidentali delle Alpi.

RFI [14] prevede che il numero minimo di tracce orario sulla nuova linea ferroviaria Verona-Monaco sia uguale a 273, e si otterrà lungo la galleria di base. Esso è alquanto inferiore al numero di tracce disponibili nei tratti in pianura della ferrovia, probabilmente a causa delle pendenze in galleria, che limitano la velocità dei treni causando un aumento della distanza temporale fra di essi. Supponendo che i treni regionali percorreranno la linea esistente, se attribuiamo 23 tracce della nuova linea ai treni passeggeri a lunga percorrenza - attualmente sono 11 - restano 250 tracce disponibili per i treni merci, valore leggermente superiore a quello di 230 calcolato per la ferro-

equal to 3.2% for the Brenner motorway, to 1.2% for the Tauern railway and to 1.5% for the Tauern motorway. As a consequence the freight flow increases of 28.06% on the Brenner railway compared to the initial value, while the percents of flow decreases compared to the initial values are 6.66% for the Brenner motorway, 8.73% for the Tauern railway and 8.45% for the Tauern motorway.

5. The effect of the four track update of the all the Verona-Munich railway on the split of demand between the four transport modes

The results obtained so far show that the effects of the Brenner base tunnel take place, in a comparable way, on all the four transport modes of the Eastern Alps: this fact highlights the central role played by the Brenner railway in the freight transport across this alpine region, which is due essentially to the geographical position of the railway with respect to the distribution of the origins and destinations of demand in the territories north and south of the Eastern Alps. We can expect that the increase in capacity, caused in the future by the four track update of the all the Verona-Munich railway and by the introduction of advanced control systems, will cause a substantial shift of the freight transport demand across the Eastern Alps from road to railway, attributing to the Brenner railway a role similar to that played by the Gotthard-Simplon rail transport system in the Western Alps.

RFI [14] expects a minimum number of 273 paths for the new Verona-Munich railway, which will take place in the base tunnel. This number is rather less than the number of paths available in the flat stretches of the railway, probably because of the gradients in the tunnel, which reduce the speed of the trains causing an increase in the time gap between them. Supposing that the regional trains will travel the existing railway, if we assign 23 daily paths of the new railway to the long-distance trains, whose current daily number is 11, we have 250 paths available for the freight trains, value a little greater than that of 230 computed for the Gotthard railway [12]. Thus the railway can be travelled by 250 freight trains per day, whose payload is equal, as said above, to 800 t, to which a daily transport capacity of the railway equal to  $250 \cdot 800 = 200000$  tons corresponds, with a ratio  $200000/60000 = 3.33$  with respect to the current value of the capacity. In order to obtain an estimate, also only roughly approximate, of the split of the transport demand across the Eastern Alps between the four transport modes, we have repeated - with this new capacity value - the computation of the modal split carried out previously.



via del Gottardo [12]. La ferrovia potrà quindi essere percorsa giornalmente da 250 treni merci, la cui portata utile è uguale, come si è visto, a 800 t, a cui corrisponde una capacità di trasporto della ferrovia uguale a  $250 \cdot 800 = 200000$  t/giorno, con un rapporto  $200000/60000 = 3.33$  rispetto all'attuale valore della capacità. Allo scopo di ottenere una stima, anche soltanto grossolanamente approssimativa, della ripartizione della domanda attraverso l'arco alpino orientale fra i quattro modi di trasporto prodotta dalla nuova ferrovia, si è ripetuto con questo nuovo valore della capacità il calcolo della ripartizione modale precedentemente eseguito.

I coefficienti della funzione di costo  $c_1(X_1^t T^t)$  della ferrovia del Brennero modificata in seguito a questo aumento di capacità sono, con i simboli introdotti precedentemente,  $\hat{b}_{1,2} = b_{1,2}/3.33 = 0.702/3.33 = 0.211$  e  $\hat{b}_{1,3} = b_{1,3}/3.33^2 = 0.021/3.33^2 = 0.0019$ , per cui l'espressione della nuova funzione di costo della ferrovia del Brennero è:

