



## Transizione all'ERTMS per le linee a traffico intenso: metodologie di indagine e applicazione al caso di studio della Citybanan di Stoccolma

### *Migration to ERTMS for dense traffic lines: investigation methodologies and application to the Stockholm Citybanan case study*

Vahid RANJBAR<sup>(\*)</sup>  
Stefano RICCI<sup>(\*\*)</sup>

**Sommario** - La capacità dell'infrastruttura ferroviaria dipende da diversi fattori. Tra questi, i sistemi di segnalamento e controllo (CCS) mirano a fornire un funzionamento migliore pur mantenendo prestazioni di sicurezza costanti. Questo studio intende esaminare gli effetti del livello 3 dell'ERTMS sulla capacità a confronto con il livello 2 dell'ERTMS e al sistema di segnalamento svedese ATC2. Lo studio comprende una valutazione comparativa basata su strumenti di simulazione microscopica riconosciuti e su metodi analitici adattati allo scopo specifico. Il caso di studio selezionato è il *Southbound* della linea suburbana di Stoccolma (Citybanan) analizzato nel periodo di punta e in varie configurazioni di orario. I risultati dello studio illustrano quantitativamente l'aumento di capacità ottenibile con il livello 3 dell'ERTMS.

#### 1. Introduzione

La crescente domanda di trasporto e il passaggio dalla strada alla ferrovia causano la congestione dell'infrastruttura ferroviaria e una peggiore qualità del servizio. Per ridurre la congestione e migliorare la capacità esistono soluzioni, come la progettazione e la costruzione di nuove infrastrutture o il potenziamento di quelle esistenti, che sono dispendiose in termini economici e di tempo. Pertanto, è necessario gestire la capacità dell'infrastruttura in modo efficiente, permettendo ai treni di viaggiare con un minor distanziamento temporale. In questo contesto è evidente l'importanza dei sistemi di segnalamento e controllo (CCS) e il loro ruolo nell'offrire un servizio con ridotto distanziamento temporale.

**Summary** - Capacity of infrastructure in Railway depends on several factors, between them Control Command and Signalling (CCS) systems aim at providing improved operation by keeping constant safety performances. This study intends to investigate the effects of ERTMS Level 3 on capacity in comparison to ERTMS Level 2 and Swedish signalling system ATC2. The study includes a comparative evaluation based on both recognized microscopic simulation tools and analytical methods, adapted for the specific purposes. The selected case study is the *Southbound* of city line in Stockholm (Citybanan) in the peak period under various timetable configurations. The study findings illustrate quantitatively the increase of capacity achievable by ERTMS Level 3.

#### 1. Introduction

The increasing demand for transport and the shift from road to rail cause the congestion in railway infrastructure, with low quality of service. To reduce congestion and enhance the infrastructure capacity some solutions, such as planning and constructing of new infrastructures or upgrading the existing ones, are costly and time consuming. Therefore, it is necessary to manage capacity of infrastructure in efficient way by enabling trains to run with shorter headway. In this context, the importance of Control Command and Signalling (CCS) systems and their role to provide a service with short headway is clear.

This study quantitatively demonstrates the effectiveness of the European Railway Traffic Management System / European Train Control System Level 3 Full Moving

<sup>(\*)</sup> KTH Royal Institute of Technology, Department of Transport Science, Stockholm.

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza Università di Roma, Dipartimento di ingegneria civile, edile e ambientale.

<sup>(\*)</sup> KTH Royal Institute of Technology, Department of Transport Science, Stockholm.

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza University of Rome, Department of Civil, Building and Environmental Engineering.

Questo studio dimostra quantitativamente l'efficacia dell'ERTMS/ETCS L3 FMB. Per realizzare lo scopo, lo studio personalizza in modo originale per la specifica applicazione due metodi ampiamente riconosciuti: 1) metodo UIC 406, considerando sequenze di tempi di blocco e relative variabili per ogni configurazione CCS, 2) dati estratti dal simulatore RailSys (distanziamento temporale minimo) per calcolare il Consumo di Capacità (CC) applicando il metodo di compressione. Il caso di studio selezionato è stato il *Southbound* della linea suburbana di Stoccolma (Citybanan) nei periodi di punta.

Si tratta di una linea a doppio binario dedicata al traffico suburbano omogeneo. I risultati confermano che l'ERTMS/ETCS L3 FMB fornisce un distanziamento temporale più breve rispetto ad altri sistemi di segnalamento basati sulla tecnologia a blocco fisso. In questo contesto operativo, la posizione dei punti di indicazione e le curve di frenatura incidono in modo significativo sulla capacità dell'infrastruttura.

## 2. Obiettivi e metodologia

### 2.1. Impostazione del problema

Gli obiettivi di ricerca derivano dalla necessità generalizzata di sostituire i sistemi di segnalamento tradizionali con nuovi sistemi in grado di aumentare capacità, affidabilità e sicurezza senza aumentare i costi. Questa necessità interessa la maggior parte delle reti ferroviarie del mondo perché la vita utile dei sistemi di segnalamento moderni di prima generazione, risalenti agli anni '70 e '80, sta raggiungendo la sua fine. In particolare, le situazioni svedesi, molto simili ad altri contesti europei, sono le seguenti:

- il sistema di segnalamento e controllo ATC2 tradizionale in uso ha raggiunto la fine della sua vita di servizio;
- la rete è quasi saturata;
- la costruzione di nuove infrastrutture è costosa; pertanto, l'utilizzo di un sistema di segnalamento efficace per una migliore gestione della capacità disponibile sembra essere la soluzione migliore.

In questo contesto, per valutare la fattibilità degli investimenti in nuovi sistemi di segnalamento e potenziali miglioramenti, il presente studio mira a valutare l'influenza dell'ERTMS/ETCS L3 sulla capacità e a rispondere ai seguenti quesiti di ricerca:

- Quanto è efficace l'ERTMS/ETCS L2 e L3 rispetto all'ATC2 in termini di capacità?
- Quali fattori restrittivi influenzano la capacità?

### 2.2. Approccio metodologico

La capacità dipende da diversi fattori, quali il sistema di segnalamento implementato, il margine di sicurezza

*Block (ERTMS/ETCS L3 FMB). To accomplish the purposes, the study originally customize for the specific application two widely recognized methods: 1) UIC Code 406 analytical method, considering blocking time sequences and related variables for each CCS configuration, 2) Data extracted from RailSys simulation tool (minimum headway) to calculate Capacity Consumption (CC) applying the compression method. The selected case study was the Southbound of city line in Stockholm (Citybanan) in peak periods. This is a double track line dedicated to suburban homogeneous traffic. The results confirm that ERTMS/ETCS L3 FMB provide with shorter headway compared to other signalling systems based on fixed block technology. In this operational context, the location of indication points and braking curves significantly affect the infrastructure's capacity.*

## 2. Objectives and methodology

### 2.1. Problem position

*The research objectives derive by the generalized need to replace current legacy signalling systems with new systems capable to increase capacity, reliability and safety without increasing costs. This need interests the majority of the railway networks in the world because the service life of first generation modern signalling systems, dating 70s and 80s is widely reaching its end. In particular, the Swedish circumstances, very similar to other European contexts, are the following:*

- *the legacy control command and signalling system ATC2 in use has reached the end of its service life;*
- *the network is just about saturation;*
- *construction of new infrastructure is expensive; therefore, using an effective signalling system for a better management of the available capacity seems to be the best solution.*

*In this context, to evaluate the justifiability of investments on new signalling system and potential improvements, the present study aims at evaluating the influence of ERTMS/ETCS L3 on capacity and answer the following research questions:*

- *How much effective are ERTMS/ETCS L2 and L3 in comparison with ATC2 in terms of capacity?*
- *What restrictive factors affect the capacity?*

### 2.2. Methodological approach

*The capacity depends on several factors, such as implemented signalling system and required safety margin and overlaps, infrastructure layout, topology, block sections length and blocking time, crossing setting and release time, stations characteristics, operational characteristics and traffic management strategies, timetabling and rolling stock.*

richiesto, le sovrapposizioni, la configurazione dell'infrastruttura, la topologia, la lunghezza e il tempo di blocco delle sezioni di blocco, la formazione e il tempo di rilascio degli itinerari, le caratteristiche delle stazioni, le strategie operative e di gestione del traffico, l'orario e il materiale rotabile.

Pertanto, la valutazione della capacità è un concetto complesso. Inoltre, a seconda degli obiettivi dello studio, esistono diversi approcci per valutare la capacità:

- locale, con condizioni e ipotesi esplicite per uno scenario vincolato noto;
- generale, per linee o reti, mediante valutazione preliminare di livello superiore con ipotesi semplificate.

L'Unione internazionale delle ferrovie (UIC), al fine di standardizzare la valutazione della capacità, ha introdotto il metodo di compressione.

In questo articolo, al fine di valutare l'efficienza dell'ERTMS/ETCS L3 FMB e L2 rispetto al sistema CCS ATC2 preesistente, lo studio si affida all'applicazione comparativa di due metodi: il metodo di compressione UIC e la simulazione RailSys.

L'applicazione si basa sull'orario 2020 (T20) durante un periodo di punta mattutino (6:00-8:00) assumendo scenari diversi. Il confine dell'infrastruttura comprende aree importanti, con un'elevata domanda di traffico da Älvsjö a Solna (in direzione nord), inclusa la linea suburbana interessata soprattutto da traffico pendolare (Pendeltåg) di Stoccolma.

Dopo aver esaminato il consumo di capacità con i metodi citati e diverse configurazioni CCS, i risultati mostrano riferimenti specifici e possibili cause delle difformità.

Dopo aver fissato le caratteristiche principali dei sistemi di segnalamento e frenatura, maggiori dettagli, all'interno della metodologia globale, saranno oggetto della sezione 6.

## 3. Panoramica sull'ERTMS/ETCS

### 3.1. Finalità e livelli operativi

Nel corso degli anni, ogni paese ha sviluppato il proprio sistema di segnalamento cosicché attualmente in Europa sono in funzione più di 20 sistemi di segnalamento incompatibili. Per sostenere la compatibilità e garantire un funzionamento interoperabile ed efficiente dei treni, in particolare lungo le principali linee ferroviarie europee, l'Unione europea ha deciso di introdurre il sistema europeo di gestione del traffico ferroviario (ERTMS) e ha chiesto ai paesi di attuarlo. L'ERTMS/ETCS è costituito da:

- livello 0, che consente ai treni muniti di ERTMS/ETCS di circolare lungo la zona non attrezzata (ERTMS/ETCS non implementato o fuori servizio);
- tre livelli principali (L1-L2-L3);

*Therefore, the evaluation of capacity is a complex concept. In addition, depending on the objectives of the study, there are different approaches to evaluate capacity:*

- *local, with explicit condition and assumptions for a known scenario with limiting factors;*
- *general, for lines or networks, by higher-level preliminary evaluation with simplified assumptions.*

*The international Union of Railways (UIC), in order to standardise the evaluation of the capacity, has introduced the compression method.*

*In this paper, in order to evaluate the efficiency of ERTMS/ETCS L3 FMB and L2 over legacy CCS system ATC2, the study bases on the comparative application of two methods: the UIC compression method and the RailSys simulation.*

*The application bases on the 2020 timetable (T20) during a morning peak period (6:00-8:00) assuming different scenarios. The infrastructure boundary includes important areas, with high traffic demand from Älvsjö to Solna (Northbound) including the City Line Stockholm's commuter rail (Stockholm's Pendeltåg).*

*After investigating the capacity consumption with two different mentioned methods and different CCS configurations, the results show specific references and possible diversities reasons.*

*After the fixation of the key features of signalling and braking systems, more details, within a global methodology overview, are the focus of Section 6.*

## 3. ERTMS/ETCS overview

### 3.1. Purposes and operational levels

*Over the years, each country developed its own signalling system, so that currently in Europe more than 20 incompatible signalling systems are in operation. To support compatibility and provide an interoperable and efficient operation of trains, especially along the European railway main lines, the European Union decided to introduce European Railway Traffic Management System (ERTMS) and requested countries implement it. The ERTMS/ETCS consist of:*

- *level 0, which allows trains equipped with ERTMS/ETCS running along the unfitted area (ERTMS/ETCS not implemented or out of service);*
- *three main Levels (L1-L2-L3);*
- *national Train Control (NTC) Level, which allows train fitted with ERTMS/ETCS using Specific Transmission Module (STM) running along the national system area.*

### 3.2. ERTMS Level 1

*ERTMS/ETCS L1 is a spot cab signalling system with continuous speed supervision to protect train against over-*

- livello di controllo nazionale dei treni (NTC), che consente ai treni dotati di ERTMS/ETCS di utilizzare il modulo di trasmissione specifico (STM) circolando nel sistema nazionale.

## 3.2. ERTMS Livello 1

L'ERTMS/ETCS L1 è un sistema di segnalamento in cabina spot con supervisione continua della velocità per proteggere il treno da velocità eccessive. Le *Balise* commutabili sono collocate prima dei segnali principali e hanno la responsabilità di trasmettere l'Autorizzazione al Movimento generata attraverso apparecchiature *wayside* e tradotta tramite l'Unità Elettronica di Linea (LEU). L'alimentazione delle *Balise* e lo scambio di dati avviene quando il treno passa sopra di esse. L'unità-antenna posta sotto il treno energizza il *Balise* Transmission Module (BTM). I circuiti di binario e i conta-assi rilevano la libertà dei binari o la presenza di treni all'interno delle sezioni di blocco (Fig. 1).

## 3.3. ERTMS Livello 2

Il livello 2 dell'ERTMS/ETCS è un sistema CCS radio che fornisce una comunicazione bidirezionale continua tra il binario e il treno. Sia L1 che L2 si basano sulla tecnologia tradizionale a blocco fisso, con linea divisa in sezioni di blocco. Un segnale principale protegge ogni sezione di blocco, dove solo un treno alla volta può circolare. Il conta-assi e il circuito di binario sono i componenti principali dei sistemi convenzionali di localizzazione dei treni a terra (TTD), responsabili della verifica della libertà e dell'occupazione dei binari (Fig. 2).

## 3.4. ERTMS Livello 3

L'ERTMS/ETCS L3 utilizza un sistema di comunicazione via radio come l'L2, con la principale differenza che il *Train Integrity Monitoring* (TIM) è disponibile grazie a dispositivi installati sul treno, che possono funzionare senza TTD convenzionali (conta-assi e circuito di binario). Pertanto, solo i treni dotati di ERTMS/ETCS L3 possono beneficiare della tecnologia FMB, con un'implementazione minima delle apparecchiature di terra.

*speed. The switchable Balises are located prior of the main signals and have responsibility of transmitting the Movement Authority generated through wayside equipment and translated via the Line Electronic Unit (LEU). The energisation of Balises and the exchange of data with it, occur when train passes over it. The antenna unit located under the train energizes the Balise Transmission Module (BTM). Track circuits and axle counters detect the track vacancy and the presence of trains in block sections (Fig. 1).*

## 3.3. ERTMS Level 2

*ERTMS/ETCS level 2 is a radio-based CCS that provides a continuous bidirectional communication between trackside and train. Both L1 and L2 base on conventional fixed block technology, with line split into block sections. One main signal protects each block section, where just one train at a time can run. The axle counter and the track circuit are the main components of conventional Trackside Train Detection (TTD) systems, responsible of proving track vacancy and occupancy (Fig. 2).*

## 3.4. ERTMS Level 3

*ERTMS/ETCS L3 is also using a radio-based communication system, like L2, with the main difference that the Train Integrity Monitoring (TIM) is available thanks to devices installed on the train, which can operate without conventional TTD (axle counter and track circuit). Therefore, just trains equipped with ERTMS/ETCS L3 can benefit from FMB technology, with a minimum implementation of trackside equipment. This reduces deployment and maintenance costs and provide with shorter headways and higher capacity when all trains along the line are equipped with TIM device and continuous radio connection. Due to the challenging pre-conditions, TIMS, positioning and equipped rolling stock, ERTMS/ETCS L3 is not yet commercially in use on main lines. Nevertheless, there are solutions combining conventional signalling with moving block systems that allows unfitted and fitted trains operating simultaneously on the same line. Obviously, this solution cannot reach the best performances, achievable only with 100% fitted trains. Fig. 3 illustrate a simplified func-*

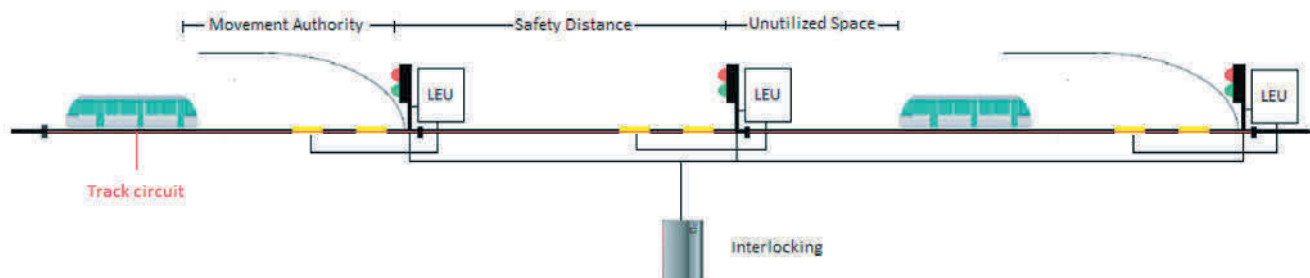


Figura 1 – Panoramica funzionale dell'ERTMS L1 (le sezioni aggiuntive rappresentate sono facoltative) [1].

Figure 1 – ERTMS L1 Functional overview (the additional sections represented is optional) [1].



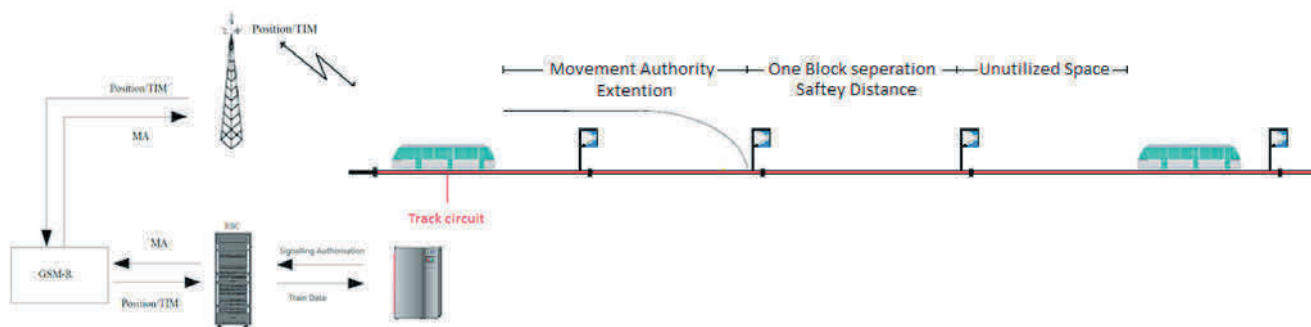


Figura 2 – Panoramica funzionale dell'ERTMS L2 (le sezioni aggiuntive rappresentate sono facoltative) [1].  
 Figure 2 – ERTMS L2 Functional overview (the additional sections represented is optional) [1].

Ciò riduce i costi di installazione e manutenzione e garantisce una maggiore capacità e una riduzione delle linee quando tutti i treni lungo la linea sono dotati di dispositivo TIM e connessione radio continua. A causa delle difficili condizioni preliminari, del TIMS, del posizionamento e del materiale rotabile attrezzato, l'ERTMS/ETCS L3 non è ancora in uso in commercio sulle linee principali. Esistono tuttavia soluzioni che combinano il segnalamento convenzionale con sistemi a blocco mobile che consentono ai treni non accoppiati e montati di circolare simultaneamente sulla stessa linea.

Ovviamente, questa soluzione non può raggiungere le migliori prestazioni, realizzabili solo con treni equipaggiati al 100%. La Fig. 3 illustra una panoramica funzionale semplificata del sistema L3 FMB basata sulla distanza assoluta di frenatura.

*Hybrid Level 3 (HL3)* è un sistema di sovrapposizione, che prevede l'installazione di L3 in combinazione con L2. Questo sistema sfrutta l'installazione limitata del convenzionale *Trackside Train Detection (TTD)* in combinazione con *Virtual Sub Section (VSS)* non cruciale nel sistema a blocchi mobili, ma necessaria per sostenere i principi di L2, riducendo gli impatti sulla configurazione del *Radio Block Center (RBC)*, impostazione del percorso e posizione dei confini dei marcatori.

HL3 è utile per ridurre i costi di manutenzione dell'implementazione e la migrazione graduale verso il pieno L3. Questo sistema in condizioni normali permette a più treni di entrare contemporaneamente in una sezione fisica di blocco (divisa in più VSS). Le prestazioni più elevate sono ottenibili se tutti i treni sono dotati di sistema TIM e circolano sotto l'ERTMS L3 [2][3]. La Fig. 4 mostra la panoramica funzionale (con flusso di dati semplificato) nell'*Hybrid Level 3*.

Inoltre, la Fig. 5 mostra la differenza principale tra L2, che si basa sui circuiti di binario e i conta-assi per la supervisione della presenza e dell'integrità del treno e L3, sfruttando il sistema TIM installato a bordo per monitorare l'integrità del treno.

tional overview of L3 FMB system based on absolute braking distance.

*Hybrid Level 3 (HL3)* is an overlay system, which means installation of L3 in combination with L2. This system exploits limited installation of conventional *Trackside Train Detection (TTD)* in combination with *Virtual Sub Sections (VSS)* not crucial in moving block system but necessary to sustain the principles of L2, reducing impacts on configuration of the *Radio Block Center (RBC)*, route setting and location of marker borders. HL3 is beneficial for reducing the implementation maintenance costs and gradual migration to full L3. This system in normal situation allows more than one train entering in a physical block section (divided into several VSS) at the same time. The highest performance is achievable if all trains are equipped with TIM system and running under ERTMS L3 [2][3]. Fig. 4 shows the Functional Overview (with simplified data flow) in Hybrid Level 3.

Moreover, Fig. 5 shows the main difference between L2, which relies on track circuits and axle counters for supervising the train presence and integrity and L3, exploiting TIM system installed onboard to monitor train integrity.

#### 4. ATC2 overview

ATC2 is almost equivalent to ERTMS/ETCS L1 as described in Tab. 1 and Tab. 2. The main parts of ATC2 on board equipment are vehicle computer, driver panel and transmission system [4]. Moreover, tachometer and recording equipment are included in the onboard equipment. It works through physical and logical interfaces with the driver and the vehicle. It consists of three types of Balises: fixed, switchable and un-coded (markers) [5] with different functionality: Balises transmit fixed data related to the section (allowed speed, gradient, etc.) or variable data (speed, distance, train information and signal aspects) [6]. The encoder translates received information from interlocking to send to the switchable Balises (2 to 5 per each group). The trains are equipped with antenna energized when the train passes over the Balises, when the exchange of data between train and Balise occurs. After the exchange of data, the on-

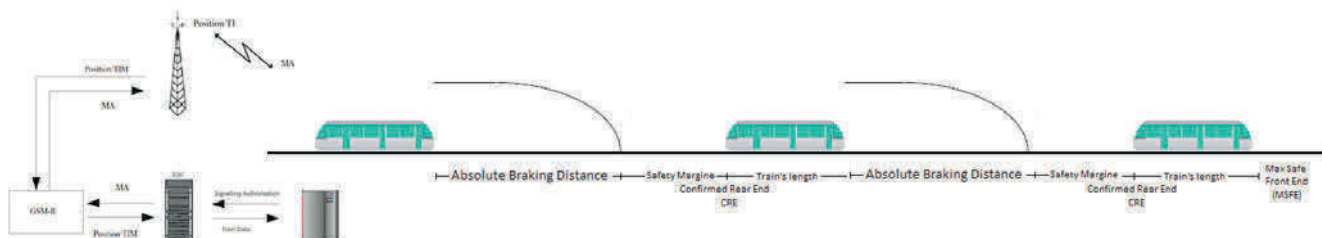


Figura 3 – Sistema ERTMS L3 a blocchi mobili completi.

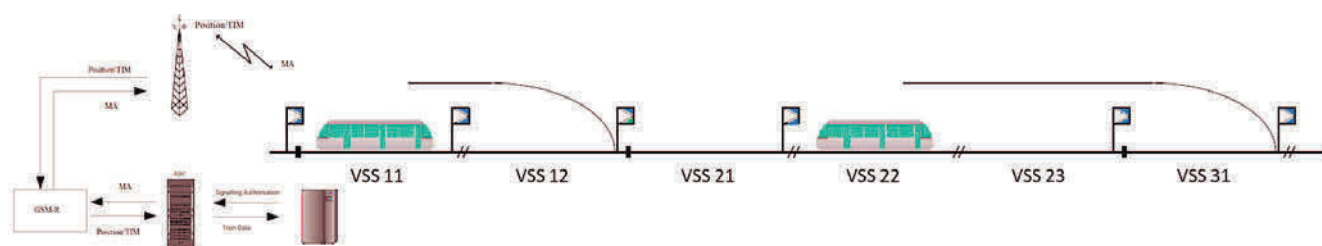
*Figure 3 – ERTMS L3 full moving block system.*

Figura 4 – Hybrid Level 3.

*Figure 4 – Hybrid Level 3.*

#### 4. Panoramica sull'ATC2

L'ATC2 è quasi equivalente all'ERTMS/ETCS L1 come descritto nella Tab. 1 e nella Tab. 2. Le parti principali delle apparecchiature ATC2 di bordo sono il computer del veicolo, il pannello di guida e il sistema di trasmissione [4]. Inoltre, il tachimetro e gli apparecchi di registrazione sono inclusi nell'equipaggiamento di bordo. Funziona attraverso interfacce fisiche e logiche tra il conducente e il veicolo. Si compone di tre tipi di *Balise*: fisse, commutabili e non codificate (marcatori) [5] con diverse funzionalità: le *Balise* trasmettono dati fissi relativi alla sezione (velocità consentita, pendenza, ecc.) o dati variabili (velocità, distanza, informazioni sul treno e aspetti del segnale) [6].

L'encoder traduce le informazioni ricevute dall'apparato centrale per inviarle alle *Balise* commutabili (da 2 a 5 per ogni gruppo). I treni sono dotati di antenna alimentata quando il treno passa sopra le *Balise*, quando avviene lo scambio di dati tra treno e *Balise*. Dopo lo scambio dei dati, il computer di bordo calcola la velocità consentita. In caso di velocità troppo elevate, se il conducente non reagisce all'allarme acustico e imposta la velocità del treno nel tempo, la frenatura sarà automatica per rispettare la velocità di sicurezza. La Fig. 5 mostra la struttura del sistema ATC2 con diverse *Balise* e circuiti di binario a 12 volt in corrente continua per i segnali di terra e come il sistema di segnale si connette ad essi e al computer della locomotiva [7].

In ATC2, la scatola nera conserva i dati fino a 72 ore con telegrammi a velocità di scambio superiore a 2 km/h. La soluzione di blocco radio è in funzione per ATC2.1 e ATC2.2 [4][5]. Nell'ERTMS/ETCS L1, ciascun gruppo può

board computer calculates allowed speed. In case of over-speed if the driver fails to react to the audible alarm and set the trains' speed in time, the braking will be automatic to fulfil the safe speed. Fig. 5 shows the structure of the ATC2 system with different *Balise*s and track circuits 12-volt DC for wayside signals and how the signal system connects to them and on to the locomotive computer [7].

In ATC2, the black box recording unit keeps data until 72 hours with telegrams exchange speed over 2 km/h. The radio block solution is in operation for ATC2.1 and ATC2.2 [4][5]. In ERTMS/ETCS L1, each group may consist of 1 to 8 *Balise*s instead of ATC2 where they are 2 to 5 [4]. In Controllable *Balise*s, the information can change, e.g. for indicating signals aspects and informs about actual speed and distance of trains. Meanwhile, fixed code *Balise*s, used in combination with a Controllable *Balise*, a marker or other fixed code *Balise*s, are in use where the information is always the same, e.g. at stop boards and speed boards, to inform about allowed speed, target distance and slope on the track. The marker is a *Balise*, whose task is to inform about the presence of another *Balise*. The Cursor *Balise* operates with a fixed code *Balise* to ensure the detection of the information point and the determination of the direction. In ATC2, A-*Balise*s send data regarding allowed and target speed, B-*Balise*s update the train about target distance to the next main signal and speed increase point, C-*Balise*s update the trains about target distance and factors that influence the braking distance (especially downhill gradient), P-*Balise*s provide with the extension of target distance and N-*Balise*s interact with onboard warning [5][8]. Fig. 6 and Fig. 7 show the ATC2 keys components and the overview of transmission system operation and track equipment.

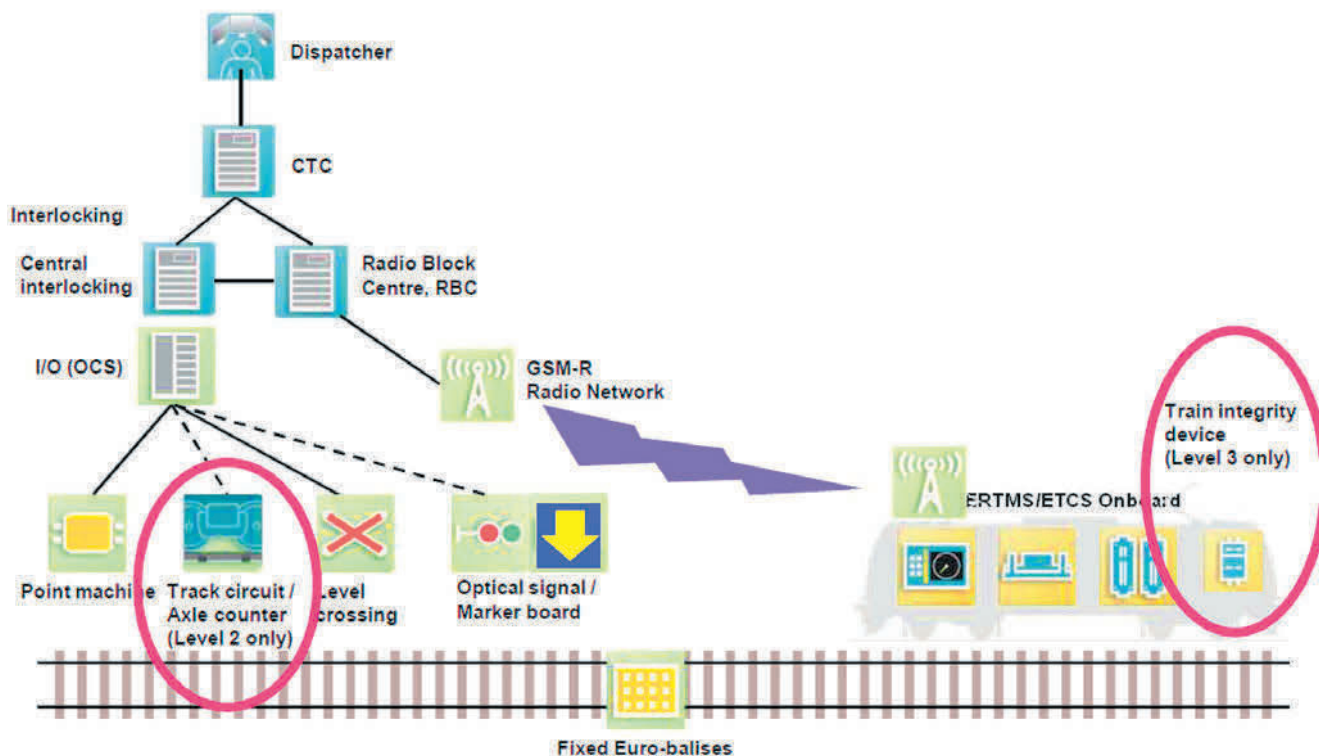


Figura 5 – Differenze tra ERTMS L2 e ERTMS L3 : CTC = Centralized Traffic Control, OCS = One Channel Safe communication.

Figure 5 – Differences between ERTMS L2 and ERTMS L3: CTC = Centralized Traffic Control, OCS = One Channel Safe communication.

essere composto da 1 a 8 *Balise* mentre in ATC2 esse sono da 2 a 5 [4]. Nelle *Balise* controllabili, le informazioni possono cambiare, ad es. per indicare aspetti dei segnali o informare sulla velocità effettiva o sulla distanza dei treni. Nel frattempo, le *Balise* a codice fisso, utilizzate in combinazione con una *Balise* controllabile, un marcatore o altre *Balise* a codice fisso, sono in uso quando le informazioni sono sempre le stesse, ad esempio alle tabelle di stop e di velocità, per informare sulla velocità consentita, sulla distanza dalla meta e sulla pendenza della linea. Il marcatore è una *Balise*, il cui compito è quello di informare sulla presenza di un'altra. Il *Cursor Balise* opera con un codice fisso per garantire il rilevamento del punto informativo e la determinazione della direzione.

In ATC2, le *Balise* A inviano dati relativi alla velocità target consentita, le *Balise* B aggiornano il treno sulla distanza dalla meta al segnale principale successivo e al punto di aumento della velocità, le *Balise* C aggiornano i treni sulla distanza dalla meta e sui fattori che influenzano la distanza di frenata (in particolare la pendenza in discesa), le *Balise* P forniscono l'estensione della distanza dalla meta e le *Balise* N interagiscono con le spie di bordo [5][8]. La Fig. 6 e Fig. 7 mostrano i componenti chiave dell'ATC2 e la panoramica sul funzionamento del sistema di trasmissione e delle apparecchiature di binario.

## 5. Braking curves

### 5.1. Role of braking on capacity

*Braking curve is one the key factors that significantly influences the capacity of the line. Moreover, several factors, such as rolling stock, infrastructure characteristics and signalling system have an influence on it.*

### 5.2. Principles of ETCS braking curves

*The ETCS on-board system calculates several types of braking curves for braking against the stop at the End of Authority (EOA) or the speed reduction at the Limit of Authority (LOA) Supervised Location (SVL). The Emergency Brake Deceleration (EBD) and the accompanying Emergency Brake Intervention (EBI) curve, which considers the brake application time, are finally the elements referred as the ETCS parachute. All target supervision limits, such as Service Brake Deceleration (SBD), EBD, Guidance Curve Indication (GUI), Indication (I), Warning (W) and Permitted speed (P) are according to the estimated speed  $V_{ext}$  (Tab. 3). The onboard monitoring system connected to a SBD and the associated Service Brake Intervention (SBI) curve takes into consideration the brake application time.*

Tabella 1 – Table 1

Confronto tra sottosistemi wayside ATC2 ed ERTSM L1 (ATC2.1 ed ERTMS L1 + infill)  
*Wayside subsystems comparison between ATC2 and ERTSM L1 (ATC2.1 and ERTMS L1 + infill)*

Sottosistema di terra Wayside subsystem						
Livello Level	Segnali ottici Optical Signal	Circuiti di binario Track Circuit	Balise	LEU Lineside Electronic Unit (LEU)	Rete fissa GSM-R GSM-R Fixed Network	Radio Block Center
ERTMS L1	✓	✓	✓	✓	-	-
ATC2	✓	✓	✓	✓	-	-

Tabella 2 – Table 2

Confronto dei sottosistemi di bordo tra ATC2 ed ERTSM L1 (non GSM-R radio block solution)  
*Onboard subsystems comparison between ATC2 and ERTSM L1 (not GSM-R radio block solution)*

Sottosistema di bordo Onboard subsystem								
Livello Level	EVC Electronic Virtual coupling (EVC)	Unità interfaccia Balise Balise Interface Unit	STM Specific Transition Module	Unità interfaccia treno Train Interface Unit	Odometria Odometry	Unità di registrazione legale Juridical Recording Unit	DMI Driver Machine Interface (DMI)	GSM-R
ERTMS L1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
ATC2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-

## 5. Curve di frenatura

### 5.1. Il ruolo della frenatura sulla capacità

La curva di frenatura è uno dei fattori chiave che influisce in modo significativo sulla capacità della linea. Inoltre, diversi fattori hanno un'influenza su di esso, tra cui il materiale rotabile, le caratteristiche dell'infrastruttura e il sistema di segnalamento.

### 5.2. Principi delle curve di frenatura ETCS

Il sistema di bordo ETCS calcola diversi tipi di curve di frenatura per l'arresto al termine dell'autorizzazione al movimento (EOA) o la riduzione della velocità al limite previsto dall'autorizzazione al movimento (LOA) sotto supervisione (SVL). La decelerazione con frenatura d'emergenza (EBD) e l'intervento della frenatura d'emergenza (EBI), che considera il tempo di azionamento del freno, sono infine gli elementi paracadute dell'ETCS. Tutti i limiti di supervisione, quali la decelerazione con frenatura di servizio (SBD), la EBD, l'indicazione della curva di riferimento (GUI), l'indicazione (I), l'avviso (W) e la velocità consentita (P), si basano sulla velocità stimata  $V_{ext}$  (Tab. 3). Il sistema di monitoraggio di bordo collegato a una SBD e la relativa curva d'intervento della frenatura di servizio (SBI) tiene conto del tempo di azionamento del freno.

Nel modello di frenatura ETCS, una curva di frenatura consentita (curva P) aiuta il conducente a rallentare pri-

*In the ETCS braking model, a Permitted braking-curve (P-curve) helps the driver slowing down before ETCS intervention: in practice, a single point based on the speed of the train and the status of the infrastructure. The on-board system then designs out a curve (permissible speed vs. distance) based on the P-point in support of the driver. The GUI offers to set allowed speed, based on SBD or EBD, in order to perform a more comfortable braking. It helps to avoid damage to brakes and provides an energy efficient operation. The driver must keep the speed as much as possible close to that allowed (Fig. 8).*

*The onboard unit continuously controls the speed to fulfil the target supervision limit. The driver sets the speed to the target in case of deceleration need according to LOA or EOA at I, by starting the deceleration process and keep it under P speed to prevent the acoustic Warning. The onboard unit calculates the warning supervision limit (W) to act in case of over-speed based on T\_warning (values reported in Tab. 3). After the automatic application of W by on-board unit, the driver has a short time to react to the alarm, otherwise the SBI applies automatically to avoid over-speed and EBI [10][11].*

### 5.3. Influence of signalling system on braking distance and capacity

*Different signalling systems require various adjustments in order to perform a safe application of brake. In conventional signalling system, which relies on optical signals and driver's behaviour, the distant signal is required to act as in-*



ma dell'intervento dell'ETCS: in pratica, un punto unico basato sulla velocità del treno e sullo stato dell'infrastruttura. Il sistema di bordo prevede quindi una curva (velocità ammissibile vs. distanza) basata sul punto P a supporto del conducente. Con la GUI si può impostare la velocità consentita, basata su SBD o EBD, al fine di eseguire una frenata più confortevole. Aiuta a evitare danni ai freni e fornisce un funzionamento efficiente dell'energia. Il conducente deve mantenere la velocità il più possibile vicina a quella consentita (Fig. 8).

L'unità di bordo controlla costantemente la velocità per rispettare l'obiettivo del limite di supervisione. Il conducente imposta la velocità sull'obiettivo in caso di necessità di decelerazione in I sulla base della LOA o della EOA, avviando il processo di decelerazione e mantenendolo sotto la velocità P per evitare l'allarme acustico. L'unità di bordo calcola il limite di supervisione degli avvisi (W) da applicare in caso di velocità eccessiva in base a  $T_{warning}$  (valori riportati nella Tab. 3). Dopo l'applicazione automatica di W da parte dell'unità di bordo, il conducente ha poco tempo per reagire all'allarme, altrimenti lo SBI si aziona automaticamente per evitare eccessi di velocità ed EBI [10][11].

### 5.3. Influenza del sistema di segnalazione sulla distanza e sulla capacità di frenatura

Diversi sistemi di segnalazione richiedono varie regolazioni per eseguire un'azione sicura della frenatura. Nel sistema di segnalamento convenzionale, che si basa su segnali ottici e sul comportamento del conducente, il segnale a distanza deve fungere da punto di indicazione per impostare la velocità in base al LOA o all'EOA. Nei sistemi di segnalamento convenzionali, il punto di inizio del processo di frenatura è costante (al segnale di protezione o al segnale dedicato a tale scopo), ma la velocità varia a seconda delle caratteristiche del materiale rotabile. Nell'ERTMS, per ciascun tipo di materiale rotabile, a seconda delle sue caratteristiche, si soddisfano in modo diverso i criteri di sicurezza e comfort in un punto di

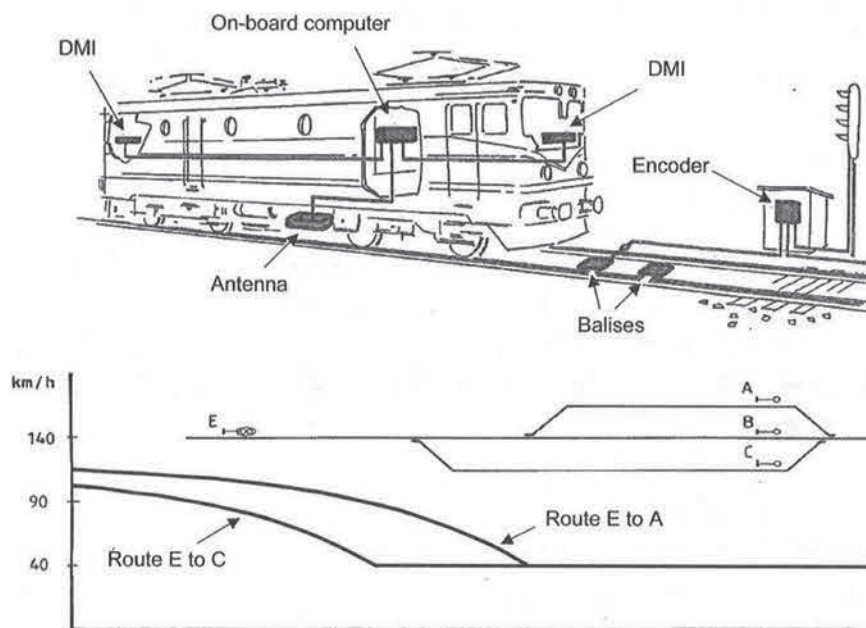


Figura 6 – Funzionamento del sistema di segnalamento ATC2 [4].

Figure 6 – ATC2 transmission system operation [4].

*dication point in order to set speed according to LOA or EOA. In conventional signalling systems, the point of initiation of braking process is constant (at distant signal or dedicated signal to this purpose) but the speed varies according to rolling stock characteristics. In ERTMS, it is different for each type of rolling stock, depending upon its characteristics,*

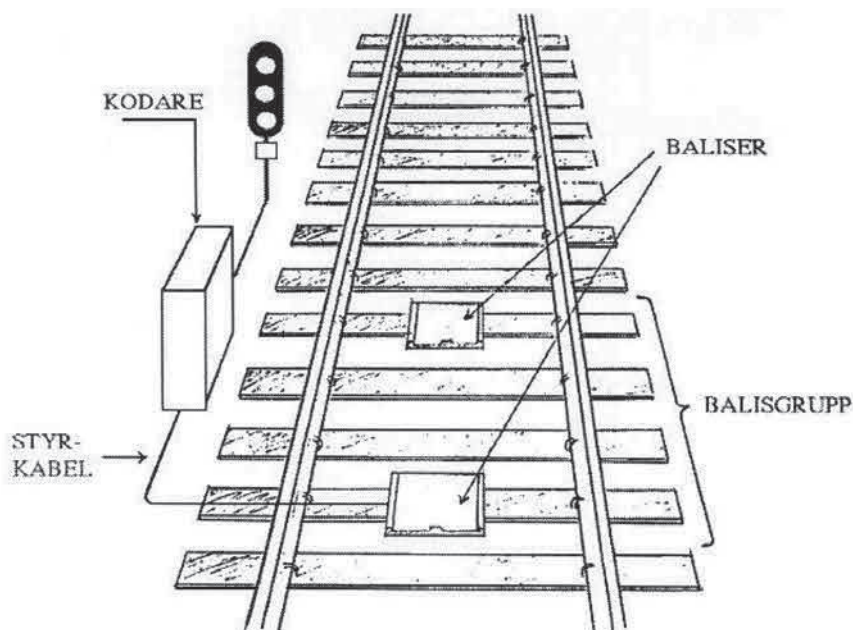


Figura 7 – Equipaggiamento del binario con ATC2 [9].

Figure 7 – ATC2 track equipment [9].

Tabella 3 – Table 3

Valori fissi relativi a W, P e I [10]  
Fixed values related to W, P and I [10]

Valori dei temi fissi Fixed time value	Time [s] Time [s]	Nome Name
Tempo fra il limite di avviso e il SBI Time between Warning supervision limit and SBI	2	T_warning
Tempo di reazione del macchinista fra il superamento della velocità massima e il SBI Driver reaction time between Permitted speed supervision limit and SBI	4	T_driver
Tempo di reazione del macchinista tra l'indicazione e il raggiungimento della velocità massima consentita Driver time between I and P supervision limits	7	T_preindication

indicazione determinato, in cui il conducente avvia il processo di frenatura a velocità iniziale fissa [10]. La Fig. 9 illustra il punto di indicazione delle prestazioni di frenatura del treno nei sistemi di segnalamento in cabina e nei sistemi di segnalamento convenzionali con avvistamento per il macchinista che inizia a frenare. In entrambi i sistemi, il conducente deve mantenere la velocità sotto la curva P.

Come mostra la Fig. 10, nel sistema di segnalamento convenzionale senza cabina, il conducente, basandosi sulla sua esperienza, imposta la velocità per l'inizio della frenata a distanza.

Nel frattempo, come mostra la Fig. 11, nell'ERTMS, per i treni con sistema di segnalamento in cabina, il processo di frenatura può iniziare da un punto di indicazio-

to fulfil the safety and comfort criteria at a dedicated indication point, where the driver starts the braking process with fixed initial speed [10]. Fig. 9 illustrates the train braking performance indication point in cab signalling systems and conventional signalling systems with sighting for driver starting to apply brake. In both systems, the driver should keep the speed under P curve.

As Fig. 10 shows, in conventional signalling system without cab signalling system, the driver, relying on her/his experience, sets the speed for start of braking at distant signal.

Meanwhile, as Fig. 11 shows, in ERTMS the trains with cab signalling system, the braking process can start at dedicated indication point for each rolling stock type and braking performance, starting from a defined speed, far before distant signal in case of rolling stocks with lower braking performance.

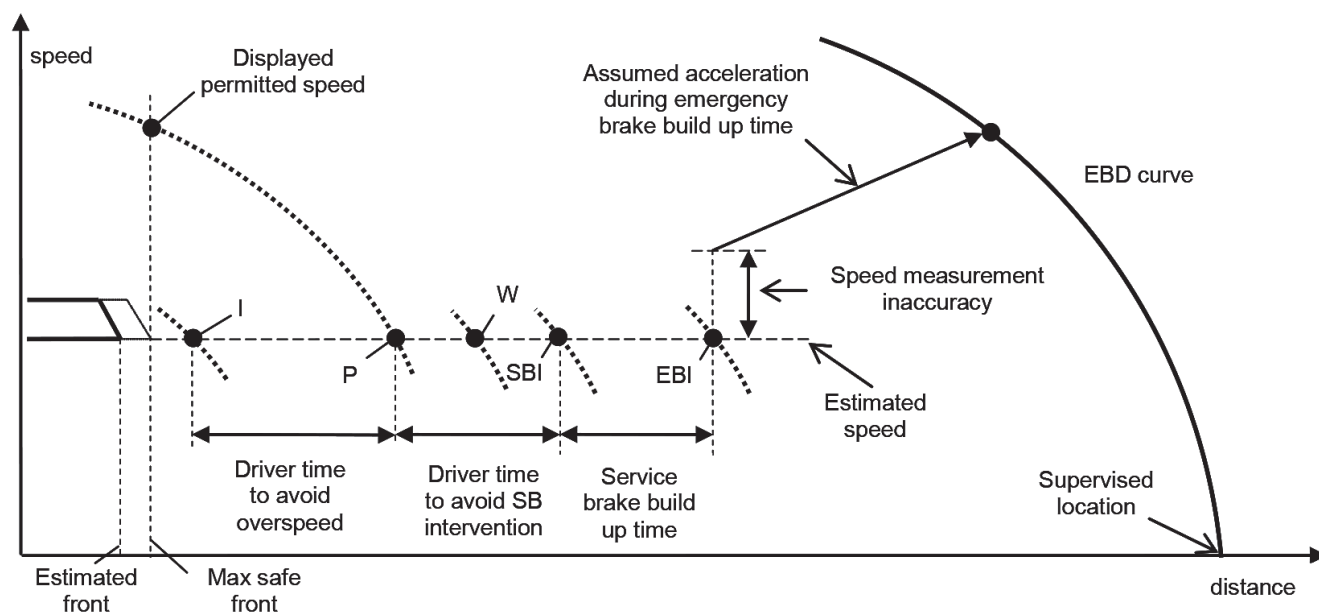


Figura 8 – Panoramica delle curve di frenatura nell'ETCS.  
Figure 8 – Overview of braking curves in ETCS.

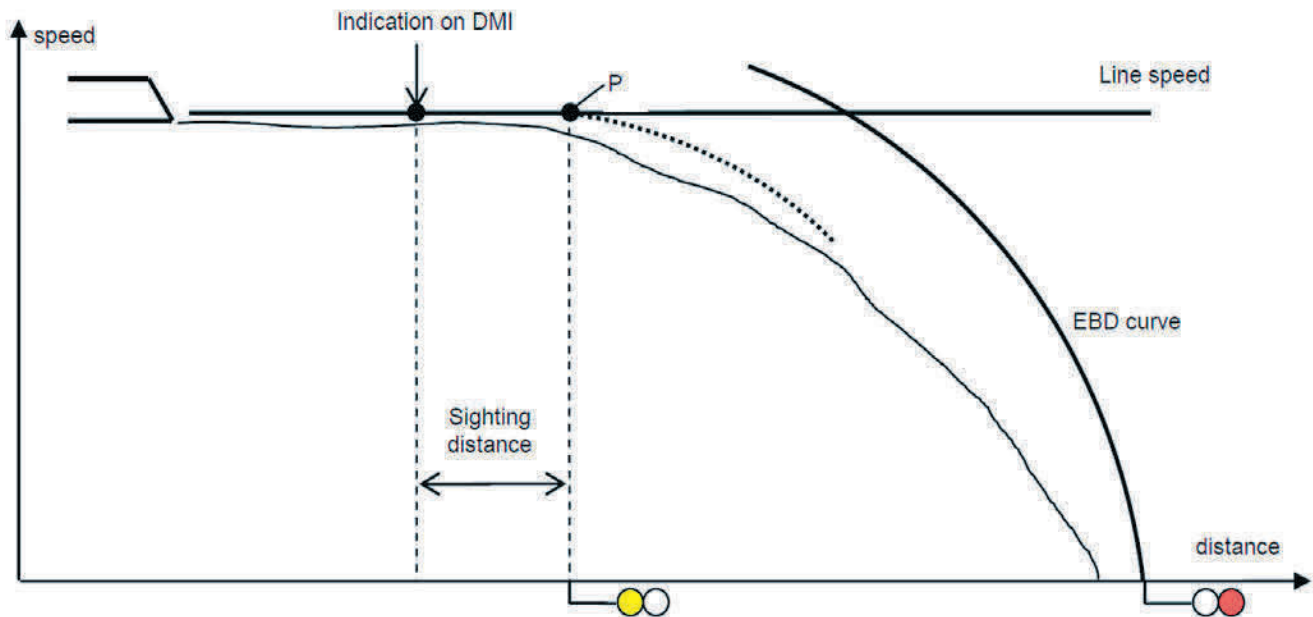


Figura 9 – Punto di indicazione delle prestazioni di frenatura del treno vs. segnale di avvertimento (segnalamento in cabina e segnalamento di linea) [10].