$$c_1(X_1^t T^t) = 1.835 + 0.211X_1^t T^t + 0.0019(X_1^t T^t)^2 \quad (9)$$

Introducendo le funzioni di costo (7) nella (2), dopo aver sostituito la prima delle (7) con la (9), e ponendo  $\beta = 0.055$  nella (3), quest'ultima fornisce le stime, dopo il quadruplicamento della ferrovia Verona-Monaco, della evoluzione nel tempo delle frazioni  $X_i^t$  di  $T^t$  che usano i quattro modi di trasporto, partendo dai valori iniziali  $X_i^0$  e  $T^0$  di  $X_i^t$  di  $T^t$ . Ritenendo che il quadruplicamento della ferrovia Verona-Monaco sarà completato diversi anni dopo l'entrata in esercizio della galleria di base del Brennero, si pone al solito  $T^0 = 65$  e si attribuiscono a  $X_i^0$  i valori asintotici riportati nella Tab. 1:  $X_1^0 = 0.274$ ,  $X_2^0 = 0.443$ ,  $X_3^0 = 0.125$ ,  $X_4^0 = 0.158$ . Inoltre si suppone che la domanda conservi dopo l'anno zero il valore  $T^0 = 65$ , che è il valore asintotico che si osserva nella fig. 7.

Le traiettorie così ottenute sono riportate nella fig. 12, a partire dall'anno zero in cui sarà completato il quadruplicamento della ferrovia Verona-Monaco. Esse mostrano che la proporzione di domanda di trasporto delle merci sulla ferrovia del Brennero aumenta considerevolmente rispetto a quella della fig. 11, superando, anche se di poco, la proporzione sulla autostrada del Brennero, la quale diminuisce in modo altrettanto considerevole, accompagnata da analoghe diminuzioni, anche se minori, sugli altri due modi di trasporto. Come si è detto, queste traiettorie sono stime solo grossolanamente approssimative, date le notevoli incertezze che accompagnano i tempi lunghi necessari per il completamento della nuova ferrovia Verona-Monaco. Tuttavia sono utili per rimarcare il ruolo centrale del sistema ferroviario del Brennero nel trasporto delle merci attraverso l'arco alpino orientale.

## 6. Conclusioni

Questo articolo ha studiato gli effetti che l'entrata in esercizio della galleria di base del Brennero avrà sul traffico delle merci attraverso l'arco orientale delle Alpi, e in

The coefficients of the cost function  $c_1(X_1^t T^t)$  of the Brenner railway modified as a consequence of this increase in capacity are, with the symbols introduced previously,  $\hat{b}_{1,2} = b_{1,2}/3.33 = 0.702/3.33 = 0.211$  e  $\hat{b}_{1,3} = b_{1,3}/3.33^2 = 0.021/3.33^2 = 0.0019$ , so that the expression of the new cost function of the Brenner railway is:

$$c_1(X_1^t T^t) = 1.835 + 0.211X_1^t T^t + 0.0019(X_1^t T^t)^2 \quad (9)$$

Introducing cost functions (7) into Eq (2), after replacing the first of functions (7) with function (9), and putting  $\beta = 0.055$  in the Eq (3), the iterated application of the latter furnishes the estimates, after the four track update of the Verona-Munich railway, of the evolution over time of the fractions  $X_i^t$  of  $T^t$  that use the four transport modes, starting from the initial values  $X_i^0$  and  $T^0$  of  $X_i^t$  and  $T^t$ . Believing that the four track update of Verona-Munich railway will be completed many years after the entry into operations of the Brenner base tunnel, we put as usual  $T^0 = 65$  and we attribute to  $X_i^0$  the asymptotic values of table 1:  $X_1^0 = 0.274$ ,  $X_2^0 = 0.443$ ,  $X_3^0 = 0.125$ ,  $X_4^0 = 0.158$ . Moreover we suppose that the demand keeps after the year zero the value  $T^0 = 65$ , which is the asymptotic value shown in fig. 7.

The trajectories so obtained are shown in fig. 12, starting from the year zero in which the four track update will be completed. They show that the proportion of freight transport demand on the Brenner railway increases substantially with respect to that of fig. 11, exceeding, even if a little, the proportion on the Brenner motorway, which decreases in an equally significant way, accompanied by similar decreases, even if less, on the other transport modes. As said, these trajectories are only rough estimates, given the many uncertainties that accompany the long times needed to complete the new Verona-Munich railway. However they are useful to

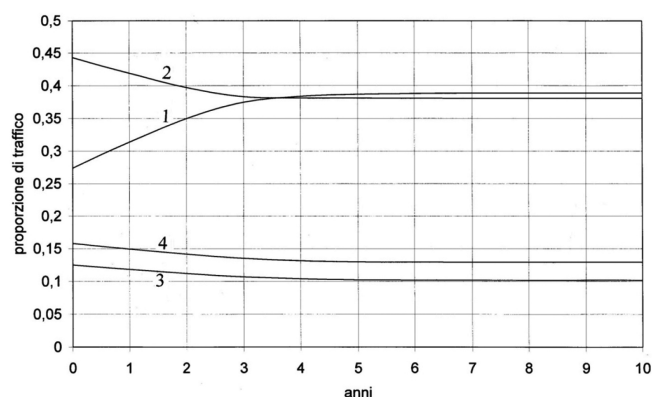


Fig. 12 - Andamento delle proporzioni, dopo il completamento della ferrovia Verona-Monaco, della domanda di trasporto merci attraverso le Alpi orientali relative alla ferrovia del Brennero 1, all'autostrada del Brennero 2, alla ferrovia dei Tauri 3, ed all'autostrada dei Tauri 4.