Figure 9 – Train braking performance indication point vs. warning signal (Cab signalling and Lineside signalling) [10].

ne dedicato per ciascun tipo di materiale rotabile e prestazione di frenatura, a partire da una velocità definita, molto prima del segnale di avviso nel caso in cui il materiale rotabile possa garantire prestazioni di frenatura inferiori.

Nell'ERTMS, la posizione dei punti di indicazione e la loro distanza dal punto di arresto, definita come distanza di perturbazione dell'ERTMS, fa parte della sequenza

*In ERTMS, the position of the indication points and their distance to the stop point, defined as ERTMS perturbation distance, is part of the blocking time sequence and has significant impact on headway and capacity (Fig. 12). The system delay time, required for communication between wayside equipment, interlocking, ETCS and GSM-R, is the other important factor that affects headway and capacity of the line.*

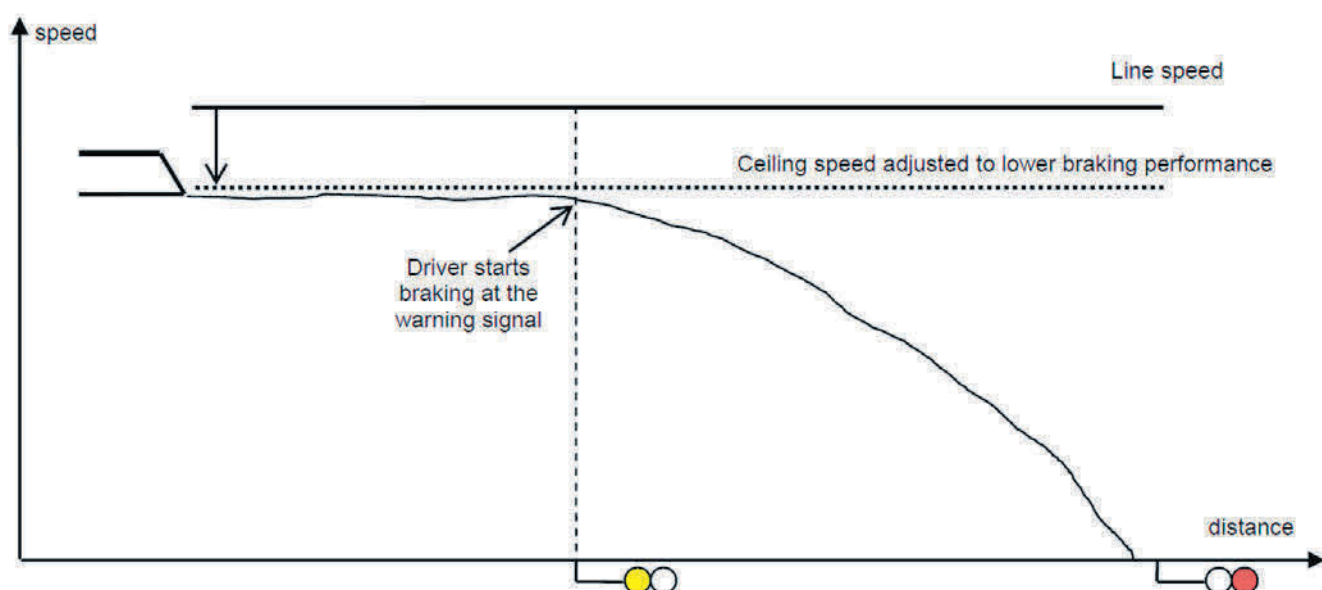


Figura 10 – Impatto delle prestazioni di frenatura, sistema di segnalamento convenzionale senza cabina [10].

Figure 10 – Impact of braking performance, conventional signalling system without cab signalling [10].

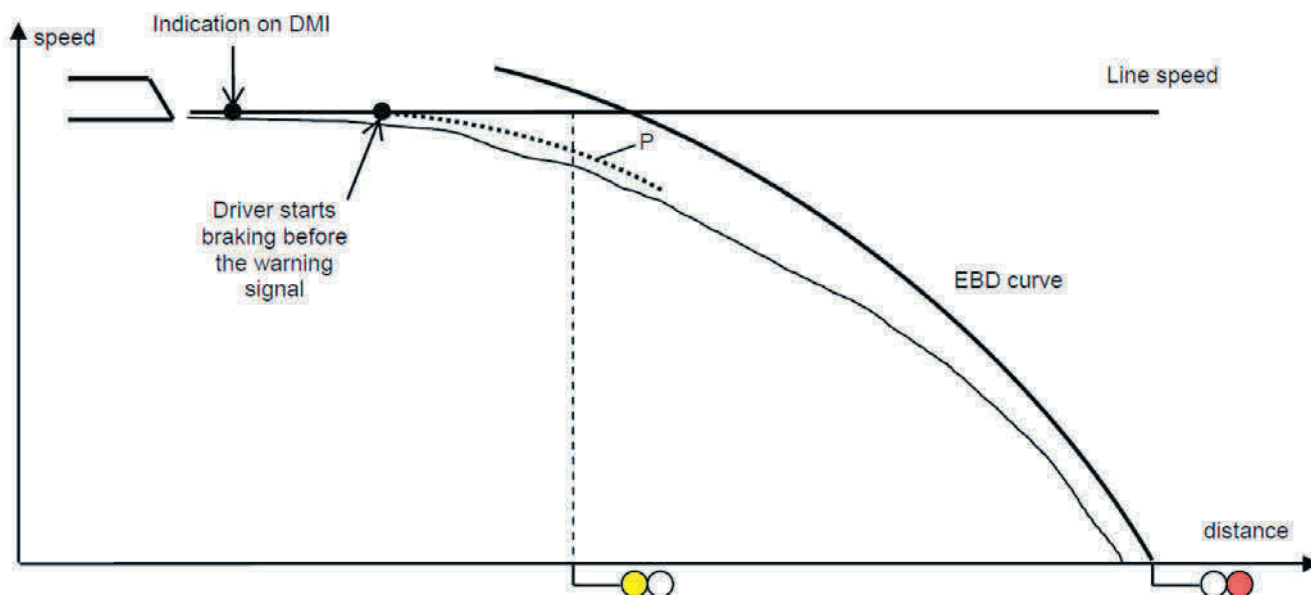


Figura 11 – Prestazioni di frenatura ridotte, segnalamento ripetuto in cabina con curva di frenatura ETCS [10].  
 Figure 11 – Low braking performance, cab Signalling with ETCS braking curve [10].

temporale di blocco e ha un impatto significativo sulla direzione di marcia e sulla capacità (Fig. 12). Il tempo di ritardo del sistema, necessario per la comunicazione tra apparecchiature di linea, apparati centrali di stazione, ETCS e GSM-R, è l'altro fattore importante che influisce sul distanziamento temporale e sulla capacità della linea.

Diversi sistemi di segnalamento richiedono varie regolazioni per eseguire un'applicazione sicura della frena-

*Different signalling systems require various adjustments in order to perform a safe application of brake. In the conventional signalling system, which relies on optical signals and driver's behaviour, the distant signal is required to act as indication point in order to set speed according to LOA or EOA. In this system, the point of initiation of braking process is constant, but the speed varies according to rolling stock characteristics.*

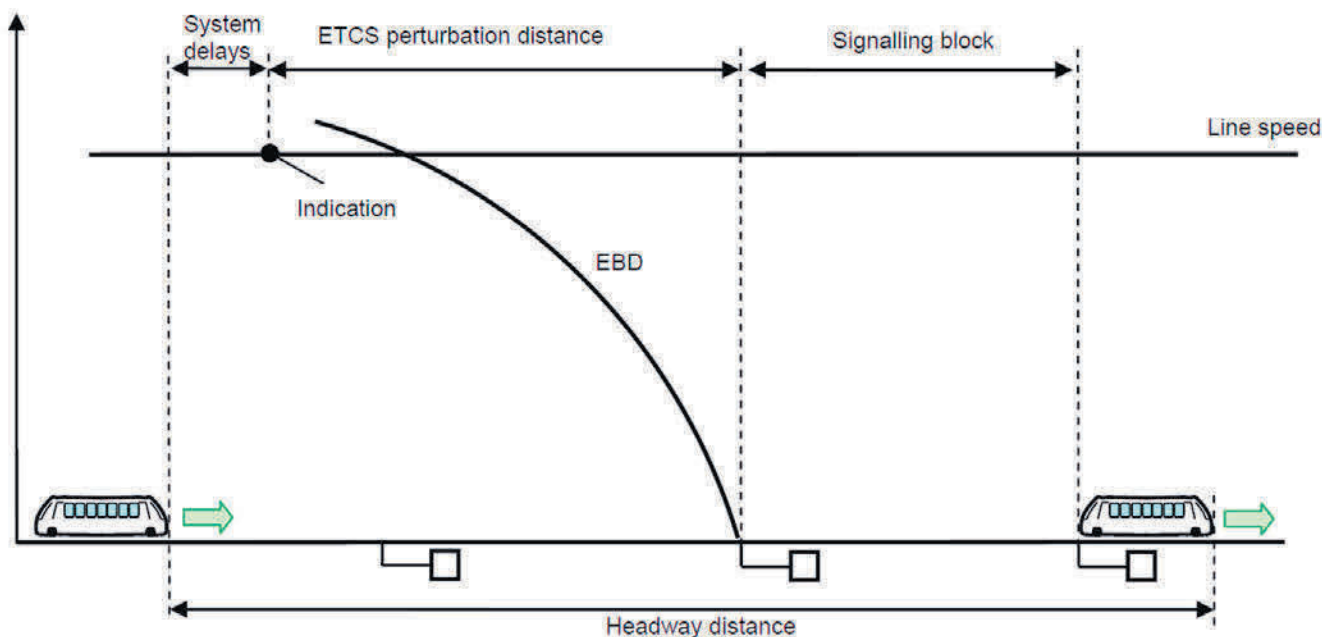


Figura 12 – Contributo della curva di frenatura ETCS su distanziamento temporale [10].  
 Figure 12 – Contribution of the ETCS braking curve to the headway [10].



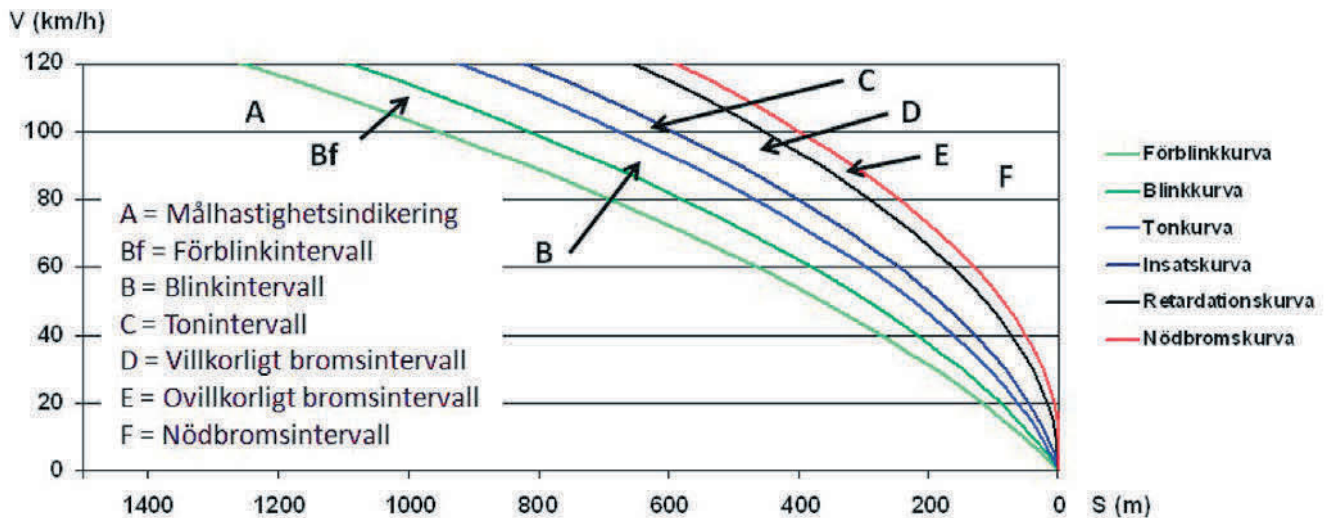


Figura 13 – Curva di frenatura in ATC2 [9]: A = Indicatore di velocità obiettivo, Bf = intervallo pre-lampeggiamento, B = intervallo di lampeggiamento, C = intervallo avviso sonoro, D = intervallo di frenatura condizionata, E = intervallo di frenatura incondizionata, F = intervallo della frenatura d'emergenza; Verde chiaro = Curva pre-lampeggiamento, Verde scuro = Curva di lampeggiamento, Azzurro = Curva dell'avviso sonoro, Blu = Curva limite, Nera = Curva di ritardo, Rossa = curva della frenatura d'emergenza.

Figure 13 – Braking curve in ATC2 [9]: A = Indicator of target speed, Bf = Pre-flash interval, B = Flash interval, C = Warning tone interval, D = Conditioned braking interval, E = Unconditioned braking interval, F = Emergency braking interval; Light green = Pre-flash curve, Dark green = Flash curve, Light blue = Warning tone curve, Dark blue = Extreme curve, Black = Delay curve, Red = Emergency braking curve.

tura. Nel sistema di segnalamento convenzionale, che si basa su segnali ottici e sul comportamento del conducente, il segnale di avviso deve fungere da punto di indicazione per impostare la velocità in base al LOA o all'EOA. In tale sistema il punto di inizio del processo di frenatura è

#### 5.4. Deceleration and speed monitoring in ATC2

ATC2 continuously calculates onboard different braking curves (Fig. 13) based on target distance depending upon actual speed and infrastructure characteristics of intervals:

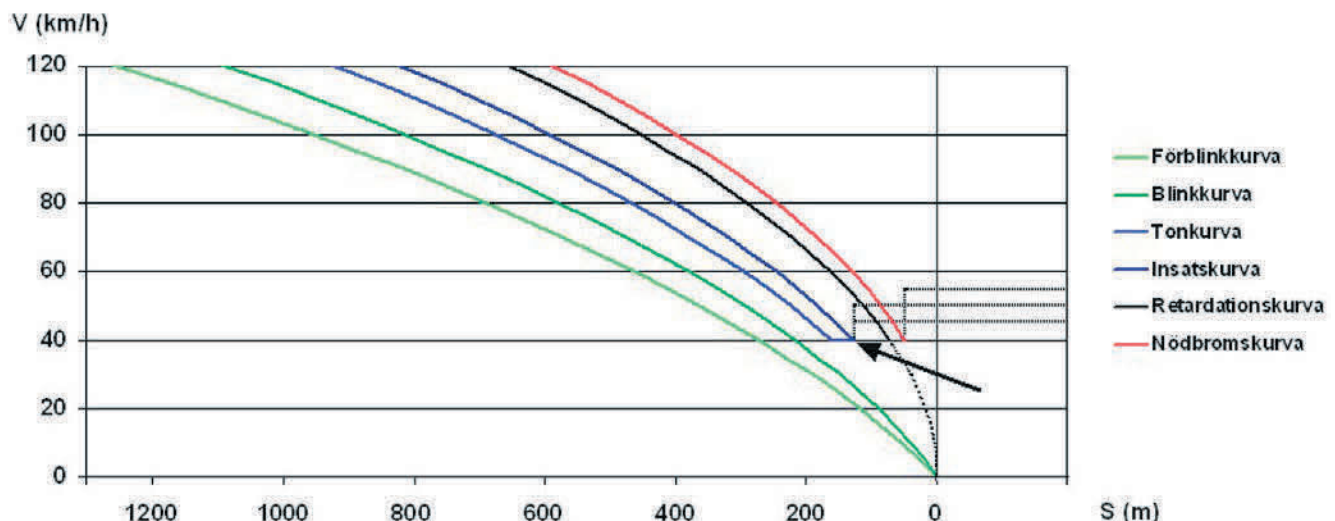


Figura 14 – Curva di frenatura per arresto di attesa con monitoraggio-40, dove il punto di ginocchio è indicato da una freccia: Verde chiaro = Curva pre-lampeggiamento, Verde scuro = Curva di lampeggiamento, Azzurro = Curva dell'avviso sonoro, Blu = Curva limite, Nera = Curva di ritardo, Rossa = curva della frenatura d'emergenza.

Figure 14 – Braking curve for waiting stop with 40-monitoring, where the knee point is marked with an arrow: Light green = Pre-flash curve, Dark green = Flash curve, Light blue = Warning tone curve, Dark blue = Extreme curve, Black = Delay curve, Red = Emergency braking curve.

costante, ma la velocità varia a seconda delle caratteristiche del materiale rotabile.

#### 5.4. Monitoraggio della decelerazione e della velocità nell'ATC2

L'ATC2 calcola continuamente a bordo curve di frenatura diverse (Fig. 13) in base alla distanza obiettivo, che dipende dalla velocità effettiva e dalle caratteristiche dell'infrastruttura degli intervalli: A) Indicazione, B) Lampeggio, C) Tono, D) Freno condizionato; E) Freno incondizionato; F) Freno di emergenza.

Quando si passa un segnale di avviso che mostra un messaggio di limitazione della velocità nella cabina di guida, l'avvertimento del conducente si attiva quando la reazione non è adeguata alle restrizioni annunciate. Il sistema calcola diverse curve di avviso (Fig. 14).

Infine, la curva di frenatura di emergenza calcolata (F) corrisponde agli ultimi punti in cui il treno deve iniziare a frenare con la frenatura di servizio o con la frenatura di emergenza [9]. Poiché il treno si avvicina al punto in cui interviene l'emergenza ATC, si applicano gli stessi principi descritti nella sezione precedente, con la differenza che il pre-indicatore rimane attivo fino a quando la velocità è scesa al di sotto della velocità obiettivo e il punto obiettivo è stato superato.

L'intervallo pre-lampeggiamento inizia 13 s prima dell'intervento del freno di emergenza e fornisce al conducente un'indicazione iniziale di un futuro cambio di velocità attraverso un avviso lampeggiante con le informazioni sulla velocità nel pre-indicatore. L'intervallo di lampeggiamento inizia 8 s prima dell'intervento del freno d'emergenza e dà un avviso lampeggiante con la nuova velocità anche nell'indicatore principale. L'intervallo dell'avviso sonoro inizia 3 s prima della frenatura del sistema e dà un segnale acustico al conducente. Nell'ATC2, il tempo di reazione è di 3 s prima dell'intervento della frenatura. Nel frattempo, nell'ETCS il tempo di reazione del conducente ( $T_{driver}$ ) di 4 s serve per calcolare la curva P.

## 6. Panoramica sulla metodologia

L'aumento della domanda di trasporto e il suo trasferimento dalla strada alla ferrovia possono causare la congestione dell'infrastruttura ferroviaria e incidere sulla capacità necessaria delle reti ferroviarie. La capacità delle linee e dei nodi ferroviari è fortemente influenzata dalla configurazione dei sistemi CCS: è il numero di treni programmati che possono circolare in un intervallo di tempo fisso senza subire ritardi che superano una soglia fissa. Ci sono differenze concettuali e terminologiche, come capacità teorica (per sezione linea specifica), capacità pratica (considerando l'interazione di varie sezioni), capacità usata e capacità disponibile. La causa dei ritardi dipende da diversi fattori quali: traffico eterogeneo e esercizio di treni con diversi profili di velocità, distanza tra stazioni

A) Indication, B) Flashing, C) Tone, D) Conditional Brake; E) Unconditional Brake; F) Emergency Brake.

When passing a pre-signal showing a restrictive speed message in the driver's cab, the driver's warning activates when the reaction is not adequate to the announced restrictions. The system calculates several warning curves (Fig. 14). Finally, the calculated emergency brake curve (F) corresponds to the absolute last places where the train must start braking with both service and emergency braking [9].

As the train approach the point where the ATC emergency intervenes, the same principles as described in the previous section apply with the difference that the pre-indicator remains active until the speed has fallen below the target speed and the target point has been passed.

The pre-flash interval starts 13 s before the emergency brake intervention and gives the driver an initial indication of a future speed change by flashing speed information in the pre-indicator. The flash interval starts 8 s before the emergency brake intervention and gives a flashing warning with the new speed even in the main indicator. The warning tone interval starts 3 s before the system braking and gives a warning tone to the driver. In ATC2, the reaction time is 3 s before braking intervention. Meanwhile, in ETCS the reaction time of the driver ( $T_{driver}$ ) of 4 s is used for calculating the P-curve.

## 6. Methodological overview

Increasing demand for transport and shifting from road to rail causes the congestion in railway infrastructure and affects the available and required capacity along the railway networks. The railway capacity is highly affected by the configuration of CCS systems. Capacity of lines and nodes is the number of programmed trains running in fixed time interval without suffering delays exceeding a fixed threshold. There are conceptual differences and terminologies, such as Theoretical Capacity (for specific line section), Practical Capacity (considering the interaction of various sections), Used Capacity and Available Capacity. Cause of delays depend on several factors such as: heterogeneous traffic and operation of trains with different speed profile, distance between consecutive stations for overtaking of trains, signalling systems, required times for section release and so on. The overtaking and passing through themselves are source and cause of the propagation of delays, which decreases the level of service and the punctuality [12][13], which can be primary delays, caused by single trains on the section and secondary delays caused by other trains [14]. The sources of primary delays are mainly unplanned longer running time between intermediate stations or dwelling time at stations; secondary delays are due to high capacity consumptions and short buffer time. By assigning supplements to dwell and running time, it is possible to reduce primary delays. Buffer times are useful to reduce secondary delays and their propagation. Supplement and buffer times are extra time added to minimum headway, dwell and running time between consecutive stations [15][16].

consecutive per le precedenze fra i treni, sistemi di segnalamento, tempi necessari per il rilascio della sezione e così via. Le precedenze e gli incroci sono origine e causa della propagazione dei ritardi, che diminuiscono il livello di servizio e la puntualità [12][13], i quali si dividono in ritardi primari, causati da treni singoli in linea e ritardi secondari causati da altri treni [14]. Le fonti di ritardi primari sono principalmente tempi di funzionamento non pianificati più lunghi tra stazioni intermedie o tempo di permanenza nelle stazioni; i ritardi secondari sono dovuti a consumi di capacità elevati e brevi tempi cuscinetto. Assegnando i supplementi al tempo di sosta e di percorrenza, è possibile ridurre i ritardi primari. I tempi cuscinetto sono utili per ridurre i ritardi secondari e la loro propagazione. I tempi supplementari e i tempi cuscinetto sono sommati al tempo minimo di avanzamento, di permanenza e di funzionamento tra stazioni consecutive [15][16]. Per aumentare la capacità della rete, la pianificazione e la costruzione di nuove infrastrutture o il potenziamento delle infrastrutture esistenti sono costosi e richiedono tempo. È pertanto necessario gestire la capacità dell'infrastruttura in modo efficiente [17]. Dato che la capacità dipende da diversi fattori, è necessario un metodo appropriato per rappresentare le caratteristiche dell'infrastruttura, del materiale rotabile e delle strategie operative, come l'orario [18], con un livello di accuratezza adeguato in funzione degli scopi dello studio. Esistono vari metodi di calcolo della capacità di infrastruttura [12][19][20]:

- metodi statici (deterministici) che utilizzano espressioni matematiche senza modificare i valori dei parametri durante un dato periodo e considerando funzioni di probabilità per le distribuzioni;
- metodi dinamici (stocastici) con funzioni rappresentate da distribuzioni di probabilità, che offrono la possibilità di studiare l'interrelazione tra variabili;
- metodi analogici (di simulazione) asincroni (basati su eventi) e sincroni (basati sul tempo) basati sulla capacità di ottimizzazione di alcune variabili rilevanti, con vari mix di traffico, che rappresentano dinamicamente diversi aspetti del traffico (ritardi) in varie circostanze.

Il metodo di compressione UIC è basato su un orario deterministico e microscopico che sfrutta il modello del tempo di blocco per calcolare il distanziamento temporale minimo nell'area interessata [21]. Questo metodo considera la sezione come un parametro per stimare il consumo di capacità. Questo metodo non è ideale per la valutazione trasparente delle prestazioni dell'infrastruttura a causa della considerazione aggregata dei conflitti e della generazione di ritardi. Data la limitata disponibilità di dati, sono comunque possibili studi semplificati e in grado di fornire risultati validi, in particolare per la gestione strategica delle infrastrutture a medio-lungo termine [22]. Inoltre, negli orari ferroviari, sono necessari tempi cuscinetto tra le sequenze dei tempi di blocco per ridurre la propagazione dei ritardi e contribuire alla solidità

*In order to increase network capacity, planning and construction of new infrastructure or upgrading the existing infrastructure are costly and time consuming. Therefore, it is necessary to manage capacity of infrastructure in efficient way [17]. Due to dependency of capacity on several factors, it is necessary an appropriate method to represent the features of infrastructure, rolling stock and operating strategies, such as timetable [18] with and appropriate level of accuracy depending on the purposes of the study. Various methods for the calculation of the infrastructure capacity exist [12][19][20]:*

- *static (deterministic) methods using mathematical expressions without changing values of parameters during given time and considering probability function for distributions;*
- *dynamic (stochastic) methods with functions represented by probability distributions, which provide possibility of study of interrelation between variables;*
- *analogical (simulation) asynchronous (event based) and synchronous (time based) methods based on the capability of optimization of a few relevant variables, with various traffic mix, dynamically representing different aspects of traffic (delays) under various circumstances.*

*The UIC Compression method is a deterministic, microscopic timetable-based method that exploits the blocking time model in order to calculate minimum headway within the concerned area [21]. This method is considering the section as a benchmark to estimate the capacity consumption. This method is not ideal for the transparent evaluation of infrastructure's performance due to the aggregated consideration of conflicts and generation of delays. With limited availability of data, simplified studies are anyway possible and able to provide with valid results, particularly for medium-long term strategic infrastructure management [22]. Moreover, in railway timetabling, buffer times between the blocking-time sequences are necessary to reduce the propagation of delays and to contribute to the robustness of the timetable [13]. In addition, compression and other timetable-focused methods are not always suitable for investigations on capacity due to the aggregated method to consider delay generation mechanism directly related to the buffer time with its effect on the quality of service [21].*

*In ERTMS/ETCS levels application, the blocking time depends on braking curve and indication point, which affect directly the capacity. In Level 1, the Balise Group (BG) related to an Indication Point (IP), the braking information may be different, and the IP could be set before distant signal to start earlier the braking process. For Level 2, in case of MA restriction, the deceleration must start at the indication point too. For Level 3, the blocking time is dynamic and based on the absolute braking distance plus a safety margin and the distance to the next train or danger or protected point [23]. It is the total time (protected interval) for passing through a block section. It starts by the release of MA and ends when the rear end of train leaves the block*



dell'orario [13]. Inoltre, i metodi di compressione e altri metodi incentrati sull'orario non sono sempre adatti per le indagini sulla capacità a causa del metodo aggregato per considerare il meccanismo di generazione del ritardo direttamente collegato al tempo cuscinetto con i suoi effetti sulla qualità del servizio [21]. Nell'applicazione dei livelli ERTMS/ETCS, il tempo di blocco dipende dalla curva di frenatura e dal punto di indicazione, che influiscono direttamente sulla capacità. Nel Livello 1, il Gruppo *Balise* (BG) relativo a un Punto di Indicazione (IP) e le informazioni sulla frenatura possono essere diverse, e l'IP può essere impostato prima del segnale di avviso per avviare prima il processo di frenatura. Per il livello 2, in caso di restrizione della MA, la decelerazione deve iniziare sempre presso il punto di indicazione. Per il livello 3, il tempo di blocco è dinamico e si basa sulla distanza di frenatura assoluta più un margine di sicurezza e sulla distanza dal treno successivo o dal punto di pericolo o di protezione [23]. Questo è il tempo totale (intervallo protetto) per passare attraverso una sezione di blocco. Inizia con il rilascio della MA e termina quando l'estremità posteriore del treno abbandona la sezione del blocco (+sovrapposizione) passando sopra il "comando di liberazione" (nel sistema di segnalamento convenzionale) e il percorso viene ripristinato alla normalità e pronto per il treno successivo [24]. L'IP e il tempo di frenatura hanno un ruolo chiave nell'aumentare il tempo di avvicinamento e nel monitorare continuamente la velocità dei treni in caso di superamento del valore consentito dopo l'avviso al conducente, altrimenti interviene il freno di servizio.

I sistemi ERTMS/ETCS di bordo calcolano in tempo reale altri limiti di supervisione: indicazione (I), velocità consentita (P), allarme (W) e intervento del freno di servizio (SBI). Ciò accade nei luoghi in cui, una volta attraversati dal treno, vengono percepite alcune informazioni fornite al macchinista attraverso grafica, colori e suoni appropriati sull'interfaccia della macchinetta (DMI), come per i dettagli in [11][17].

## 7. Metodi analitici

### 7.1. Impostazione proposta

I metodi analitici sono adatti per modellare la rete ferroviaria utilizzando espressioni matematiche per ottenere risultati preliminari [12]. Al fine di calcolare i distanziamenti temporali e il consumo di capacità, alcune ipotesi e impostazioni variabili influenzano in modo diverso i risultati di ciascun metodo. Il presente capitolo descrive il metodo di calcolo del consumo di capacità utilizzando la *Fiche UIC 406* in combinazione con un metodo specificamente sviluppato per i diversi livelli ERTMS/ETCS [23][25].

### 7.2. Ipotesi nel metodo analitico

Per un calcolo accurato del tempo di marcia, è possibile stimare il profilo della velocità considerando vari sta-

*section (+overlap) passing "over release contact" (in conventional signalling system) and route is reset to normal and ready for the next train [24]. IP and braking time have a key role in increasing the approaching time and monitoring continuously the trains speed in case of exceeding the allowed value after the warning to the driver, otherwise the service brake intervenes. ERTMS/ETCS onboard systems calculate in real time other supervision limits: Indication (I), Permitted speed (P), Warning (W) and Service Brake Intervention (SBI). It happens at locations that, when crossed by the train, will trigger some information to be given to the driver through appropriate graphics, colours and sounds on the Driver Machine Interface (DMI), as for details in [11][17].*

## 7. Analytical methods

### 7.1. Proposed approach

*Analytical methods are suitable for modelling the railway setup using mathematical expressions to reach preliminary results [12]. In order to calculate headway and capacity consumption, some assumptions and input variables affect differently the results in each method. This chapter describes the capacity consumption calculation method using leaflet UIC 406 in combination with a method specifically developed for different ERTMS/ETC levels provided in [23][25].*

### 7.2. Assumptions in analytical approach

*For accurate running time calculation, it is possible to estimate the speed profile considering various driving states, such as acceleration and deceleration (moderated by passengers' comfort requirements), cruising at constant speed, coasting (without applying any external force). In the present study, a high accuracy need is not required; therefore, the coasting phase remained out the present study and the other phases were according to the values recommended in [26].*

### 7.3. Capacity balance

*The main factors that influence the capacity are characteristics of infrastructure and rolling stock, in addition to their interaction to provide an acceptable quality of service.*

*As explained in the UIC Code, there is a correlation between number of trains in given time interval and that the increasing number of trains decreases the available capacity to ensure a good quality of service (Fig. 15). The average speed impacts the occupation time, which means that the higher speed allows lower travel time along the block sections but in it needs longer time to stop and approaching time and also increases the minimum headway.*

*Adding buffer time to minimum headway prevents the propagation of secondary knock-on delays and increases the stability and reliability of timetable, but in return re-*



ti di guida, come accelerazione e decelerazione (moderata dai requisiti di comfort dei passeggeri), crociera a velocità costante, *coasting* (senza applicare alcuna forza esterna). Nel presente studio non è richiesta un'elevata precisione; pertanto, la fase di *coasting* è esclusa e le altre fasi sono basate su valori raccomandati [26].

### 7.3. Bilancio della capacità

I principali fattori che influenzano la capacità sono le caratteristiche dell'infrastruttura e del materiale rotabile, oltre alla loro interazione per fornire una qualità di servizio accettabile.

Come spiegato nel codice UIC, vi è una correlazione tra il numero di treni in un determinato intervallo di tempo, secondo la quale il numero crescente di treni riduce la capacità disponibile per garantire una buona qualità del servizio (Fig. 15). La velocità media incide sul tempo di occupazione, il che significa che una velocità più elevata consente tempi di percorrenza inferiori lungo le sezioni di blocco, ma ha bisogno di più tempo per fermarsi e più tempo di avvicinamento e aumenta anche il distanziamento temporale minimo. L'aggiunta del tempo cuscinetto al distanziamento temporale minimo impedisce la propagazione di ritardi secondari e aumenta la stabilità e l'affidabilità dell'orario, ma in cambio si ottiene una riduzione della capacità: *trade-off* tra robustezza e capacità.

Inoltre, il livello di eterogeneità (diversità dei tipi di materiale rotabile con diverso profilo di velocità e schema di frenatura) ha un impatto significativo sulla capacità: un grado più elevato di eterogeneità comporta un consumo di capacità più elevato e viceversa [17][28].

### 7.4. Metodo di compressione

Il metodo della compressione proposto dall'Unione Internazionale delle Ferrovie (UIC), descritto nella *Fiche* 406, si basa sulla modellizzazione dei tempi di blocco per calcolare il distanziamento temporale minimo e infine il consumo di capacità (CC) e compressione dell'orario considerando la sezione critica con il più alto consumo di capacità. Con la capacità utilizzata e residua stimata, è possibile programmare servizi supplementari. Per raggiungere tali obiettivi, i primi passi sono la definizione dell'area e del periodo di interesse sulla base dell'orario effettivo [23][25]. Il secondo passo è quello di selezionare la natura della sezione a seconda dello scopo dello studio. Secondo questo metodo, possono essere rilevanti due tipi di sezioni: sezioni con linee ferroviarie assegnate (a seconda della domanda di trasporto) e sezioni critiche per stimare

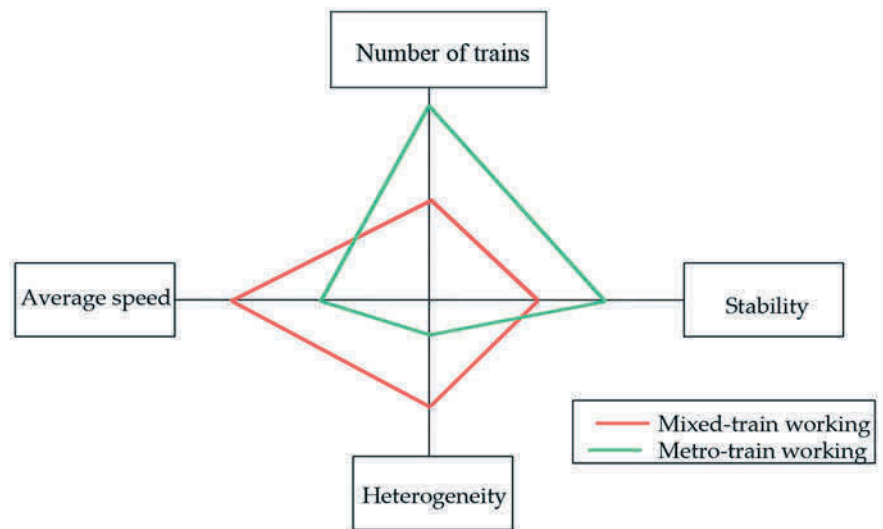


Figura 15 – Bilancio della capacità [27].

Figure 15 – Capacity balance [27].

*sults a reduced capacity: trade-off between robustness and capacity.*

*Moreover, the level of heterogeneity (diversity of rolling stocks types with different speed profile and braking pattern) has significant impacts on capacity: higher degree of heterogeneity results in higher capacity consumption and vice versa [17][28].*

### 7.4. Compression method

*The compression method proposed by International Union of Railways (UIC), provided in Leaflet code 406, relies on modelling of block time steps in order to calculate minimum headway and finally Capacity Consumption (CC) and compression of timetable considering the critical section with highest capacity consumption. With estimated utilized and residual capacity, it is possible to design extra services. To accomplish these goals, the first steps are to define the area and period of interest based on actual timetable [23][25]. The second step is to select the nature of section depending on the study's purpose. According to this method, two types of sections can be relevant: sections with assigned train paths (depending on the transport demand) and critical sections in order to estimate the CC.*

*The third step is the calculation of CC, based on assumptions related to infrastructure and running characteristics: simplified, partial or complete operational condition, which means without interlocking set up and activities or with partial or complete knowledge of operational events.*

*The fourth step is the evaluation of capacity consumption starting from the calculation of occupancy time rate and additional times to guarantee acceptable level of service: recommended values for calculating occupancy and additional time rates based on timetable classification.*

il CC. La terza fase è il calcolo di CC, basato su ipotesi relative alle caratteristiche dell'infrastruttura e del funzionamento: condizione operativa semplificata, parziale o completa, il che significa che l'impianto e le attività non sono interconnessi o hanno una conoscenza parziale o completa degli eventi operativi. La quarta fase è la valutazione del consumo di capacità a partire dal calcolo del tasso di tempo di occupazione e dei tempi aggiuntivi per garantire un livello di servizio accettabile: valori raccomandati per il calcolo dell'occupazione e tassi di tempo aggiuntivi in base alla classificazione dell'orario.

L'ultima fase consiste nell'utilizzare la capacità disponibile per aggiungere treni in base ai valori CC dei tratti di linea.

### 7.5. Sequenza temporale di blocco

Il concetto di sezione di blocco fornisce un ambiente operativo sicuro lungo la linea, oltre a un maggior distanziamento per migliorare la capacità dell'infrastruttura. Sulla base del concetto di sezione di blocco, il modello di bloccamento delle sezioni temporali, introdotto da Oskar HAPPEL nel 1959 [29], diventa uno degli approcci analitici più popolari per la modellizzazione dei distanziamenti temporali.

*The final step is to use available capacity by adding trains based on CC values of line sections.*

### 7.5. Blocking time sequence

*The concept of block section provides a safe operating environment along the line in addition to enhanced spacing to improve the infrastructure capacity. Based on block section concept, the model of blocking time steps, introduced by Oskar HAPPEL in 1959 [29] become one the most popular analytical approach for headway modelling.*

*In order to calculate the minimum headway, the blocking time model presents the sum of required time for a block section to get prepared for entrance, approach, travel, clearance and getting ready for the next train. This means the blocking time is longer than physical occupation time of the block section, it starts before the train physically enters it and ends when the rear of the train leaves the block section and overlap, if any and the section is set for the next train. The blocking process starts after that the train receives the MA, which means the line is safe for a train approaching and entering. The reaction, approaching, setting and clearance times depend on interlocking and signalling systems, communication systems and rolling stock's equipment, as well as sections and rolling trains length. This*

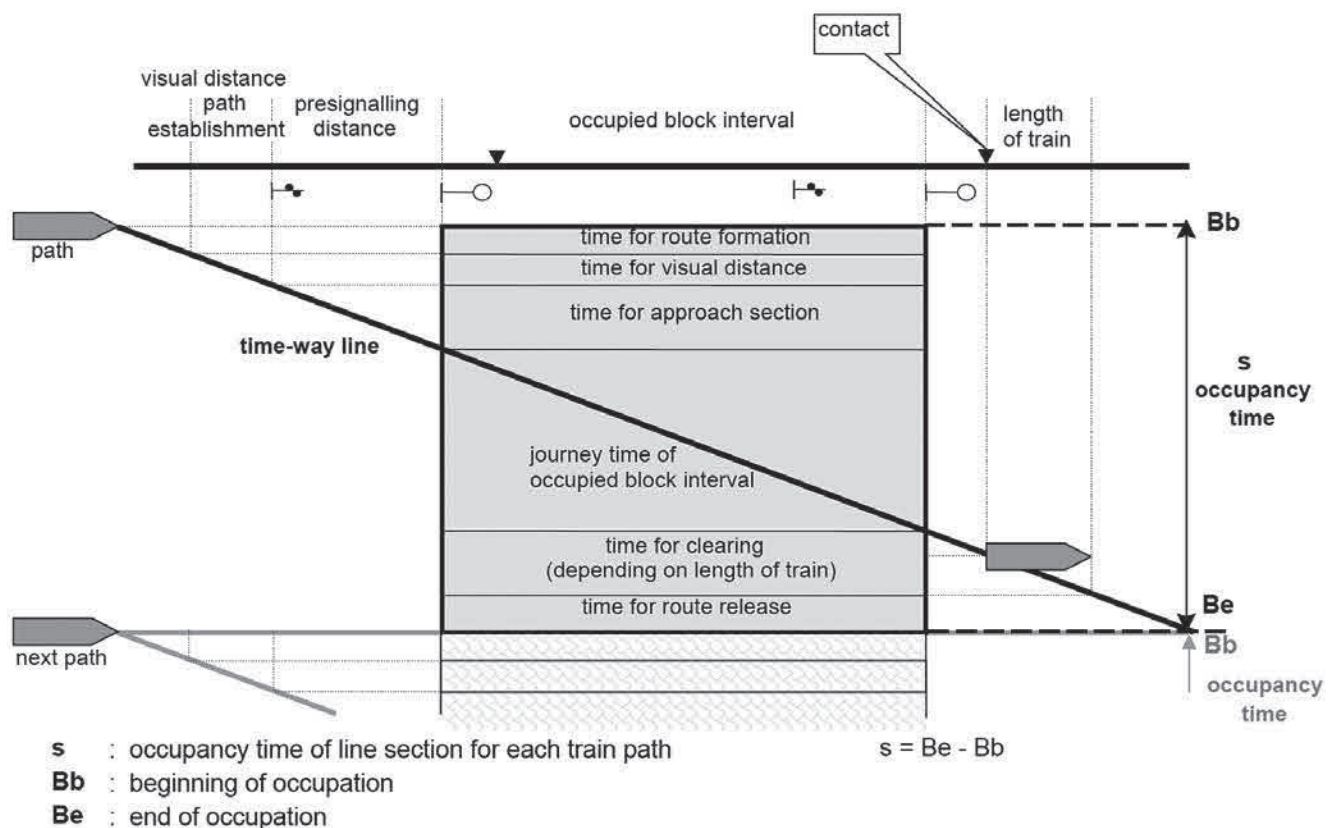


Figura 16 – Sequenza di tempo di blocco per distanza convenzionale / sistema di segnalazione principale [19].

Figure 16 – Blocking time sequence for conventional distant/main signalling system [19].

Al fine di calcolare il distanziamento temporale minimo, il modello di blocco temporale include la somma del tempo necessario a una sezione di blocco per prepararsi per l'ingresso, l'avvicinamento, la corsa, la liberazione e la preparazione per il treno successivo. Ciò significa che il tempo di blocco è più lungo del tempo di occupazione fisica della sezione di blocco, inizia prima che il treno vi entri fisicamente e termina quando la parte posteriore del treno lascia la sezione di blocco e si sovrappone, se presente, alla sezione impostata per il treno successivo. Il processo di bloccamento inizia dopo che il treno riceve la MA, il che significa che la linea è sicura per un treno che si avvicina e entra. I tempi di reazione, avvicinamento, regolazione e liberazione dipendono da apparati centrali e sistemi di segnalamento, dai sistemi di comunicazione e dalle prestazioni del materiale rotabile, nonché dalle sezioni e dalla lunghezza dei treni. Questo metodo, legato a diversi fattori, ipotesi e dati di input per modellare l'interazione del treno con l'infrastruttura e concepito per il segnalamento tradizionale, è comunque applicabile a una varietà di sistemi di segnalamento con qualche integrazione. La Fig. 16 illustra la sequenza temporale di blocco nel segnalamento convenzionale [19] e le sottosezioni seguenti forniscono una panoramica sulle sequenze temporali di blocco e la loro influenza sul distanziamento temporale minimo. Nel sistema di segnalamento a blocchi mobili, l'eliminazione delle sezioni fisiche fisse dei blocchi, sfruttando il posizionamento e il sistema di monitoraggio dell'integrità del treno (TIMS) porta a una riduzione del distanziamento temporale minimo. Di conseguenza, le fasi del tempo di blocco si trasformano in una banda di tempo di blocco dinamico basata sul calcolo, l'annullamento della curva di frenata e l'estensione continua della MA [23][25]. La sequenza di tempo di bloccaggio nel sistema a blocchi mobili, è composta dalla distanza di frenatura in funzione della lunghezza del treno, dell'infrastruttura, della velocità di marcia e del margine di sicurezza a causa dell'imprecisione della velocità e della posizione. La Fig. 17 mostra la banda dinamica creata da sezioni di blocco molto brevi.

### Tempo di avvicinamento

Il tempo di avvicinamento dipende dal punto di partenza della fase di avvicinamento e dalle variabili rilevanti che lo influenzano. È impostato in base alle prestazioni di frenatura del materiale rotabile in interazione con l'infrastruttura interessata. Il passo di partenza in avvicinamento differiscono per tipo di materiale rotabile (prestazioni di frenatura più elevate richiedono una distanza di frenatura più breve). Nel sistema di segnalamento con-

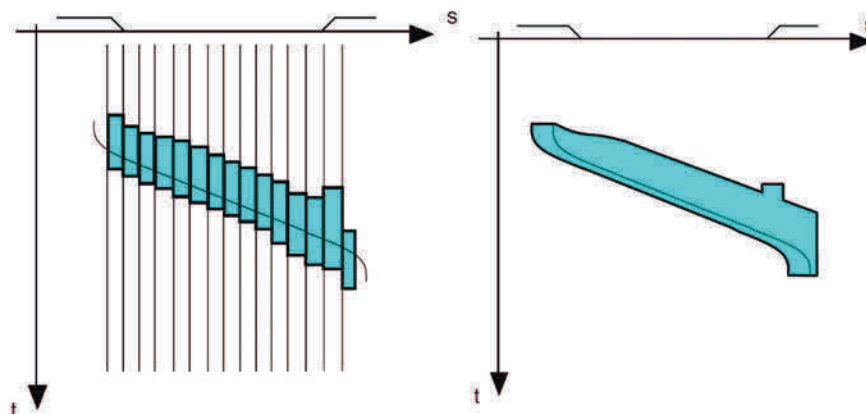


Figura 17 – Scala del tempo di bloccaggio in movimento [23].

Figure 17 – Moving blocking-time stairway [23].

method, tied to several factors, assumptions and input data to model the interaction of train with infrastructure and conceived for traditional signalling, is anyway applicable to a variety of signalling systems with some additional assumption. Fig. 16 illustrates blocking time sequence in conventional signalling [19] and the following subsections give an overview about blocking time sequences and their influence on the minimum headway.

In moving block based signalling system, the elimination of physical fixed block sections, exploiting positioning and Train Integrity Monitoring System (TIMS) leads to shorter minimum headway. Consequently, the blocking time steps is transformed into a dynamic blocking time band based on calculation, cancellation of braking curve and continuous extension of MA [23][25]. The blocking time sequence in moving block system is composed of braking distance considering train's length, infrastructure, running speed and safety margin due to speed and position inaccuracy. Fig. 17 shows the dynamic blocking strip created by very short blocking steps.

### Approaching time

The approaching time depends on starting point of the approaching phase and relevant variables that influence it. It is set based on the braking performance of rolling stock in interaction with involved infrastructure. The starting approaching step differ by type of rolling stock (higher braking performance requires shorter braking distance). In conventional signalling system that relies on optical signals and driver's vision and reaction, the approaching phase starts at distant signal and in cab signalling system that starts at dedicated Balise (Indication Point in the ERTMS/ETCS).

### Drivers' sighting (reaction) time

Required time for driver to recognise the aspect of the distant signal to approach. In conventional signalling sys-



venzionale, che si basa su segnali ottici e sulla visione e reazione del conducente, la fase di avvicinamento inizia a distanza e nel sistema di segnalamento in cabina che inizia da una *Balise* dedicata (punto di indicazione nel sistema ERTMS/ETCS).

### Tempo di avvistamento (reazione) del macchinista

Tempo necessario al macchinista per riconoscere l'aspetto del segnale a cui si avvicina. Nel sistema di segnalamento convenzionale senza sistema di segnalamento in cabina e *Balise* dedicata per l'indicazione della limitazione di autorità di velocità e movimento, questo è l'inizio delle sequenze di tempo di blocco. Mentre, nel sistema di segnalamento in cabina il tempo di avvistamento è trascurabile.

### Tempo di percorrenza

Il tempo di percorrenza lungo la sezione è richiesto per l'occupazione fisica della sezione di blocco da parte del materiale rotabile; dipende dalla velocità del treno e dalla lunghezza della sezione di blocco. Sezioni di blocco corte richiedono tempi di percorrenza e linee di scorrimento più brevi. Accorciare la sezione di blocco è una strategia per diminuire i distanziamenti minimi e aumentare la capacità, ma nella tecnologia a blocco fisso, richiede attrezzature ungo linea procurando maggiori e costi di messa in servizio e manutenzione. Per risolvere queste sfide, il blocco mobile è una soluzione adatta, ma le precondizioni del materiale rotabile montato, dotato di sistemi di posizionamento e TIMS, rendono anche questa soluzione impegnativa.