Fig. 12 - Pattern of the proportions of the transport demand across the Eastern Alps relative to the Brenner railway 1, the Brenner motorway 2, the Tauern railway 3 and the Tauern railway 4 after the completion of the Verona-Munich railway.

particolare sulla ripartizione della domanda fra i quattro modi di trasporto delle merci che collegano i due territori a Sud e a Nord delle Alpi orientali: i modi stradali e ferroviari del Brennero e quelli dei Tauri. Lo studio è stato condotto nell'ipotesi che la domanda conservi nel prossimo futuro il valore attuale, tenendo conto del fatto che esso si è mantenuto mediamente costante negli ultimi anni, e tenendo altresì presenti le attuali condizioni generali dell'economia. Si è inoltre supposto che gli effetti della galleria di base siano dovuti all'aumento di capacità di trasporto merci della ferrovia del Brennero la quale - come conseguenza della drastica diminuzione delle pendenze - sarà percorsa da treni trainati da un unico locomotore e di maggiore portata utile, il cui numero giornaliero aumenterà a seguito della liberazione delle tracce orario attualmente impegnate dai locomotori addizionali in fase di ritorno. Il calcolo delle futura capacità della ferrovia è stato svolto supponendo che il numero di tracce disponibili dopo l'entrata in esercizio della galleria di base rimanga quello attuale, perché vincolato dalle caratteristiche geometriche e di esercizio dei tratti della linea ferroviaria a monte e a valle della galleria. Pur con questa limitazione questo studio ha calcolato che la nuova galleria di base darà luogo ad un aumento della capacità della ferrovia pari al 55% del valore attuale e ad un aumento del 31% del flusso di merci che la utilizzano.

La capacità della ferrovia aumenterà in misura molto maggiore quando sarà completato il quadruplicamento della intera ferrovia Verona-Monaco, a seguito dell'aumento delle tracce orario disponibili. Si può prevedere, anche se in modo solo grossolanamente approssimativo date le notevoli incertezze che accompagnano i tempi lunghi necessari per il completamento della ferrovia, che la proporzione di traffico che utilizzerà la ferrovia supererà, anche se di poco, quella sull'autostrada del Brennero.

Occorre però considerare che la linea ferroviaria è solo uno degli elementi che compongono il sistema di trasporto ferroviario delle merci. Un altro elemento essenziale è costituito dai centri intermodali che alimentano il trasporto delle merci sulla linea ferroviaria. La capacità di un sistema di trasporto ferroviario delle merci è uguale al minimo fra i valori di capacità degli elementi che lo compongono. Pertanto un aumento di capacità di una linea ferroviaria, affinché non sia inutile, deve essere accompagnato da un aumento della capacità di movimentazione delle merci dei centri intermodali, se inferiore a quella della ferrovia, tale da rendere omogenei i valori di capacità di tutti gli elementi del sistema di trasporto. Ciò significa che i valori di ripartizione modale successivi all'entrata in esercizio della galleria di base del Brennero calcolati in questo articolo sono vincolati dalla condizione che la capacità dei centri intermodali che alimentano la linea ferroviaria si adegui alla nuova capacità di quest'ultima.

*highlight the central role of the Brenner transport system in the freight transport across the Eastern Alps.*

### 6. Conclusions

*This paper has studied the effects that the entry into operations of the Brenner base tunnel will have on the freight traffic across the Eastern Alps, particularly on the split of the demand between the four transport modes that connect the territories south and north of the Eastern Alps: the road and rail modes of Brenner and those of Tauern. The study has been carried out under the hypothesis that the transport demand will maintain in the future the present value, considering that it has been constant on the average in the last years, and taking account of the current general economic conditions as well. Moreover we have supposed that the effects of the base tunnel are due to the increase in the freight transport capacity of the Brenner railway, which - as a consequence of the substantial decrease in gradients - will be travelled by freight trains of greater payload and pulled by only one engine, whose daily number will increase because the paths currently used by the additional engines in the return phase will become available. The computation of the future capacity of the railway has been carried out supposing that the number of paths available after the entry into operations of the base tunnel remains the current one, since it is bounded by the geometric and operational characteristics of the stretches upstream and downstream of the tunnel. This study has computed that, also with these limits, the new base tunnel will give rise to an increase in the railway capacity equal to 55% of the present value and to an increase of 31% in the freight flow using the railway.*