### Tempo di compensazione

È il tempo necessario per liberare la sezione dal treno, quando la sua parte posteriore abbandona completamente la sezione e si sovrappone, se del caso, confermato dal contatto di rilascio nei sistemi a blocchi fissi. Il tempo di compensazione è legato alla lunghezza del treno e alla velocità di marcia. La sovrapposizione è uno spazio extra oltre il segnale di stop, che deve essere libero per fornire ulteriore margine di sicurezza, in caso di superamento o eventuali punti di conflitto oltre il segnale.

### Tempo di liberazione dell'itinerario

Il tempo necessario per la liberazione dell'itinerario è il tempo necessario per la conferma dell'altezza della sezione e dipende dalla lunghezza del treno, della sezione e della sovrapposizione, nonché dal sistema di interblocco. La Tab. 4 presenta i tempi di risposta del sistema utilizzati per l'applicazione del metodo analitico, considerati entrambi in [4] e [23].

*tem without cab signalling system and dedicated Balise for indication of speed and movement authority restriction, this is the start of blocking time sequences. Meanwhile, in cab signalling system the sighting time is negligible.*

### Travel time

*Travel time along the section is required for physical occupation of block section by rolling stock; it depends on train's speed and block section's length. Shorter block sections require shorter travel times and shorter headways. Shortening the block section is a strategy to decrease headway and increasing capacity, but in fixed block technology, it requires implementation of wayside equipment procuring higher implementation and maintenance cost. To solve these challenges, the moving block is a suitable solution but preconditions of fitted rolling stock, equipped with positioning systems and TIMS, make this solution challenging too.*

### Clearing time

*It is the time required for clearing the section by the train, when its rear completely leaves the section and overlap, if any, confirmed by release contact in fixed block systems. Clearing time tied to the train's length and running speed. The overlap is an extra space beyond the stop signal that must be clear in order to provide further safety margin, in case of overrun or possible conflict points beyond the signal.*

### Route release time

*The time for route release is the required time for confirmation of the section clearance and depends on the length of train, section and overlap, as well as on the interlocking system. Tab. 4 presents the system response times used in analytical method application, considered both in [4] e [23].*

### 7.6. Calculation of capacity consumption

*The calculation of capacity consumption by compression method straightforward and as mentioned before bases on blocking time sequence. In order to gauge the minimum headway, the first phase is the blocking time calculation, as explained in previous sections. The minimum headway results as the minimum time between two following trains without interruption  $Z_{ij}$  (Fig. 18), then the capacity consumption and finally squeeze the timetable considering the critical section with the highest capacity consumption (traffic/capacity ratios).*

*To find the critical section (bottleneck), it is necessary to estimate the capacity consumption for each section. As aforementioned, several factors affect the capacity of a line. Therefore, in order to get appropriate and precise results, it*



### 7.6. Calcolo del consumo di capacità

Il calcolo del consumo di capacità con il metodo di compressione semplice, come accennato in precedenza, si basa sulla sequenza dei tempi di blocco. Il tempo minimo di distanziamento risulta essere il tempo minimo tra due treni successivi senza interruzione  $Z_{ij}$  (Fig. 18), quindi il consumo di capacità, e quindi comprimere l'orario considerando la sezione critica con il più alto consumo di capacità (rapporto traffico/capacità).

Per trovare la sezione critica (collo di bottiglia), è necessario stimare il consumo di capacità per ogni sezione. Come già detto, diversi fattori influenzano la capacità di una linea. Pertanto, al fine di ottenere risultati appropriati e precisi, è necessario considerare tutti i fattori pertinenti durante il calcolo dei distanziamenti temporali minimi nel periodo di riferimento. Il tempo totale di utilizzazione è ottenibile con la seguente formula:

$$K = A + B + C + D$$

Dove:

- $K$  = tempo totale di utilizzo della capacità;
- $A$  = occupazione dell'infrastruttura;
- $B$  = tempo cuscinetto per stabilizzare l'orario;
- $C$  = supplemento per linee a binario singolo;
- $D$  = tempo aggiuntivo relativo alla manutenzione.

Dalla capacità totale è possibile valutare la capacità residua.

La percentuale di consumo di capacità nel tempo di riferimento è:

$$K = \frac{K \cdot 100}{t_u}$$

Tenuto conto della tipologia della linea e dei periodi di punta o giornalieri, il metodo UIC 406 fornisce alcune

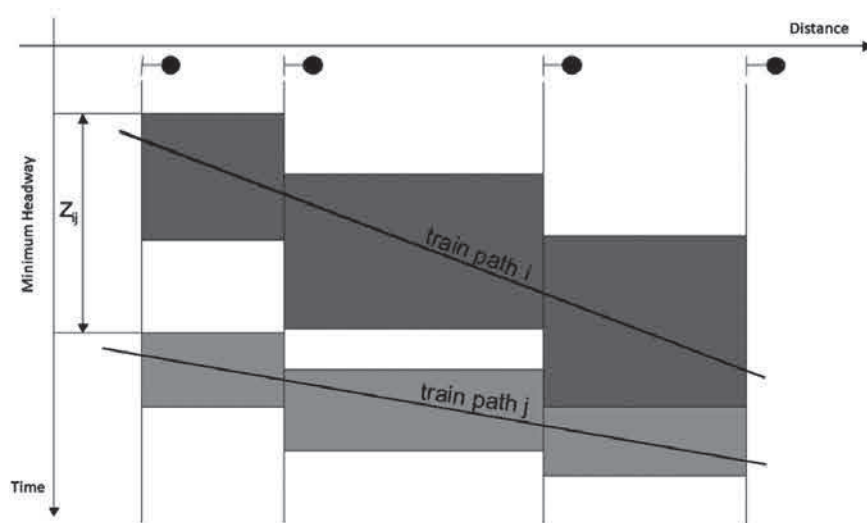


Figura 18 – Distanziamento temporale minimo [23][30].  
Figure 18 – Minimum Headway [23][30].

Tabella 4 – Table 4

Tempi di risposta del sistema utilizzati per la stima del distanziamento temporale minimo [4]

System response times utilised for estimation of minimum headway [4]

Componente / Component	ERTMS L1 [s]	ERTMS L2 [s]	ERTMS L3 [s]
LEU	0.70	-	-
EVC + DMI	1.00	-	-
Train integrity	-	-	4.00
Interlocking to RBC	-	0.05	-
Train 1 to RBC	-	1.10	1.10
RBC to Train 2	-	-	1.10
RBC	-	1.00	1.00
EVC + DMI	-	1.50	1.50
<b>TOTALE / TOTAL</b>	<b>1.70</b>	<b>3.65</b>	<b>8.70</b>

is necessary to consider all relevant factors during calculation of minimum headway in reference period. The total utilization time is obtainable with the following formula:

$$K = A + B + C + D$$

Where:

- $K$  = total capacity utilization time;
- $A$  = infrastructure occupation;
- $B$  = buffer time to stabilize the timetable;
- $C$  = supplement for single track lines;
- $D$  = maintenance related additional time.

From the total capacity utilization, it is possible to evaluate the residual capacity.

The capacity consumption percentage over the reference time  $t_u$  is:

$$K = \frac{K \cdot 100}{t_u}$$

Considering the typology of line and the peak or off-peak daily periods, UIC code 406 provides some recommendation for occupancy time (Tab. 5) and additional time to ensure an acceptable level of service by stabilizing the timetable (Tab. 6).

The compression method does not pay sufficient attention to the interrelation between traffic load, quality of service and importance of buffer time to reduce knock-on delays. Therefore, the following section gives an idea about basics of the alternative STRELE method.

Tabella 5 – Table 5

Tasso di occupazione temporale proposto [4]

*Proposed occupancy time rate lines [4]*

Tipo di linea <i>Type of line</i>	Periodo di punta <i>Peak period</i>	Intera giornata <i>Daily period</i>
Linee dedicate al traffico suburbano <i>Dedicated suburban passenger traffic</i>	85%	70%
Linee dedicate all'alta velocità <i>Dedicated high-speed line</i>	75%	60%
Traffico misto <i>Mixed-traffic</i>	75%	60%

Tabella 6 – Table 6

Tasso supplementare temporale proposto [4]

*Proposed additional time rate [4]*

Tipo di linea <i>Type of line</i>	Periodo di punta <i>Peak period</i>	Intera giornata <i>Daily period</i>
Linee dedicate al traffico suburbano <i>Dedicated suburban passenger traffic</i>	18%	43%
Linee dedicate all'alta velocità <i>Dedicated high-speed line</i>	33%	67%
Traffico misto <i>Mixed-traffic</i>	33%	67%

raccomandazioni per il tempo di occupazione (Tab. 5) e tempo supplementare per garantire un livello di servizio accettabile stabilizzando l'orario (Tab. 6).

Il metodo della compressione non presta sufficiente attenzione alla relazione tra carico di traffico, qualità del servizio e tempo cuscinetto per ridurre i ritardi secondari. Di seguito si fornisce un'idea circa i principi fondamentali del metodo alternativo di STRELE.

#### Categorizzazione dei valori di consumo di capacità

Al fine di individuare le sezioni critiche, come base per l'aggiunta di treni a un orario effettivo, i valori CC sono i seguenti:

- $CC > 100\%$ : utilizzo eccessivo, saturazione con decadimento della qualità del servizio;
- $80\% < CC < 100\%$ : basso margine di capacità;
- $CC < 80\%$ : margine di capacità utilizzabile.

Il metodo di compressione è semplice e determina l'utilizzo della capacità e la capacità residua al fine di individuare possibili servizi aggiuntivi. Non considera le interrelazioni tra il carico di traffico e i ritardi nella zona nel tempo di riferimento. Vi è un compromesso tra l'aumento del numero di treni e la qualità del servizio in termini di ritardi e tempi di attesa. La Fig. 19 mostra la correlazione tra ritardi e numero di treni (carico di traffico) e il modo in cui il loro numero crescente (livello di congestione più elevato) influenza la qualità verso un servizio inaffidabile secondo il metodo STRELE descritto nelle sezioni successive [17][23].

#### Categorization of Capacity Consumption values

*In order to identify critical sections, as a base for adding trains to an actual timetable, the CC values are the following:*

- $CC > 100\%$ : overuse, saturation with decayed quality of service;
- $80\% < CC < 100\%$ : low margin of capacity;
- $CC < 80\%$ : usable margin of capacity.

*The compression method is simple and determines the capacity utilization and the residual capacity in order to identify possible additional services. It does not consider interrelations between traffic load and delays in the area in reference time. There is a trade-off between increasing num-*

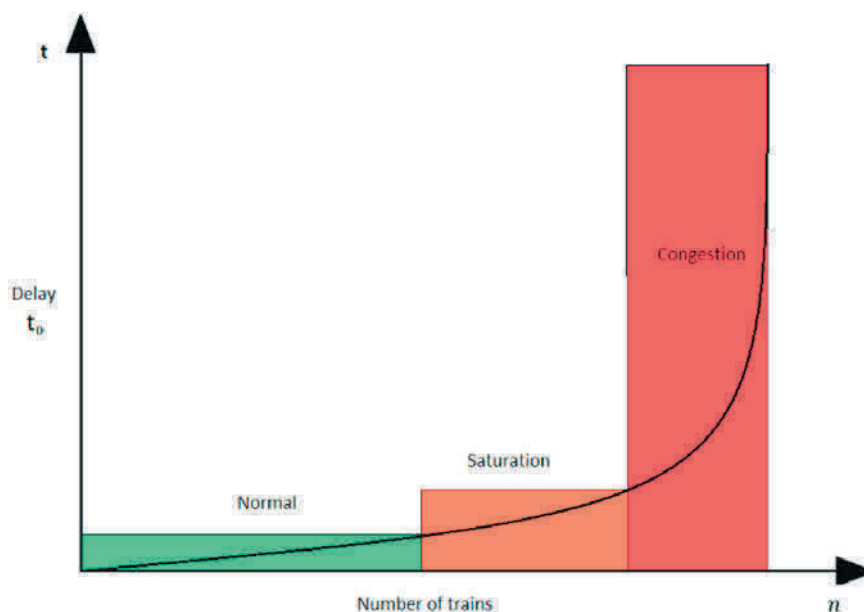


Figura 19 – Correlazione tra ritardi ( $t_D$ ) e numero di treni (carico di traffico) [2].  
Figure 19 – Correlation between delays ( $t_D$ ) and number trains (traffic load) [2].

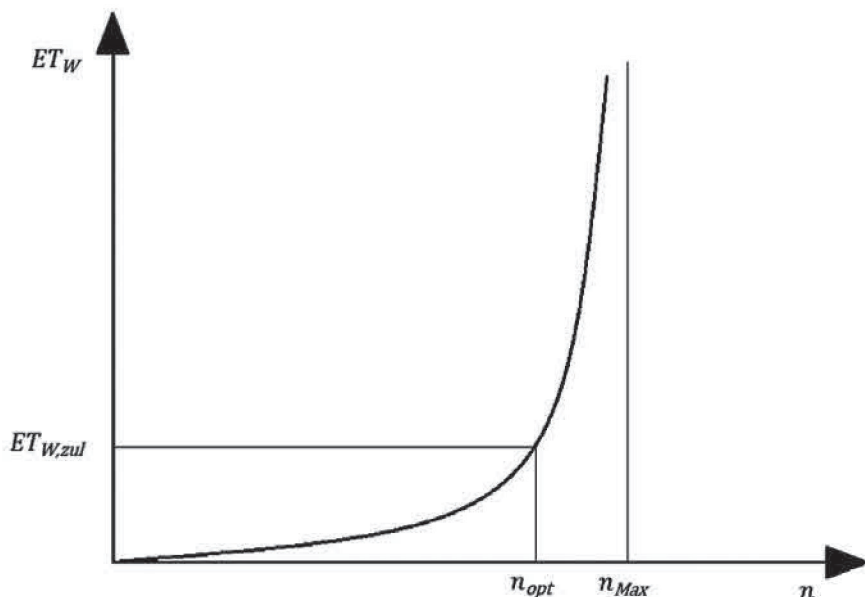


Figura 20 – Correlazione tra ritardi e carico di traffico.  
Figure 20 – Interrelation between delays and traffic load.

### 7.7. Metodo STRELE

La formula STRELE, proposta da SCHWANHÄUSSER [31][32], sfrutta la teoria delle code per studiare l'associazione dei ritardi e del carico di traffico nella zona in questione, come indicatore per la qualità del servizio. In questo metodo, il livello di misurazione del servizio è determinato da ritardi a catena e dipende dal numero di treni (carico di traffico in una data area), che aumenta rispettivamente il ritardo dei treni. Secondo questo metodo, il numero ottimale  $n_{opt}$  di treni in una data area (sulla base del distanziamento minimo) produce un ritardo secondario atteso medio  $ET_{w,zul}$  (Fig. 20) accettabile:

$$ET_w = \left( P_{VE} - \frac{P_{VE}^2}{2} \right) \frac{\bar{t}_{VE}^2}{\bar{t}_p + \bar{t}_{VE}(1 - e^{-\bar{z}/\bar{t}_{VE}})} \left( p_g \cdot (1 - e^{-\bar{z}_g/\bar{t}_{VE}})^2 + (1 - p_g) \cdot \frac{\bar{z}_v}{\bar{t}_{VE}} \cdot (1 - e^{-2\bar{z}_v/\bar{t}_{VE}}) + \frac{\bar{z}}{\bar{t}_p} \cdot (1 - e^{-\bar{z}/\bar{t}_{VE}})^2 \right)$$

Dove:

$ET_w$  = ritardi secondari;

$\bar{t}_p$  = tempo cuscinetto medio per stabilizzare l'orario e proteggere contro la propagazione del ritardo;

$\bar{z}$  = tempo medio minimo determinante di avanzamento;

$\bar{z}_g$  = tempo minimo determinativo medio di avanzamento di treni di pari tipo;

$\bar{z}_v$  = tempo minimo determinativo medio di avanzamento dei treni con successioni di tipo diverso;

$\bar{t}_{VE}$  = tempo iniziale di ritardo medio;

$P_{VE}$  = probabilità di ritardo di ingresso;

$p_g$  = probabilità di una successione di treni di pari tipo.

ber of trains and quality of service in terms of delays and waiting time. Fig. 19 shows the correlation between delays () and number trains (traffic load) and how the increasing number of them (higher congestion level) influence the quality towards an unreliable service according to STRELE method described in the next [17][23].

### 7.7. STRELE method

The STRELE formula, proposed by SCHWANHÄUSSER [31][32], exploits the queuing theory to investigate the association of delays and traffic load in the given area, as a measure for quality of service. In this method, the level of service measurement is by knock-on delays and depends on the number of trains (traffic load in given area), which respectively increases the trains' delay. According to this method, the optimal number  $n_{opt}$  of trains in a given area (based on minimum headway)

produces an acceptable expected average knock-on delay  $ET_{w,zul}$  (Fig. 20):

$$ET_w = \left( P_{VE} - \frac{P_{VE}^2}{2} \right) \frac{\bar{t}_{VE}^2}{\bar{t}_p + \bar{t}_{VE}(1 - e^{-\bar{z}/\bar{t}_{VE}})} \left( p_g \cdot (1 - e^{-\bar{z}_g/\bar{t}_{VE}})^2 + (1 - p_g) \cdot \frac{\bar{z}_v}{\bar{t}_{VE}} \cdot (1 - e^{-2\bar{z}_v/\bar{t}_{VE}}) + \frac{\bar{z}}{\bar{t}_p} \cdot (1 - e^{-\bar{z}/\bar{t}_{VE}})^2 \right)$$

Where:

$ET_w$  = secondary (knock-on) delays;

$\bar{t}_p$  = average buffer time to stabilize the timetable and protect against delay propagation;

$\bar{z}$  = average determinative minimum headway time;

$\bar{z}_g$  = average determinative minimum headway time of equal-ranking successions of trains;

$\bar{z}_v$  = average determinative minimum headway time of different-ranking successions of trains;

$\bar{t}_{VE}$  = average entry delay;

$P_{VE}$  = probability of entry delay;

$p_g$  = probability of the occurrence of an equal-ranking succession of trains.

To overcome drawbacks of compression method of UIC 406 concerning traffic load and acceptable quality of service for stabilizing the timetable, the original proposal is to determine the average buffer time by the STRELE method using the proposed occupancy time rates from UIC 406 to guarantee a satisfactory level of service [23].

$$\bar{t}_{Av,b} = \frac{\bar{z} \cdot (1 - t_{occ.})}{t_{occ.}} = \frac{A \cdot (1 - t_{occ.})}{N_t \cdot t_{occ.}}$$

Where:

Per ovviare agli inconvenienti del metodo di compressione UIC 406 per quanto riguarda il carico di traffico e la qualità accettabile del servizio per la stabilizzazione dell'orario, la proposta originaria è di determinare il tempo cuscinetto medio time con il metodo STRELE, utilizzando i tassi di tempo di occupazione proposti dall'UIC 406 per garantire un livello di servizio soddisfacente [23].

$$\bar{t}_{Av,b} = \frac{\bar{z} \cdot (1 - t_{occ.})}{t_{occ.}} = \frac{A \cdot (1 - t_{occ.})}{N_t \cdot t_{occ.}}$$

Dove:

$t_{occ}$  = valore assegnato del tasso di tempo di occupazione fornito dall'UIC 406 per quanto riguarda il tipo di linea e il periodo di riferimento;

$\bar{z}$  = tempo medio minimo determinativo di avanzamento;

$N_t$  = numero di treni in circolazione in una data area durante il tempo di riferimento.

Per calcolare il carico di traffico ottimale rispetto alla qualità attesa del servizio, il metodo STRELE propone:

$$N_{opt} = \frac{t_u}{\bar{z} + (\bar{t}_{Av,b} - \bar{t}_{Eq,b})}$$

Nella formula sopra  $\bar{t}_{Eq,b}$  sta per tempo cuscinetto equivalente. Tutti questi calcoli si basano su un tempo minimo di avanzamento, pertanto tutti i fattori pertinenti che contribuiscono alla sua determinazione devono essere oggetto di un attento esame.

## 8. Simulazione di casi di studio

### 8.1. Strumenti di simulazione

Gli strumenti di simulazione sono adatti a rappresentare al computer l'esercizio dei vari asset dell'infrastruttura ferroviaria. La complessità dell'infrastruttura e la sua interazione con il materiale rotabile, l'orario e le norme operative possono produrre un'enorme quantità di scenari. Inoltre, l'elevato costo della costruzione delle infrastrutture richiede una metodologia di pianificazione adeguata per evitare costi aggiuntivi.

I modelli di simulazione possono funzionare secondo approcci microscopici o macroscopici, a seconda dello scopo dello studio. I modelli macroscopici sono adatti per studi meno dettagliati, sono semplici ma meno precisi e realistici dei modelli microscopici. I modelli microscopici sono adatti per modellare la dinamica di marcia del materiale rotabile in interazione con l'infrastruttura e l'orario in dettaglio; di conseguenza, essi richiedono una maggiore quantità di dati e possono richiedere più tempo [33], anche se i loro risultati possono raggiungere un'elevata precisione [34].

In questo studio, al fine di valutare il consumo di capacità dei diversi sistemi di segnalamento, lo strumento di simulazione utilizzato è RailSys, attualmente in uso in Germania e nei paesi scandinavi, tra cui la Svezia e, in partico-

$t_{occ}$  = assigned value of occupancy time rate provided by UIC 406 with regards to type of line and reference time period;

$\bar{z}$  = average determinative minimum headway time;

$N_t$  = number of running trains in given area during reference time.

In order to calculate the optimal traffic load with respect to the expected quality of service, STRELE method proposes:

$$N_{opt} = \frac{t_u}{\bar{z} + (\bar{t}_{Av,b} - \bar{t}_{Eq,b})}$$

In the formula above the  $\bar{t}_{Eq,b}$  stands for equivalent buffer time. All these calculations bases on minimum headway time, therefore all relevant factors contributing to its determination must be under careful consideration.

## 8. Case study simulation

### 8.1. Simulation tools

Simulation tools are suitable to represent multiple assets of the railway infrastructure on a computer. The complexity of infrastructure and its interaction with rolling stock, timetable and operational rules may produces a huge amount of scenarios. Furthermore, high cost of infrastructure construction requires an appropriate planning methodology to avoid additional costs.

Simulation models can work both according to microscopic and macroscopic approaches, depending on the purpose of study. Macroscopic models are suitable for less detailed studies, they are simple and but less precise and realistic of microscopic models. The microscopic models are suitable for modelling dynamics of rolling stocks in interaction with infrastructure and timetable in detail; consequently, they require larger amount of input data and can result as time consuming [33], though their results can reach high precision [34].

In this study, in order to evaluate capacity consumption of different signalling systems, the used simulation tool is RailSys, currently in use in Germany and Scandinavian countries, including Sweden and, specifically, at the Swedish Transport Administration (Trafikverket). This section deals with evaluation of capacity consumption of different signalling system in order to evaluate the effectiveness of ERTMS/ETCS L3 of full moving block system in comparison with ERTMS/ETCS L2 and ATC2 using RailSys.

### 8.2 Case study

This section explains the case study area and the main characteristics of infrastructure and operating rolling stocks. Fig. 21 represents this area: screenshot from Open Railway Map (left) and infrastructure representation designed in RailSys (right).



lare, presso la Swedish Transport Administration (Trafikverket). La presente sezione riguarda la valutazione del consumo di capacità dei diversi sistemi di segnalamento al fine di valutare l'efficacia del L3 dell'ERTMS/ETCS a blocco mobile rispetto all'ERTMS/ETCS L2 e all'ATC2 utilizzando Railsys.

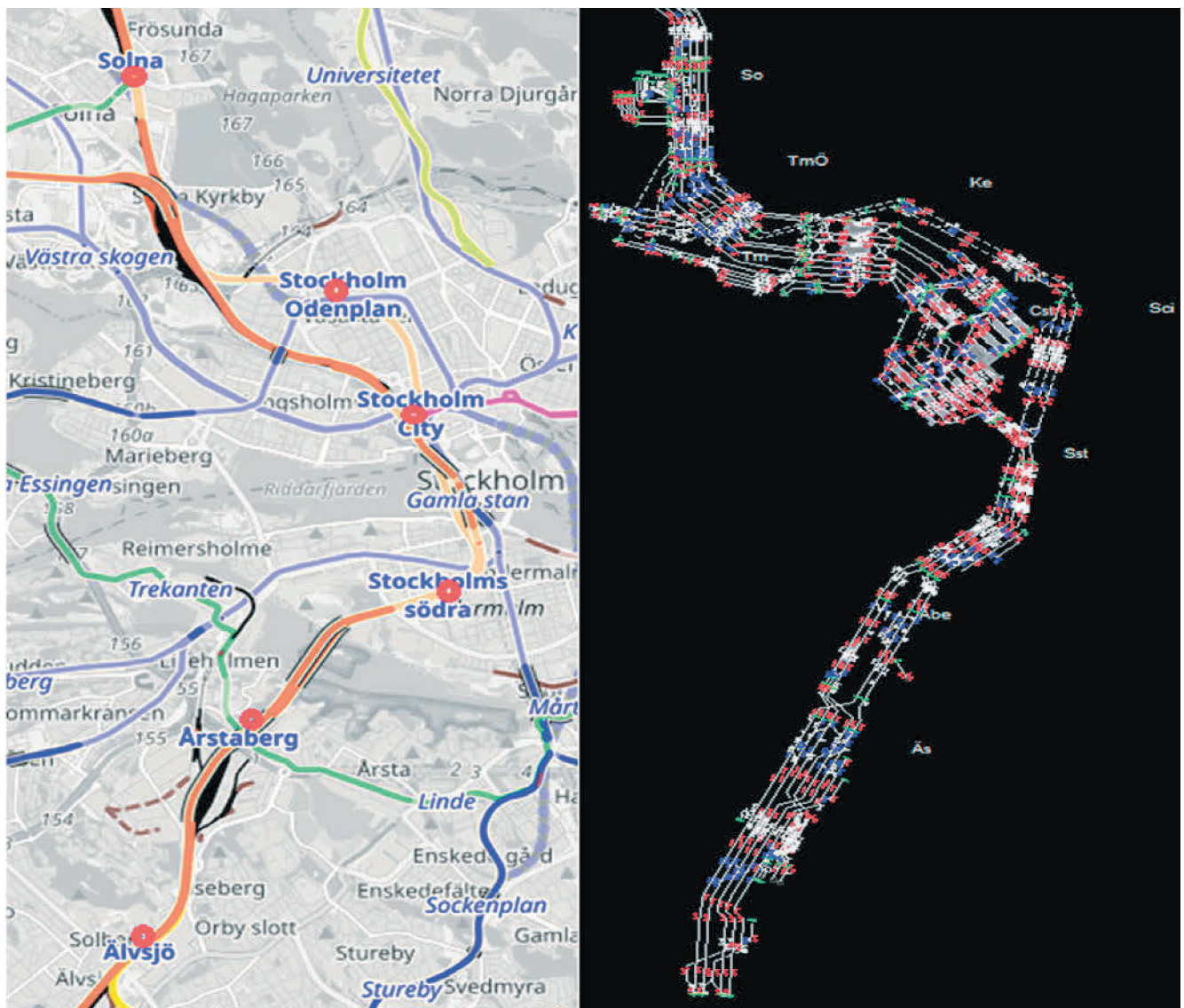
### 8.2. Il caso di studio

Questo capitolo descrive l'area del caso di studio e le principali caratteristiche dell'infrastruttura e del materiale rotabile in esercizio. La Fig. 21 rappresenta quest'area: screenshot da Open Railway Map (a sinistra) e schematizzazione dell'infrastruttura di progetto in Railsys (a destra).

*The case study area is on Western main line (Northbound) of Citybanan from Älvsjö entering to Stockholm passing through four stations in parallel with the City line to reach Solna. The length of the double track line is approximately 13 km. The city line is a 7.4 km long double track electrified and reserved for commuter trains traffic (Stockholms pendeltåg), serving Stockholm city and Odenplan stations. The operating vehicles of both services must meet the same performance requirements (slope conditions, dynamic reference profile, etc.).*

#### Rolling stocks characteristics

*The City line has a homogeneous traffic within the case study area. Tab. 7 shows the characteristics of X60 com-*



(Fonti - Source: Openrailwaymap, Railsys)

Figura 21 – Caso di studio Stockholm City line Älvsjö – Solna.

Figure 21 – Case study Stockholm City line Älvsjö – Solna.

L'area del caso di studio ricade sulla linea principale occidentale (in direzione nord) della Citybanan, che da Älvsjö entra a Stoccolma passando attraverso quattro stazioni in parallelo con la linea City per raggiungere Solna. La lunghezza della linea è di circa 13 km a doppio binario elettrificato, con 7,4 km riservati al traffico dei treni pendolari (*Stockholms pendeltåg*), che serve le stazioni della city di Stoccolma e Odenplan. Tutti i servizi hanno gli stessi requisiti di prestazione (condizioni di pendenza, profilo dinamico di riferimento, ecc.).

#### Caratteristiche del materiale rotabile

La Citybanan ha un traffico omogeneo all'interno dell'area del caso di studio. La Tab. 7 mostra le caratteristiche dei treni pendolari X60 che effettuano servizi pendolari a Stoccolma, composti da due unità, ciascuna lunga 107 m, per un totale di 214 m. La Tab. 8 mostra i corrispondenti valori della decelerazione assegnati a Railsys. La Fig. 22 mostra la configurazione schematica dell'infrastruttura per la direzione Sud-Nord.

La Tab. 9 presenta ID, acronimi, nomi, distanza relativa e assoluta tra le stazioni.

#### Impostazione dell'itinerario e tempi di liberazione

Il tempo di preparazione dell'itinerario è necessario per preparare l'itinerario e riservarlo per l'ingresso sicuro di un treno, sulla base dell'apparato centrale e dei relativi componenti. I tempi di preparazione e di rilascio dell'itinerario sono supposti di 10 s come per gli apparati svedesi in esercizio, senza introdurre differenze tra ATC e ERTMS/ETCS.

Tabella 9 – Table 9

Dettagli sulle stazioni consecutive nell'area del caso di studio

*Details of consecutive stations in the case study area*

ID stazione Station ID	Nome stazione Station Name	Lunghezza sezione [km] Section Length [km]	Vmax [km/h] Vmax [km/h]
Äs	Älvsjö	-	120
Åbe	Årstaberg	2.655	80
Sst	Stockholm Södra	2.439	80
Sci	Stockholm City	2.559	80
Sod	Stockholm Odenplan	1.596	103
TmÖ	Tomtebodavägen	1.878	103
So	Solna	1.985	

Tabella 7 – Table 7

Caratteristiche del materiale rotabile (due unità X60)

*Characteristics of rolling stock (two X60 units)*

Nome Name	Categoria Category	Lunghezza [m] Length [m]	Massa [t] Mass [t]	Sforzo di trazione massimo [kN] Max traction force [kN]
X60-X60	Pendolari Commuter	214	512	343.5

Tabella 8 – Table 8

Valori di decelerazione assegnati secondo il sistema di segnalamento

*Assigned deceleration values according to the signalling system*

Nome Name	Categoria Category	Accelerazione ETCS L2 [m/s²] Deceleration ETCS L2 [m/s²]	Accelerazione ATC2 [m/s²] Deceleration ATC2 [m/s²]
X60-X60	Pendolari Commuter	0.6	0.6

*muter trains operating Stockholm commuter services composed of two units, 107 m long each, with a total of 214 m. Tab. 8 shows the same deceleration rates assigned in RailSys. Fig. 22 shows the schematic infrastructure layout for the South-North route.*

*Tab. 9 presents IDs, acronyms, names, consecutive and real distance between stations.*

#### Route setting and release times

*The route setting time is required to set the route and reserve it for the safe entering of a train, basing on interlocking system and related components. Interlocking setting and release times assumed as 10 s from Swedish equipment in operation, without introducing differences between ATC and ERTMS/ETCS.*

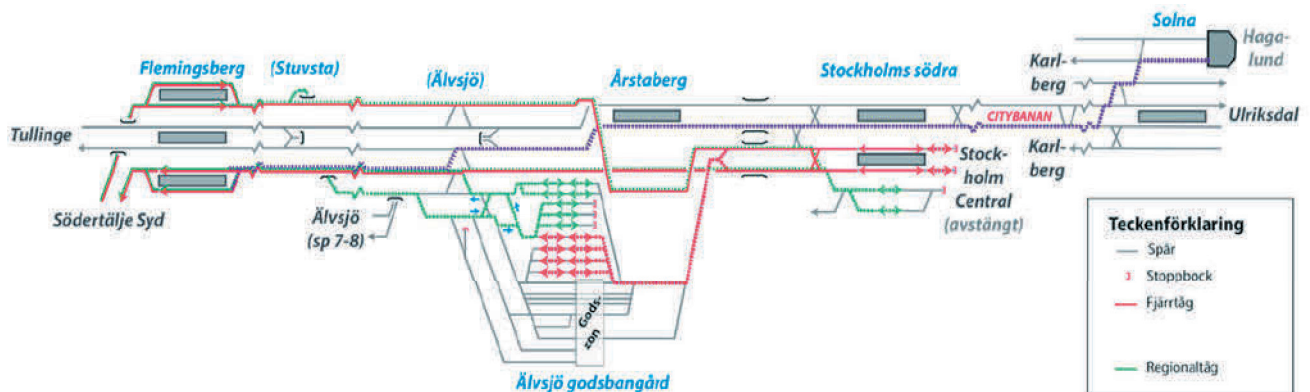
#### National values

*In order to simulate ERTMS/ETCS, it is necessary to introduce national safety values for operating with ERTMS/ETCS signalling systems, which may change from country to country and at the borders between them. This study uses Swedish national values.*

#### Timetable

*For calculation of capacity consumption, the reference timetable for simulation period has the characteristics pre-*





Treno ad alta velocità con capolinea Stoccolma gira a sud direttamente o si dirige alla stazione merci Älvsjö per girarsi / prepararsi (da nord).

*High-speed train with terminus Stockholm's south turns directly or runs to Älvsjö freight station for turning / setting up (from the north).*

I treni regionali e interregionali con capolinea Flemingberg funzionano come treni di servizio per la stazione merci di Älvsjö (da sud).

*Regional and interregional trains with terminus Flemingberg run as service trains to Älvsjö freight station (from the south).*

I binari sud di Stoccolma 5-6 consentono inversioni e giri di locomotive per treni senza passeggeri.

*Stockholm's southern tracks 5-6 enable turning and locomotive tours for trains without passengers.*

I treni commerciali per / da Hagalund (così come i treni postali) operano via Citybanan.

*Commercial trains to / from Hagalund (as well as postal trains) operate via Citybanan.*

Figura 22 – Utilizzo della sezione Flemingberg - Solna [34].

Figure 22 – Track use on the section Flemingberg - Stockholm's Södra [34].

## Valori nazionali

Al fine di simulare l'ERTMS/ETCS, è necessario introdurre valori nazionali di sicurezza per l'esercizio con i sistemi di segnalamento ERTMS/ETCS, che possono cambiare da paese a paese e alle frontiere tra di essi. Questo studio utilizza valori nazionali svedesi.

## Orario

Per il calcolo del consumo di capacità, l'orario di riferimento per il periodo di simulazione presenta le caratteristiche illustrate nella Fig. 23. La simulazione riguarda il traffico omogeneo dei treni pendolari (Ptag\_X60- X60) nei periodi di punta mattutini 6:00-8:00.

La linea nella City di Stoccolma ha il tempo di permanenza più lungo (120 s). L'intervallo di tempo più impegnativo è 7:00-8:00 a causa del flusso di traffico in entrata a Stoccolma lungo la direzione nord. La sezione critica, con il più alto tempo di occupazione, è Stockholms Södra - Stockholm City (Sst-Sci) con una frequenza di 16 treni/ora e la sezione blocco più critica si trova a Stockholm

sented in Fig. 23. The simulation concerns the homogeneous traffic of commuter trains (Ptag\_X60- X60) during morning peak periods 6:00-8:00.

Stockholm City line has the highest dwell time (120 s). The most demanding time interval is 7:00-8:00 due to the entering traffic flow to Stockholm along the Northbound. The critical section, with the highest occupation time, is Stockholms Södra - Stockholm City (Sst-Sci) with a frequency of 16 trains/hour and the most critical block section is located at Stockholm City. The regular running time pattern from Älvsjö to Solna, with scheduled stops in all stations except Tomtebodavägen, is 45 minutes during the reference time.

## RailSys settings

The train types in RailSys national model include different categories with ERTMS/ETCS settings. Brake percentage depends on the composition of the train and the type and correspond to deceleration value [m/s<sup>2</sup>] for the service brake. In RailSys, the driver assumes a lower deceleration, according to the P-curve. The additional time depends on

City. L'orario regolare da Älvsjö a Solna, con fermate programmate in tutte le stazioni tranne Tomtebodas Övre, è di 45 minuti durante l'orario di riferimento.

### Impostazioni di Railsys

I tipi di treno nel modello nazionale Railsys comprendono diverse categorie con impostazioni ERTMS/ETCS. La percentuale di frenatura dipende dalla composizione e dal tipo di treno e corrisponde al valore di decelerazione [ $m/s^2$ ] per il freno di servizio. In Railsys, il macchinista presume una decelerazione inferiore, secondo la curva P. Il tempo supplementare dipende dalla lunghezza del treno e la velocità consentita dipende dalla percentuale di frenatura.

Tutti i segnali necessitano di sovrapposizioni di 100 m (salvo diversa ipotesi) per il corretto calcolo delle curve di frenatura. È possibile avere sovrapposizioni più brevi, ma ciò influisce sul calcolo delle curve di frenatura in modo che diventino più restrittive (tutte le curve sono spostate all'indietro), che si traduce in una minore decelerazione e tempi di funzionamento più lunghi.

La sovrapposizione corrisponde alla distanza di protezione in ATC2 (distanza che deve essere libera davanti al punto limite del segnalamento da veicoli fermi e in movimento). La regola di base è che 100 m di distanza di protezione devono sempre esserci davanti ai segnali per l'applicazione del controllo a 40 km/h, ma, secondo le norme di progettazione vigenti, è applicabile anche in caso di distanza di protezione da 50 a 99 m. A distanze di protezione più brevi, il monitoraggio dei segnali è inferiore a 10 km/h.

Attualmente non esiste una funzione in Railsys per distinguere diverse velocità di rilascio per segnali diversi sotto ERTMS/ETCS, ma ciò è possibile sotto ATC2. Pertanto, la velocità di rilascio è impostata a 40 km/h per tutti i segnali nell'ERTMS/ETCS. La necessità di differenziare il tasso di rilascio è minore in ETCS, a causa dell'aggiornamento continuo, ma per la frenatura del macchinista interessato da una velocità di monitoraggio inferiore, la decelerazione diventa inferiore.

### 8.3. Ipotesi

Nel calcolo di percorrenza di Railsys si presume che il conducente segua la curva P, che è calcolata sulla base della decelerazione del freno di servizio (SBD) o della decelerazione del freno di emergenza (EBD) a seconda di

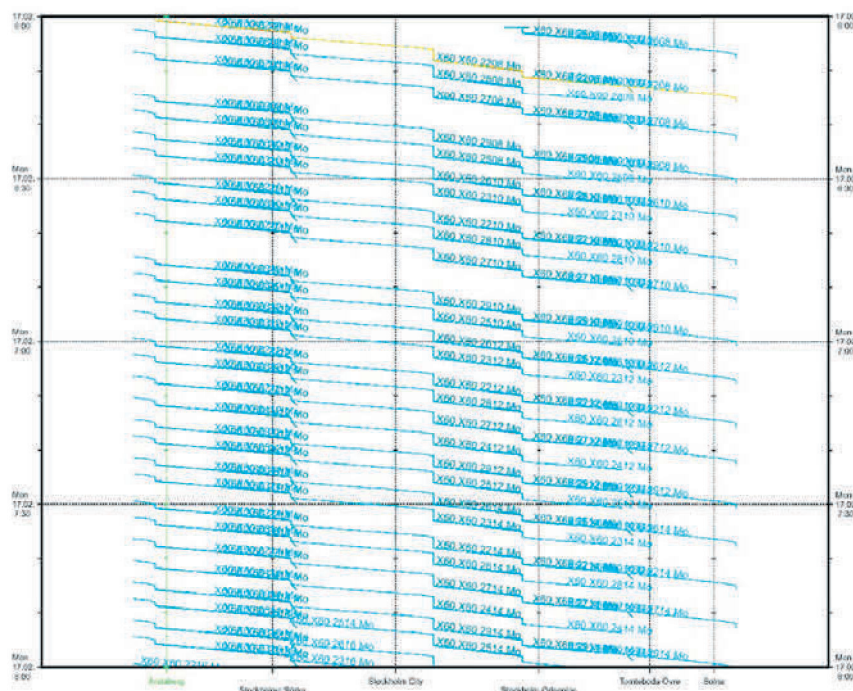


Figura 23 – Orario grafico (Älvsjö - Solna).  
Figure 23 – Graphical timetable (Älvsjö - Solna).

*the length of the train and the allowed speed depends on the brake percentage.*

*All signals need 100 m (unless differently supposed) overlaps for correct calculation of brake curves. It is possible to have shorter overlaps, but it affects the calculation of the brake curves so that they become more restrictive (all the curves are moved backwards), which results in lower deceleration and longer running times.*

*The overlap corresponds to the protection distance in ATC2 (distance that must be free in front of the signal point against stationary vehicles and vehicles in motion). The basic rule is that 100 m of protection distance must be in front of the signals for the application of 40 km/h monitoring, but, according to current design rules, it is applicable also in case of 50-99 m protection distance. At shorter protection distances, the signals monitoring is under 10 km/h.*

*At present, there is no function in RailSys to distinguish different release rates for different signals under ERTMS/ETCS, but this is possible under ATC-S. Therefore, the release speed is set at 40 km/h for all signals in the ERTMS/ETCS. The need to differentiate the release rate is lower in ETCS, due to the continuous update, but for driver's braking affected by a lower monitoring speed, the deceleration becomes lower.*

### 8.3 Assumptions

*In runtime RailSys calculation, the driver is assumed to follow the P-curve, which is calculated basing on Service*



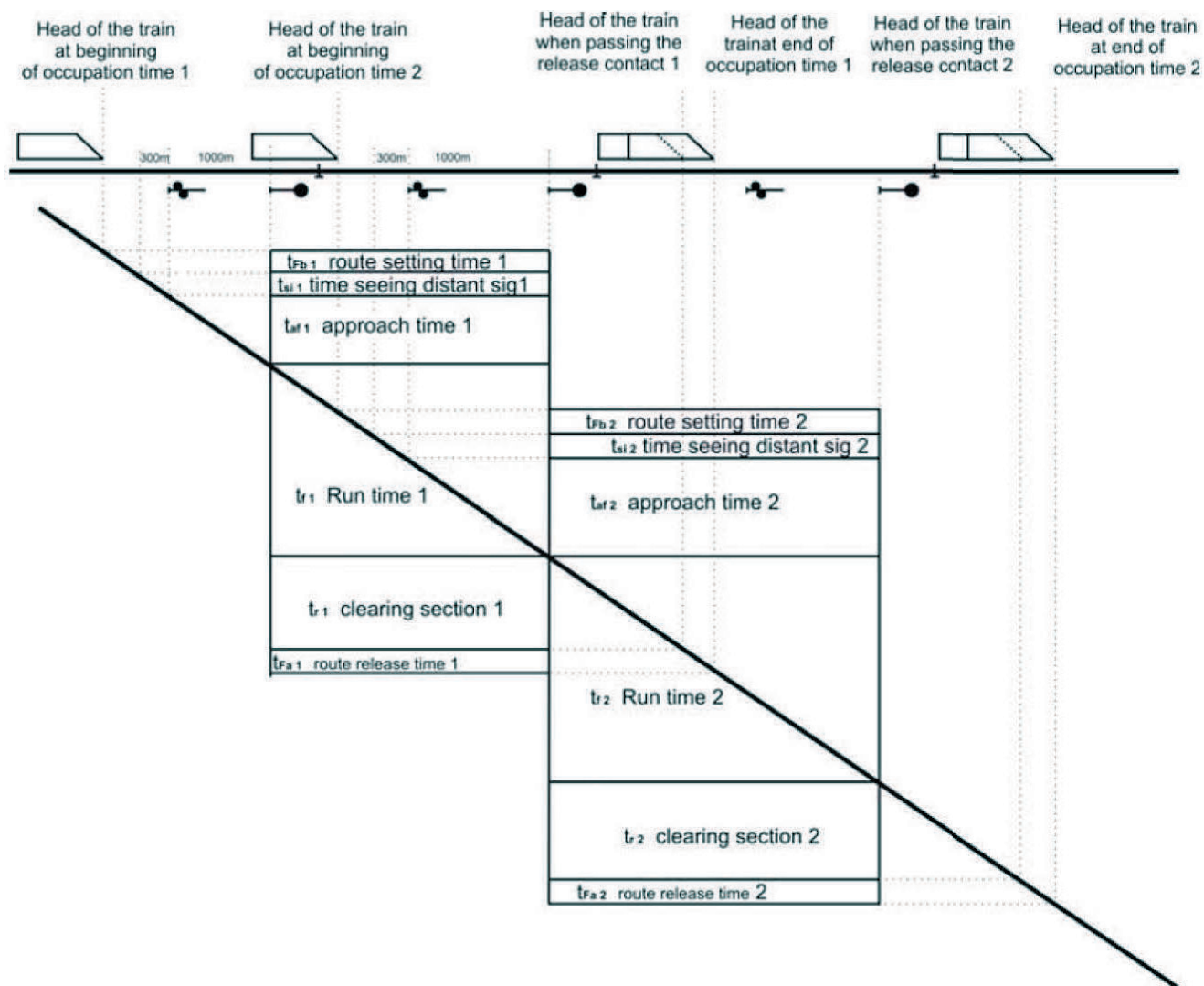


Figura 24 – Tempo di occupazione standard della sezione principale e della sezione di blocco (Manuale di Railsys).  
 Figure 24 – Standard main and pre-signals block section occupation time (RailSys Manual).

come è impostato il sistema di bordo. La curva P include un tempo fisso prima di SBD e di EBD, che dipende dal tempo di reazione del macchinista durante l'applicazione della frenatura del treno. Ciò corrisponde ad una curva di frenata con decelerazione decrescente. Per evitare decelerazioni a bassa velocità, la velocità di rilascio è impostata a 40 km/h, il che significa che l'ETCS monitora la velocità del treno fino a 40 km/h.

Per il blocco mobile dobbiamo considerare il tempo di blocco dinamico che divide la ferrovia in sezioni di blocco virtuali molto brevi (50 m). Per l'ETCS L3 le sequenze di tempo di blocco comprendono sezioni di blocco, lunghezza del treno, distanza di frenatura e margine di sicurezza (Fig. 24). A causa delle limitazioni delle sezioni vicine, il tempo di esecuzione per sezioni molto brevi e per quote elevate può essere più o meno lungo del previsto.

*Brake Deceleration (SBD) or Emergency Brake Deceleration (EBD) depending on how the on-board system is set. The P-curve includes a fixed time before SBD and EBD, which depends on the driver's reaction time the train's braking application. This corresponds to a braking curve with decreasing deceleration. To avoid deceleration at low speeds, the release speed is set to 40 km/h, which means that ETCS monitors the train's speed down to 40 km/h.*

*For Moving Block, we need to consider dynamic blocking time dividing railway into very short (50 m) virtual block sections. For ETCS L3 the blocking time sequences includes block sections, train's length, braking distance and safety margin (Fig. 24). Because of the limitations from neighbouring sections, the run time for very short sections and high allowances sometime can be shorter or longer than planned one.*

#### 8.4. Scenari

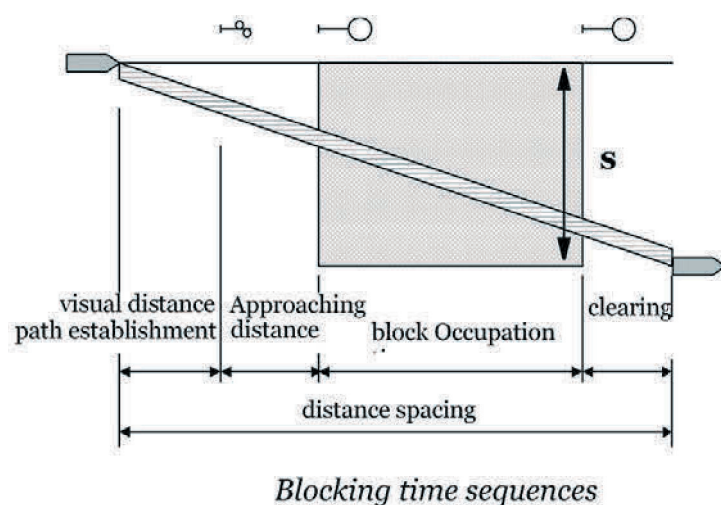
In generale, per il modello analitico e per il modello di simulazione, per calcolare il consumo di capacità e l'efficacia dell'ERTMS/ETCS di Livello 3 sulla capacità, è stata elaborata un'analisi comparativa comprendente tre diversi scenari:

1. situazione attuale della linea con traffico omogeneo di treni pendolari, dotati di ATC2;
2. aggiornamento all'ERTMS L2 con configurazione dell'infrastruttura corrente;
3. linea equipaggiata con ERTMS L3 FMB.

Il metodo della *Fiche UIC 406* è stato sviluppato per studiare il sistema di segnalamento convenzionale basato su sequenze di tempi di blocco. Secondo questo approccio, il sistema a blocco mobile funziona come una banda di bloccamento continua, risultante da concessioni e cancellazioni dell'autorizzazione al movimento [8][21]. I risultati confermano, come previsto, che il sistema a blocco mobile fornisce distanziamenti temporali più brevi. È una conferma dell'adeguatezza e dell'affidabilità della metodologia, come risulta dall'analisi degli scenari nelle sottosezioni seguenti.

##### Scenario 1

Questo scenario tiene conto della situazione attuale della linea, della configurazione dell'infrastruttura e dell'orario. Il sistema è dotato di ATC2, sistema di segnalamento tradizionale in Svezia, con profilo di velocità reale. La linea è dotata di sequenza temporale di blocco basata su segnali ottici di avviso e principali (Fig. 25).



#### 8.4 Scenarios

In general, for both analytical and simulation model, in order to calculate the capacity consumption and the effectiveness of ERTMS/ETCS Level 3 on capacity a comparative analysis has been designed including three different scenarios:

1. current situation of the line with homogeneous traffic of commuter trains, equipped with ATC2;
2. upgrade to ERTMS L2 with current infrastructure configuration;
3. line equipped with ERTMS L3 FMB.