*The capacity of the railway will increase to a much greater extent when the four track update of the Verona-Munich railway will be completed, as a consequence of the increase in the available paths. We can forecast, even if in a very roughly approximate way, given the many uncertainties that accompany the long times needed to complete the railway, that the proportion of freight traffic that will use the railway will exceed, even if only a little, that on the Brenner motorway.*

*However we should consider that a railway is only one among the various components of the rail transport system. Another essential component is represented by the intermodal centres that feed the freight transport on the railway. The capacity of a rail freight transport system is equal to the minimum of the capacity values of its components. Thus an increase in capacity of a railway, so that it is not for nothing, should be accompanied by an increase in the handling capacity of the intermodal centres, if it is less than that of the railway, in order to make homogeneous the capacity values of all the components of the transport system. This means that the values of modal split after the entry into operations of the Brenner base tunnel computed in this paper are bounded by the condition that the overall capacity of the intermodal centres that feed the railway conforms to the capacity of the latter.*

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ALPINFO (1994-014) *Traffico merci attraverso le Alpi*.
- [2] Autostrada del Brennero S.p.A. *Ordinanza 50/2007*.
- [3] BBT, *La galleria di base del Brennero - Un nuovo collegamento attraverso le Alpi*.
- [4] BBT – GEIE, *Galleria di base del Brennero. Quadro di riferimento programmatico*.
- [5] BBT - GEIE (2002), *Galleria di base del Brennero. Studio preliminare. Simulazione di esercizio*.
- [6] CROCE S. (2006), *Dalla domanda al catalogo, Argomenti*.
- [7] FERRARI P. (2014), *The dynamics of modal split for freight transport*, Transp. Res. E 70, 163-176.
- [8] FERRARI P. (2015), *Dynamic cost functions and freight modal split evolution*, Transp. Res. E 77, 115-134.
- [9] GRIMALDI R. (2012), *La galleria di base del Brennero: considerazioni su costi e benefici*, in AAVV, *C'è luce in fondo al tunnel? Analisi e spunti sulle politiche infrastrutturali alpine*, Maggioli Editore.
- [10] JANIC M. (2007), *Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network*, Transp. Res. D 12, 33-44.
- [11] NoTav Brennero (2015), *La capacità potenziale di trasporto della ferrovia storica del Brennero*, [www.notavbrennero.info](http://www.notavbrennero.info).
- [12] Osservatorio Val di Susa (2007), *Capacità dell'attuale valico ferroviario del San Gottardo*, Quaderno n. 1 dell'Osservatorio Val di Susa, 145-148.
- [13] POLIANDRI G., CAMPEDELLI C. (2008), *No alla nuova linea ferroviaria ad alta velocità e alta capacità Brennero-Verona*.
- [14] RFI, *Capacità della ferrovia Verona-Monaco*, [www.ferroviabrennero.tn.it](http://www.ferroviabrennero.tn.it).
- [15] ZURLO R. (2014), *Galleria di base del Brennero*, BBT.
- [16] ZURLO R. (2016), *Il corridoio Scandinavia-Mediterraneo. Il collegamento Austria-Italia*.

### IL SEGNALAMENTO DI MANOVRA NELLA IMPIANTISTICA FS STANDARD FUNZIONALI E APPLICAZIONE CONVENZIONALE

Con questo volume il CIFI intende colmare la lacuna relativa alla mancanza nella letteratura di testi sul segnalamento di manovra, spesso considerato complementare al segnalamento “alto” pur non essendo meno importante.

Questo primo volume sugli apparati convenzionali, insieme al secondo in preparazione sugli apparati statici, è indirizzato ai progettisti del segnalamento e ai cultori di impianti ferroviari che vi troveranno una completa “biblioteca” storica e tecnica in materia, per il numero e l'eshaustività degli argomenti trattati.

Contenuti del libro: standard del segnalamento di manovra; la logica circuitale; piani schematici di riferimento; tabelle delle condizioni; circuiti elettrici; condizioni operative.

296 pagine in formato A4, ricco di schemi e circuiti. Prezzo di copertina € 30,00. Per sconti, spese di spedizione e modalità di acquisto consultare la pagina “Elenco di tutte le pubblicazioni CIFI” sempre presente nella Rivista.