The UIC Code 406 method has been developed to investigate conventional signalling system based on blocking time sequences. Therefore, to model the ERTMS L3 FMB the recommended approach by revised version of UIC Code 406 is used. According to this approach, the moving block system works as a continuous blocking-time band, resulting from issues and cancellations of Movement Authority [8] [21]. The results confirm, as expected, that the moving block system provide with shorter headway. It is a confirmation of the appropriateness and reliability of the methodology, as from the analysis of scenarios in the following subsections.

##### Scenario 1

This scenario considers the current situation of line, infrastructure configuration and timetable. The system is equipped with ATC2, legacy-signalling system in Sweden, with actual speed profile. The line is equipped with blocking time sequence based on distant and main optical signals (Fig. 25).

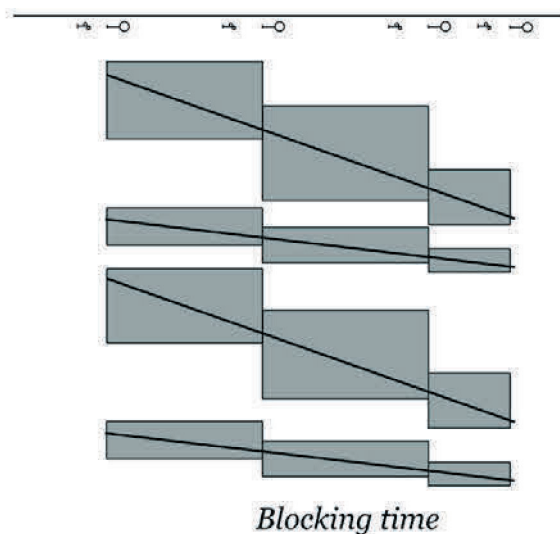


Figura 25 – ATC2 nello Scenario 1.  
Figure 25 – ATC2 in Scenario 1.

## Scenario 2

Questo scenario presuppone che la linea e il materiale rotabile siano dotati di ERTMS/ETCS di livello 2, che i segnali ottici non esistano più e che i pannelli segnaletici identifichino i binari. I pannelli segnaletici hanno diverse funzioni, come l'indicazione delle estremità delle MA e la protezione dei punti pericolosi, come interruttori, giunzioni e sezioni di blocco. Il processo di frenatura inizia in corrispondenza ai punti di indicazione (Fig. 26).

## Scenario 3

In questo scenario è in funzione il sistema ERTMS L3 Moving Block. Le sequenze dei tempi di blocco sono composte da sezioni di blocco di 50 m, lunghezza del treno, distanza di frenatura e margine di sicurezza considerando l'imprecisione intrinseca della misurazione della velocità. Non ci sono sezioni di blocco fisico ma brevi sezioni fittizie, basate su componenti che operano con rilascio continuo e cancellazione della curva di frenatura.

## 9. Risultati

### 9.1. Risultati dell'applicazione del metodo analitico

#### Scenario 1 (ATC2)

Nello scenario 1, la linea è dotata di ATC2, il sistema di segnalamento svedese. Lungo i tratti intermedi, in cui i treni circolano a velocità costante, i valori del distanziamento e del consumo di capacità sono inferiori a quelli dei tratti in cui si verificano processi di accelerazione e decelerazione. Stockholm City, con il più alto tempo di percorrenza (120 s) è la sezione più critica lungo la linea, con rispettivamente 216 s di distanziamento temporale e il 94% della capacità consumata. Le resistenze al moto,

## Scenario 2

*This scenario assume that line and rolling stock are equipped with ERTMS/ETCS Level 2, the optical signals are no longer there and marker-boards countersign the tracks. The marker-boards have several responsibilities, such as indication of ends of MA and protection of danger points, such as switches, junctions and block sections. The braking process starts at Indication Points (Fig. 26).*

## Scenario 3

*In this scenario, it is in operation the ERTMS L3 Moving Block system. The blocking time sequences are composed of 50 m block sections, train's length, braking distance and safety margin considering the intrinsic inaccuracy of speed measurement. There are no physical block sections but short fictive sections, based on components, which operate with continues release and cancelation of braking curve.*

## 9. Results

### 9.1. Analytical method's results

#### Scenario 1 (ATC2)

*In scenario 1, the line is equipped with ATC2, the Swedish signalling system. Along the intermediate sections, in which trains run at constant speed, the values of headway and capacity consumption are lower than in sections where acceleration and deceleration processes occur. Stockholm City, with highest dwell time (120 s) is the most critical section along the line, with respectively 216 s headway and 94% of consumed capacity. The running resistances, not considered in the calculation, could affect the results in sections with higher gradients. The resulting capacity con-*

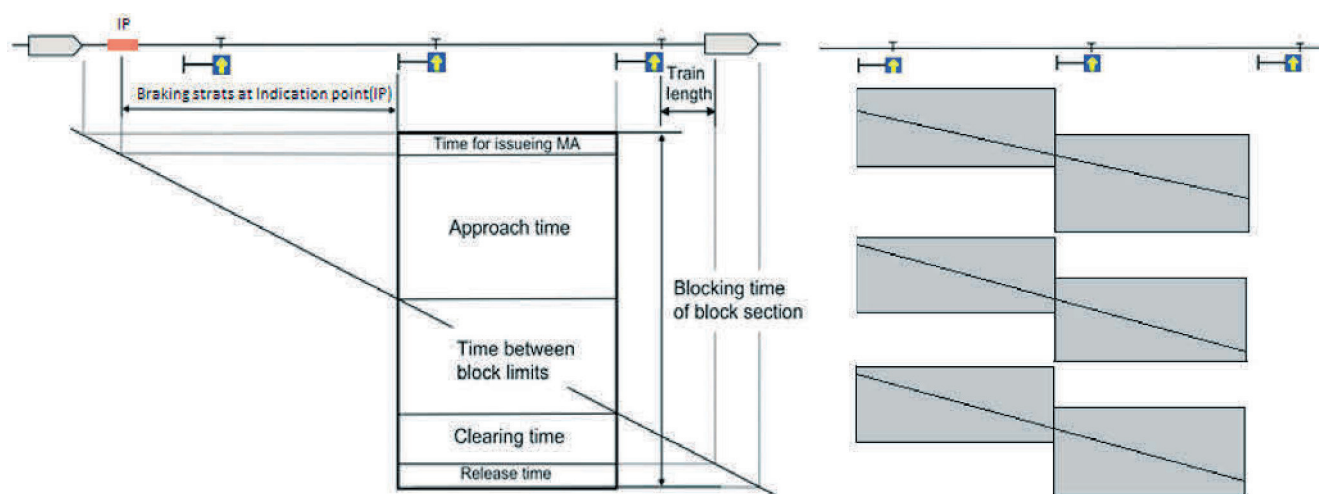


Figura 26 – ERTMS L2 nello Scenario 2.  
Figure 26 – ERTMS L2 in Scenario 2.



non considerate nel calcolo, potrebbero influenzare i risultati in sezioni con pendenze maggiori. Il conseguente consumo di capacità oltre l'80% lascia concludere che la linea non è idonea ad accogliere servizi aggiuntivi. In questa situazione, un tempo cuscinetto è consigliabile per garantire ad assorbire ritardi minori e aumentare robustezza e affidabilità dell'orario.

## Scenario 2 (attuazione dell'ERTMS/ETCS L2)

In questo scenario, abbiamo ipotizzato che la linea sia stata aggiornata a ERTMS/ETCS L2 e il profilo di velocità sia stimato in base al tempo di reazione ERTMS/ETCS L2. L'inizio della curva di accelerazione è in corrispondenza al punto di indicazione e la sua posizione dipende da diversi fattori, come il profilo dell'infrastruttura e in particolare le caratteristiche del materiale rotabile. I risultati mostrano che l'aggiornamento di ATC2 all'ERTMS/ETCS L2 potrebbe contribuire leggermente a migliorare la capacità. Come punto di riferimento, nella sezione Stockholm City, i distanziamenti temporali sono 204 s e il consumo di capacità è dell'89%, con un miglioramento del 5% rispetto all'ATC2. Tale modesto miglioramento potrebbe essere utile per aumentare la qualità del servizio, ma non sufficiente per programmare più treni su questa linea.

## Scenario 3 (attuazione dell'ERTMS/ETCS L3)

Nello scenario 3 la linea è dotata di ERTMS/ETCS L3. In questo scenario il tempo di blocco dipende da sezioni di blocco fittizie (50 m), la lunghezza del treno e la distanza di frenatura dalla velocità massima consentita e dal margine di sicurezza a una distanza fissa di 150 m. I risultati mostrano che il sistema a blocco mobile consente distanziamenti temporali minori rispetto a ERTMS/ETCS L2 e ATC2. La Fig. 27 e la Fig. 28 mostrano i risultati con i vari sistemi di segnalamento. Il distan-

*sumption over 80% let conclude that the line is not suitable for additional services. In this situation, a buffer time is recommendable to guarantee to absorb minor delays and to increase robustness and reliability of the timetable.*

## Scenario 2 (implementation of ERTMS/ETCS L2)

*In this scenario, we assumed the line upgraded to ERTMS/ETCS L2 and the speed profile estimated according to ERTMS/ETCS L2 reaction time. The start of acceleration curve bases on Indication Point and its position depends on several factors, such as infrastructure profile and especially the rolling stock characteristics. The results show that upgrading ATC2 to ERTMS/ETCS L2 could slightly help to improve the capacity. As a benchmark, in Stockholm City critical section, the headway is 204 s and the capacity consumption is 89%, with a 5% of improvement respect to ATC2. Such modest improvement could be helpful to increase the quality of service but not sufficient to schedule more trains on this line.*

## Scenario 3 (implementation of ERTMS/ETCS L3)

*In scenario 3, the line is equipped with ERTMS/ETCS L3. In this scenario the blocking time depends on fictive block sections (50 m), the train's length and the braking distance from the maximum allowed speed and the safety margin at a fixed distance of 150 m. The results show that the moving block system offers shorter headway comparing to ERTMS/ETCS L2 and ATC2. Fig 27 and Fig. 28 show the results with the various signalling systems. The headway is significantly shorter critical at the critical section (Stockholm city): 20 s of headway reduction and 12% of capacity consumption saving. These results demonstrate the effectiveness of moving block in comparison with the other two systems.*

*Tab. 11 shows average values of total capacity consumption, occupation time and average headway consider-*

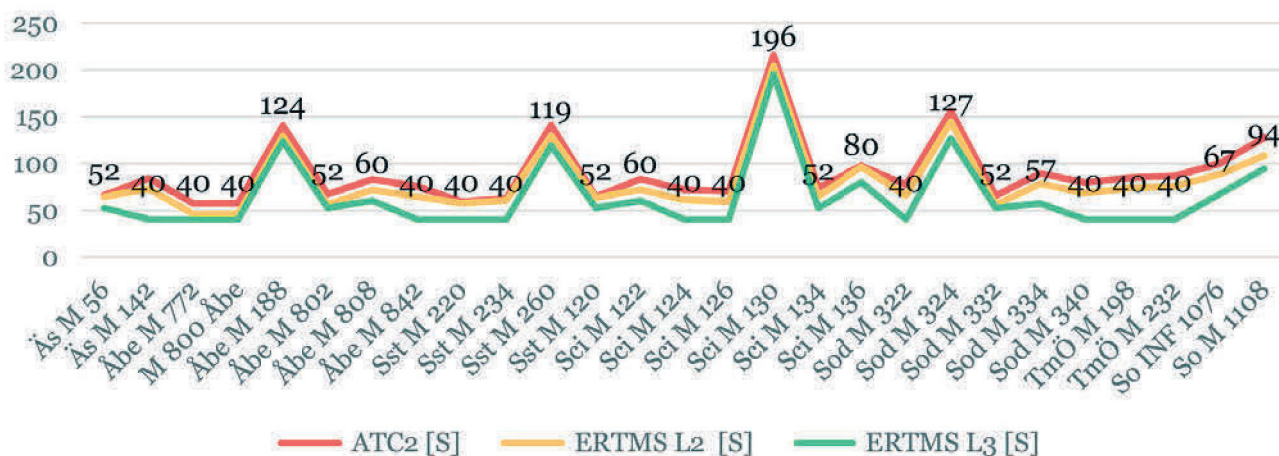


Figura 27 – Metodo analitico – distanziamenti temporali in [s] con ERTMS/ETCS L3 vs ERTMS/ETCS L2 e ATC2.  
Figure 27 – Analytical method - headway [s] with ERTMS/ETCS L3 vs ERTMS/ETCS L2 and ATC2.



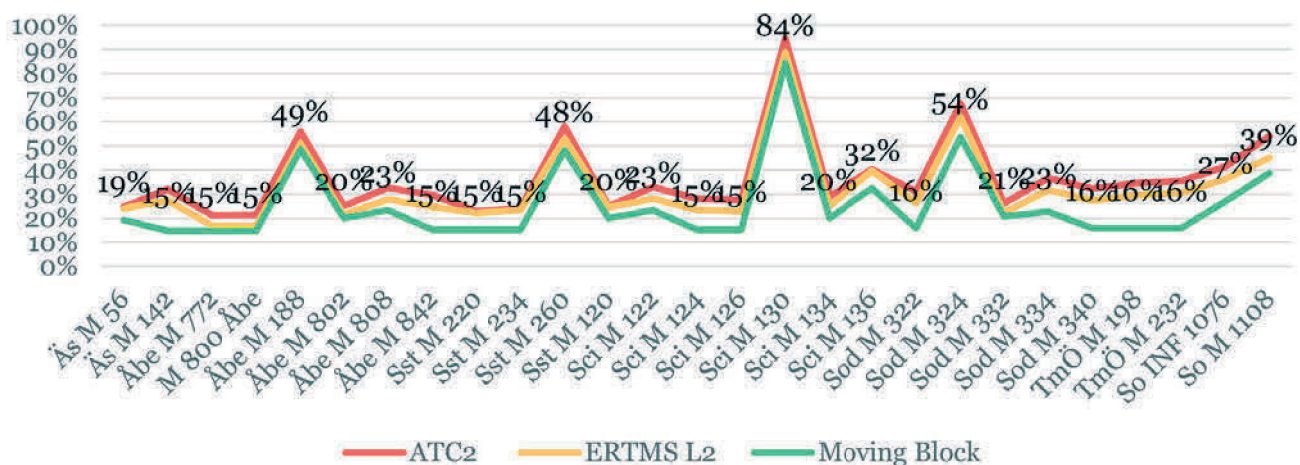


Figura 28 – Metodo analitico - consumo di capacità [%] con ERTMS/ETCS L3 vs ERTMS/ETCS L2 e ATC2.  
Figure 28 – Analytical method - capacity consumption [%] with ERTMS/ETCS L3 vs ERTMS/ETCS L2 and ATC2.

ziamento temporale è significativamente meno critico nella sezione critica (Stockholm City): 20 s di riduzione di distanziamento temporale e il 12% di risparmio nel consumo di capacità. Questi risultati dimostrano l'efficacia del blocco mobile rispetto agli altri due sistemi.

La Tab. 10 mostra i valori medi del consumo totale di capacità, del tempo di occupazione e dei distanziamenti temporali medi, considerando le sequenze di tempo di blocco all'interno dei diversi scenari. I risultati medi mostrano che l'ERTMS/ETCS L3 riduce significativamente il distanziamento temporale da 90 s a 64 s e il tempo di occupazione dal 34% al 24%.

## 9.2. Risultati della simulazione

Questo paragrafo descrive i risultati degli studi effettuati sulla linea nel caso di studio mediante il simulatore RailSys, al fine di verificare l'efficacia del sistema ERTMS/ETCS L3 *Moving Block* rispetto al sistema ERTMS/ETCS L2 e ATC2, con particolare attenzione al distanziamento temporale e al consumo di capacità, già utilizzati come indicatori chiave per l'analisi elaborata con il metodo analitico. In RailSys, a causa delle limitazioni delle sezioni vicine, il tempo di percorrenza effettivo può essere più breve o più lungo del previsto.

### Scenario 1 (ATC2)

I risultati sul distanziamento temporale ottenuti da RailSys (profilo velocità-distanza riportati nella Fig. 29) hanno confermato che la sezione critica è la Stockholm City, con 215 s di distanziamento temporale, praticamente simile ai risultati ottenuti con

ing blocking time sequences within the different scenarios. The average results show that ERTMS/ETCS L3 significantly reduces the headway from 90 s to 64 s and the occupation time from 34% to 24%.

## 9.2 Simulation Results

This section contains explanations of results of studies performed on the case study line by means of the RailSys simulation tool, in order to verify effectiveness of ERTMS/ETCS L3 *Moving Block* system in comparison with ERTMS/ETCS L2 and ATC2, with emphasis on headway and capacity consumption, already used as key indicators for the analysis developed by analytical method. In RailSys, because of the limitations from neighbouring sections the actual run time can be shorter or longer than planned one.

### Scenario 1 (ATC2)

The results of headway resulting from RailSys (speed-distance profile reported in Fig. 29) confirmed that the criti-

Tabella 10 – Table 10  
Tempi di occupazione e consumo di capacità sulla base dell'orario 2020 - Codice UIC 406  
Occupation times and capacity consumption based on Timetable 2020 - UIC code 406

Sistema di segnalamento Signalling system	Tempo di occupazione [s] Occupation time [s]	Tempo di occupazione [%] Occupation time [%]	Distanziamento temporale minimo [s] Average headway [s]
ATC2	2441	34	90
ERTMS/ETCS L2	2180	30	81
ERTMS/ETCS L3	1732	24	64

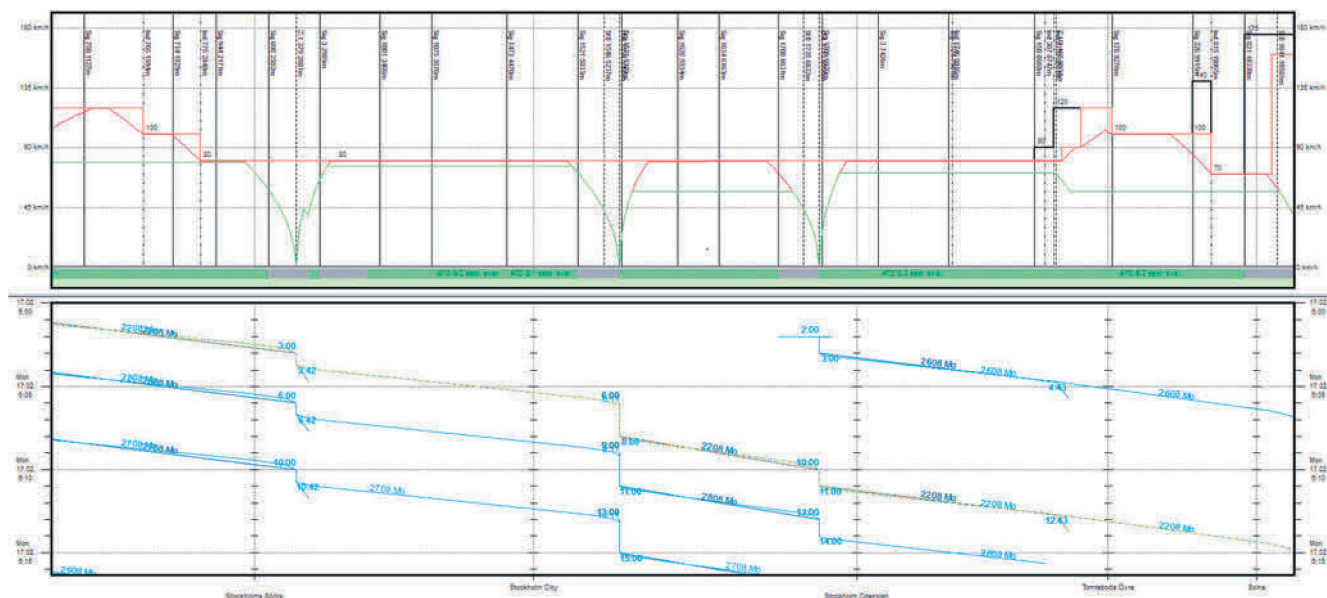


Figura 29 – Profilo simulato distanza-velocità con ATC2.

*Figure 29 – Simulated speed-distance profile with ATC2.*

il metodo analitico (216 s). La sezione in cui si verifica l'accelerazione e la decelerazione presenta andamenti e tassi di consumo di capacità più elevati.

### Scenario 2 (attuazione dell'ERTMS/ETCS L2)

In questo scenario, l'effetto della curva di frenatura sul distanziamento temporale e la capacità è chiaro. Nell'ERTMS/ETCS L2, la frenatura è generalmente più restrittiva e può influire negativamente sui tempi di approccio, sul distanziamento temporale e sulla capacità. Il processo di decelerazione inizia prima che con ATC2. Ciononostante, l'ERTMS/ETCS L2 è in grado di migliorare la traiettoria fino a 208 s (204 s secondo i metodi analitici).

La Fig. 30 illustra il diagramma velocità-distanza di Railsys, le curve dinamiche e di frenatura del veicolo nell'ERTMS L2. Le curve verde, magenta e rosse rappresentano rispettivamente la distanza percorsa con la frenatura di servizio (SBD), con la frenatura di emergenza (EBI) e con la frenatura di emergenza (EBD).

### Scenario 3 (attuazione dell'ERTMS/ETCS L3)

In questo scenario, linea e materiale rotabile sono dotati di ERTMS/ETCS L3. I risultati mostrano una notevole riduzione positiva dei tempi di occupazione e dei consumi di capacità (Fig. 31 e Fig. 32): nella sezione critica 16 s di riduzione del distanziamento temporale (da 215 s a 208 s vs. 199) e 10% di riduzione dei consumi di capacità (da 94% a 89% vs. 84%) secondo il metodo di simulazione. Il margine di capacità supplementare è utilizzabile

cal section is Stockholm City, with 215 s headway, practically similar to the results achieved by analytical method (216 s). The section in which the acceleration and deceleration occurs have higher headways and capacity consumption rates.

### Scenario 2 (implementation of ERTMS/ETCS L2)

In this scenario, the effect of braking curve on headway and capacity is clear. In ERTMS/ETCS L2, braking is generally more restrictive and can negatively affect approaching time, headway and capacity. The deceleration process starts earlier than with ATC2. Nonetheless, ERTMS/ETCS L2 is able to improve headway to 208 s (204 s according to analytical methods).

Fig. 30 illustrates the RailSys speed-distance diagram, vehicle dynamic and braking curves in ERTMS L2. Green, magenta and red curves respectively represent Service Brake Distance (SBD), Emergency Brake Indication (EBI) and Emergency Brake Distance (EBD).

### Scenario 3 (implementation of ERTMS/ETCS L3)

In this scenario, line and rolling stock are equipped with ERTMS/ETCS L3. The findings demonstrate a considerable positive reduction of occupation time and capacity consumptions (Fig. 31 and Fig. 32): in critical section 16 s of headway reduction (from 215 s to 208 s vs. 199 s) and 10% of capacity consumption reduction (from 94% to 89% vs. 84%) according to the simulation method. The additional capacity margin is usable both for increasing the traffic as well as to increase the stability of the timetable on a line that suffers from frequent delays and disruptions, by moder-

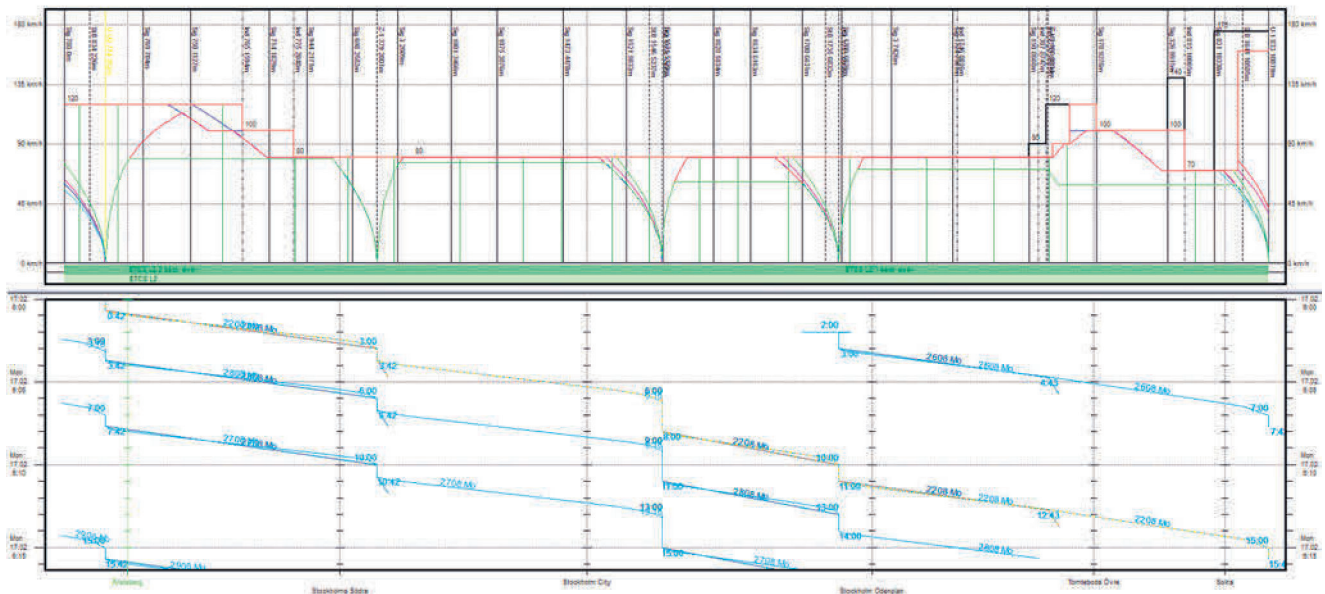


Figura 30 – Profilo distanza velocità simulato con ERTMS L2.

Figure 30 – Simulated speed-distance profile with ERTMS L2.

sia per aumentare il traffico sia per aumentare la stabilità dell'orario su una linea che soffre di frequenti ritardi e interruzioni, moderando la propagazione dei ritardi secondari durante l'esercizio. La differenza tra i risultati ottenuti con i metodi di simulazione e quelli analitici è in questo caso più rilevante.

La Tab.11 illustra il tempo di occupazione e il distanziamento temporale medi sulla base del tempo di percorrenza con il simulatore Railsys. È chiaro che le sezioni più corte del blocco fornirebbero i distanziamenti temporali più brevi e i tempi conseguenti di occupazione. Il sistema ERTMS/ETCS L3 Moving Block riduce lo spazio tra i treni durante l'esercizio (per sezioni di blocco virtuali in base a lunghezza dei treni, distanza di frenatura e

ating the propagation of secondary delays during operation. The difference between the results obtained by simulation and analytical methods are in this case more relevant.

Tab. 11 illustrates the occupation time and average headway based on feasible run time in RailSys tool. It is clear that shorter block sections would give shorter headway and consequent occupation times. The ERTMS/ETCS L3 Moving Block system decreases the space between trains during operation (by virtual block sections based on trains' length, braking distance and safety margin) and provides shorter minimum headway and lower capacity consumptions.

From the simulation, occupation times and average headway result normally higher (5-10%) than by applying

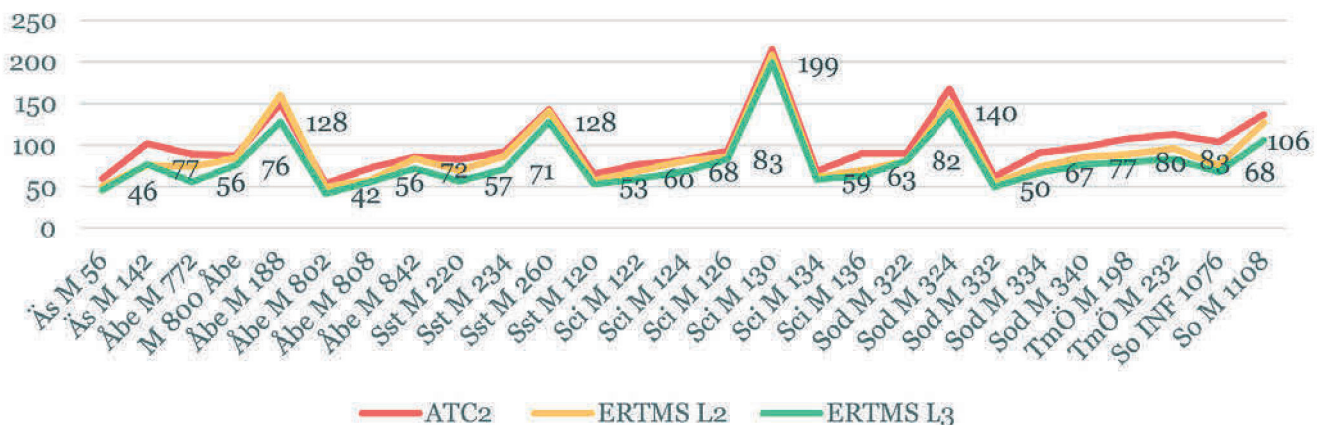


Figura 31 – Metodo di simulazione – distanziamento temporale con ERTMS/ETCS L3 vs. ERTMS/ETCS L2 e ATC2.

Figure 31 – Simulation method - headway [s] with ERTMS/ETCS L3 vs. ERTMS/ETCS L2 and ATC2.



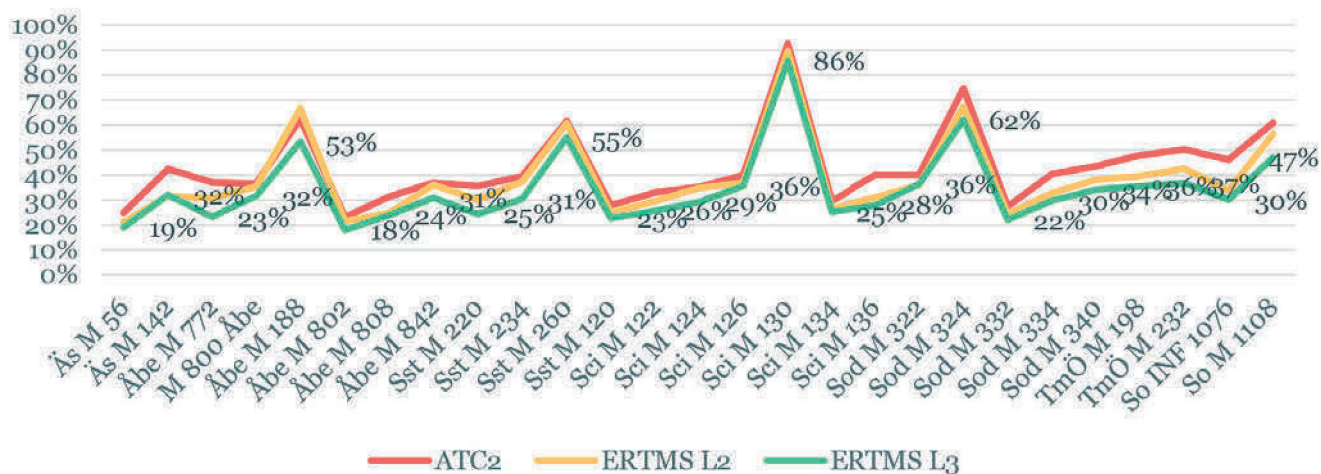


Figura 32 – Metodo di simulazione - consumo di capacità [%] con ERTMS/ETCS L3 vs. ERTMS/ETCS L2 e ATC2.  
 Figure 32 – Simulation method - capacity consumption [%] with ERTMS/ETCS L3 vs. ERTMS/ETCS L2 and ATC2.

marginale di sicurezza) e fornisce distanziamenti temporali minimi inferiori e consumi di capacità inferiori.

Dalla simulazione, i tempi di occupazione e il distanziamento temporale medio risultano normalmente più elevati (5-10%) rispetto all'applicazione di metodi analitici per ATC2 e ETCS/ERTMS L2. Mentre questa differenza arriva al 24-25% nel caso di apparecchiature con ETCS/ERTMS L3. Probabilmente a causa della difficoltà di considerare i vantaggi apportati dal blocco mobile e dalla sezione virtuale da un modello analitico tradizionale, come il codice UIC 406.

Inoltre, la Fig. 33 mostra come la curva di frenata differisce nei sistemi ATC2 e L2 precedenti. Con questo secondo sistema, la decelerazione inizia prima che con ATC2.

I grafici distanza-velocità mostrano le curve di frenatura ERTMS/ETCS L2 in corrispondenza di un segnale fisso di arresto (*End of Authority*) e/o di riduzione di velocità (*Limit of Authority*). Nell'ERTMS/ETCS L2, la posizione del punto di indicazione e la curva di frenatura possono influenzare in modo significativo la capacità della linea.

### Metodo di compressione in Railsys

Questa sezione riporta la valutazione del tempo di occupazione delle infrastrutture e dei distanziamenti temporali medi con il metodo di compressione applicato all'orario effettivo in un tempo di riferimento di 2 ore (7200 s). La Tab. 12 presenta i risultati del metodo di compressione in Railsys con tempo cuscinetto di 60 s. Nel metodo UIC 406 è consigliabile non superare l'80% della capacità per avere una qualità di servizio soddisfacente [19].

analytical methods for ATC2 and ETCS/ERTMS L2. Meanwhile this difference is up to 24-25% in case of equipment with ETCS/ERTMS L3. Possibly due to the difficulty to consider the advantages brought by the mobile block and the virtual section by a traditional analytic model, such as UIC Code 406.

Moreover, Fig. 33 shows how braking curve differ in legacy system ATC2 and ERTMS L2. With this second system, the deceleration starts earlier than with ATC2.

The speed distance-graphs show the ERTMS/ETCS L2 braking curves against a Stop board (End of Authority) and a speed reduction (Limit of Authority). In ERTMS/ETCS L2, the location of Indication point and the braking curve can significantly influence the capacity of line.

### RailSys Compression method

This section reports the evaluation of infrastructure occupation time and average headway by the compression method applied to actual timetable in a 2 hours (7200 s) reference time. Tab. 16 presents the results of compression method in RailSys with 60 s buffer time. In UIC Code 406,

Tabella 11 – Table 11  
 Tempo di occupazione e evoluzione media sulla base dell'orario 2020 – Railsys  
 Occupation time and average headway based on Timetable 2020 - RailSys

Sistema di segnalamento Signalling system	Tempo di occupazione [s] Occupation time [s]	Tempo di occupazione [%] Occupation time [%]	Distanziamento temporale minimo [s] Average headway [s]
ATC2	2682	37	99
ERTMS/ETCS L2	2279	32	89
ERTMS/ETCS L3	2147	30	80



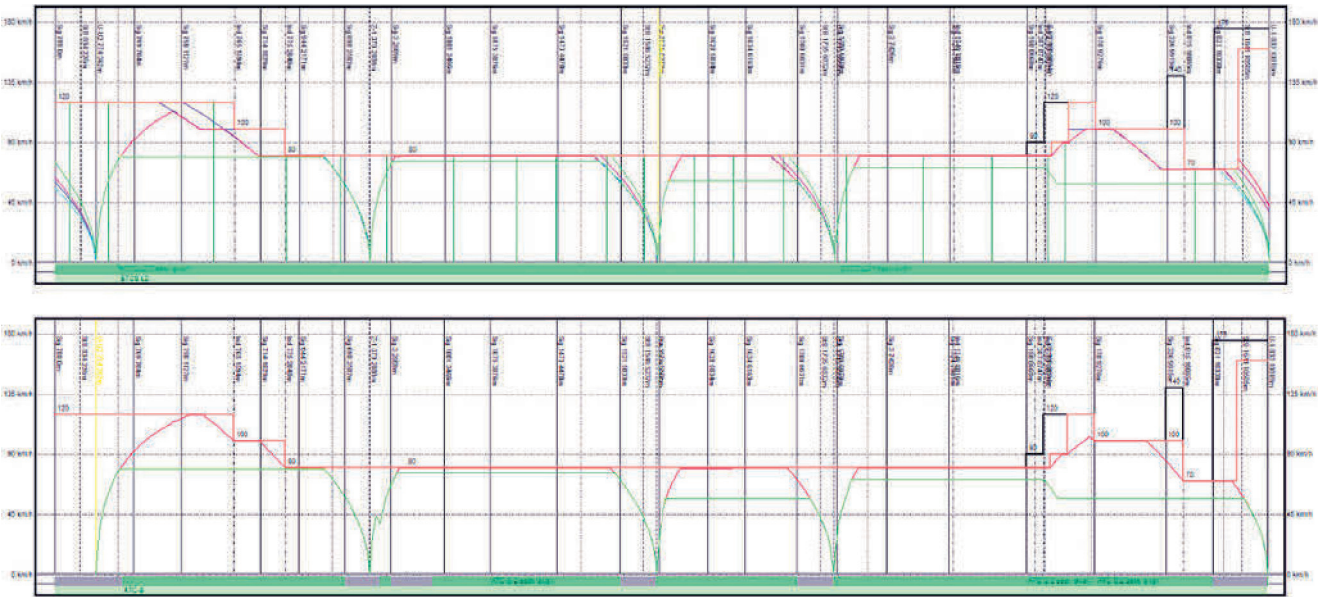


Figura 33 – Grafici di velocità e distanza con ERTMS L2 (in alto) vs. ATC2 (in basso).  
Figure 33 – Speed-distance graphs with ERTMS L2 (top) vs. ATC2 (bottom).

9.3. Confronto tra i risultati di UIC e Railsys

Questo paragrafo si occupa del confronto dei risultati di UIC e Railsys. Come accennato in precedenza, le ipotesi e la considerazione dei fattori che contribuiscono ai risultati in termini di distanziamento temporale sono essenziali. Nel metodo analitico sono considerati i sistemi e i tempi di risposta del macchinista e degli apparati centrali e il tempo di liberazione, ma sono trascurati i fattori che influenzano il tempo di percorrenza, come le resistenze al moto e i cambiamenti di velocità durante la marcia. Queste ipotesi hanno portato a volte a profili di accelerazione e decelerazione non del tutto realistici. In Railsys, la situazione è molto diversa. Poiché la simulazione prende in considerazione una serie più ampia di fattori, come le caratteristiche del materiale rotabile e dell’infrastruttura e le relative variabili e la loro interazione con l’orario. Le principali variabili sono accelerazioni e decelerazioni, resisten-

it is recommendable not exceed 80% of capacity to have a satisfactory quality of service [19].

RailSys Compression method

This section reports the evaluation of infrastructure occupation time and average headway by the compression method applied to actual timetable in a 2 hours (7200 s) reference time. Tab. 13 presents the results of compression method in RailSys with 60 s buffer time. In UIC Code 406, it is recommendable not exceed 80% of capacity to have a satisfactory quality of service [19].

9.3. Comparison of UIC and RailSys results

This section deals with comparison of results of UIC and RailSys. As mentioned before, the assumptions and consideration of factors that contribute to headway results are significantly essential. In the analytical method, the systems and driver response times, interlocking setting and released time are considered, but factors that influence the running time, such as running resistance forces and speed changes during operation are neglected. These assumptions resulted sometime in not completely realistic acceleration and deceleration profiles. In RailSys, the situation is quite different. As simulation takes a larger set of factors into consideration, such as rolling stock and infrastructure char-

Tabella 12 – Table 12  
Tempo di occupazione e distanziamento temporale medio secondo il metodo di compressione UIC applicato in Railsys  
Occupation time and average headway by UIC compression method applied by RailSys

Sistema di segnalamento Signalling system	Tempo di occupazione [s] Occupation time [s]	Tempo di occupazione [%] Occupation time [%]	Distanziamento temporale minimo [s] Average headway [s]
ATC2	6714	93	210
ERTMS/ETCS L2	6450	90	202
ERTMS/ETCS L3	5673	79	177

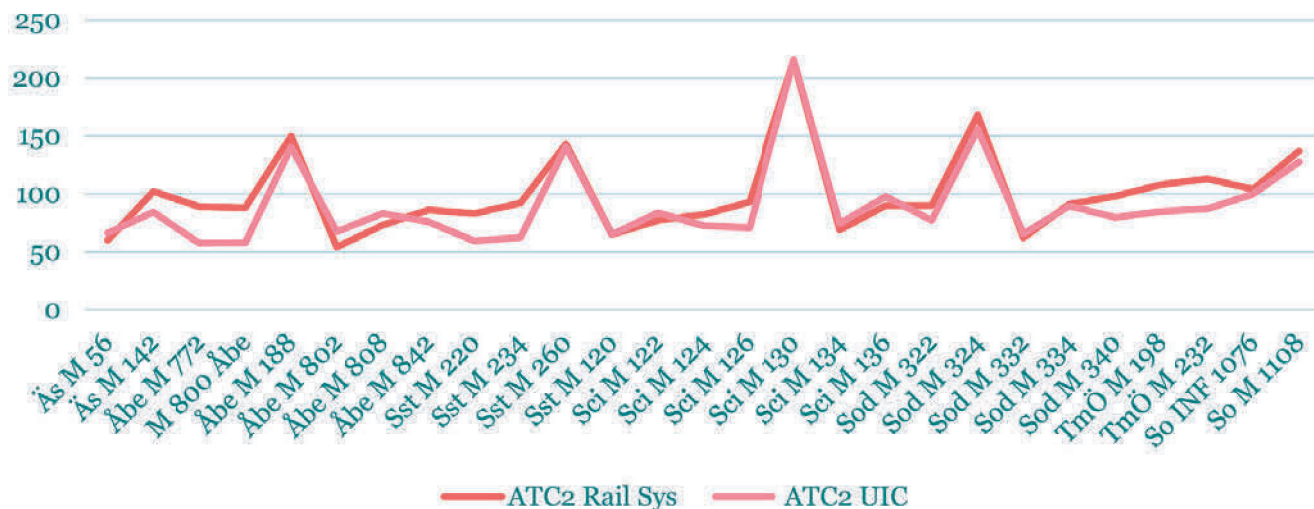


Figura 34 – Direzione simulata e calcolata con ATC2.  
 Figure 34 – Headway [s] simulated and calculated with ATC2.

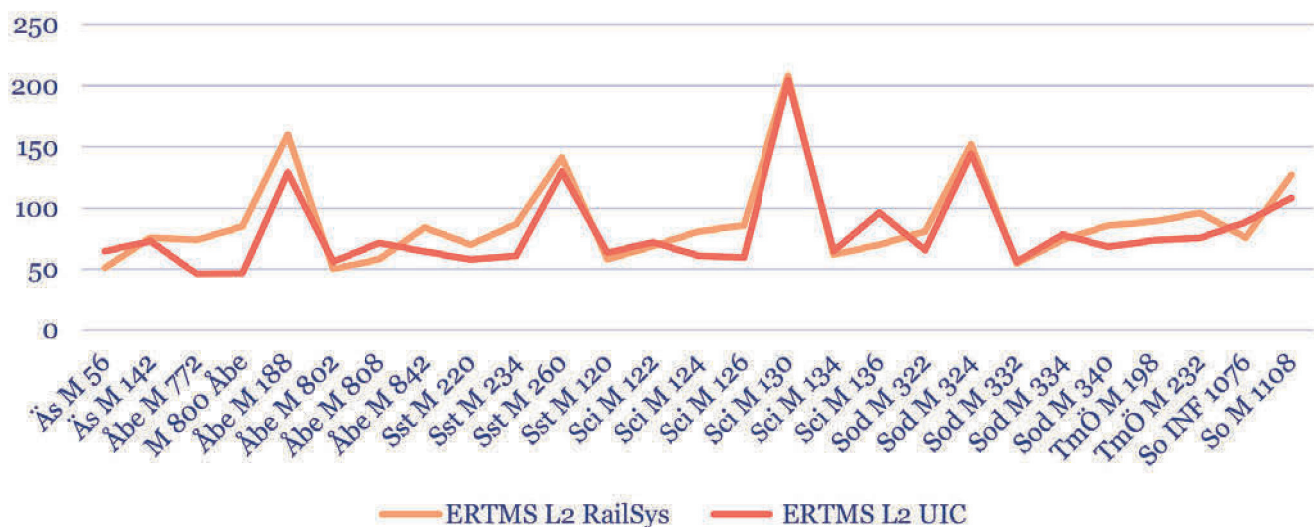


Figura 35 – Direzione simulata e calcolata con ATC2.  
 Figure 35 – Headway [s] simulated and calculated with ATC2.

ze al moto, variazioni di velocità durante la marcia e così via. Queste differenze di input giustificano ampiamente le differenze emergenti nei risultati (Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36).

In particolare, i risultati del metodo UIC, basati su ipotesi alla fase di crociera senza considerazione della variazione di velocità e della restrizione su ogni sezione di blocco, forniscono una forma più piatta del profilo di velocità. Comunque, i risultati all'inizio e alla fine delle fasi a velocità variabile sono più vicini ai risultati più realistici raggiunti da RailSys. In ogni caso, i risultati ottenuti per entrambi i metodi dimostrano chiaramente che il sistema a blocco mobile offre un distanziamento temporale più breve e, di conseguenza, un consumo di capacità inferiore rispetto a ERTMS/ETCS L2 e ATC2.

acteristics and related variants and their interaction with timetable. The main variants are acceleration and deceleration rates, running resistance forces, speed variations during operation and so on. These differences in input largely justifies the emerging differences in outcomes (Fig. 34, Fig. 35 and Fig. 36).

In particular, the outcomes of the UIC method, based on assumptions at cruising phase without consideration of speed variation and restriction on each block section provides a flatter shape of the speed profile. Meanwhile, the results at beginning and end of speed variation phases are closer to the more realistic results achieved by RailSys.

Anyway, the resulting outcomes for both methods clearly demonstrate that the moving block system pro-

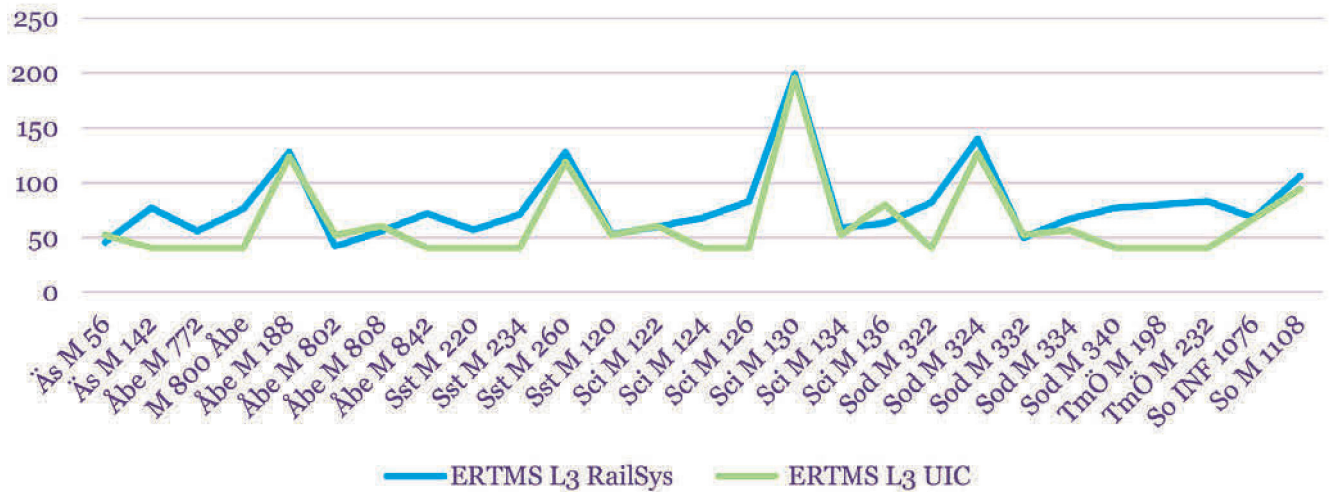


Figura 36 – Distanziamento temporale simulato e calcolato con ERTMS/ETCS L3.  
 Figure 36 – Headway [s] simulated and calculated with ERTMS/ETCS L3.

Sulla base dei risultati ottenuti, possiamo concludere che:

- l'uso del metodo analitico appare in linea con l'ambito delle analisi ad alto livello per individuare il sistema più appropriato da adottare in una prospettiva a lungo termine, indipendentemente da una struttura di orario specifica;
- l'implementazione di un modello di simulazione è necessaria per analisi approfondite volte all'ottimizzazione dell'uso della capacità e della struttura dell'orario stesso.

Tuttavia, molte ipotesi mantengono un certo livello di incertezza e sono necessari ulteriori sviluppi della ricerca per verificarne la piena affidabilità. Esempi, tra gli altri, sono:

- quantificazione dei tempi di risposta del sistema utilizzati per la stima dei distanziamenti temporali minimi, attualmente derivati da studi basati su sistemi CCS parzialmente obsoleti;
- schematizzazione della sezione virtuale nella simulazione del blocco mobile ERTMS L3;
- sviluppo di una schematizzazione dedicata per le soluzioni ibride ERTMS L3.

Per queste questioni aperte, le analisi di sensibilità dei loro effetti nel calcolo dei distanziamenti temporali dovrebbero contribuire a definire in via preliminare il livello di approssimazione più appropriato per la messa a punto delle soluzioni proposte.

## 10. Osservazioni finali

I risultati di entrambi i metodi mostrano che il blocco mobile integrale ERTMS/ETCS di livello 3 fornisce il distanziamento temporale più breve rispetto ad altri sistemi di segnalamento. Le differenze sono più evidenti dall'applicazione della simulazione di Railsys perché le ipotesi adot-

vides with shorter headway and, consequently, lower capacity consumption in comparison with both ERTMS/ETCS L2 and ATC2.

Basing on the achieved results, we can conclude that:

- the use of analytical method appears in line with the scope of high-level analyses for the identification of the most appropriate system to adopt in a long-term perspective, independent from a specific timetable structure.
- the implementation of a simulation model is necessary for in-depth analyses aiming at the optimization of the use of capacity and the timetable structure itself.

Nevertheless, many assumptions maintain a certain level of uncertainties and further research development are necessary to test their full reliability. Examples, among others, are:

- quantification of system response times used for the estimation of the minimum headways, presently derived from studies based on partially outdated CCS systems;
- schematization of the virtual section in the simulation of the ERTMS L3 Moving Block;
- development of a dedicated schematization for Hybrid ERTMS L3 solutions.

For these open issues, sensibility analyses of their effects in the calculation of headways should help to preliminary define the most appropriate level of approximation for the fine tuning of the proposed solutions.

## 10. Final remarks

The results of both methods show that ERTMS/ETCS Level 3 Full Moving Block provides the shorter headway compared to other signalling systems. The differences are



tate nel metodo analitico riguardo alle forze di resistenza svolgono un ruolo significativo.

Inoltre, la schematizzazione del blocco mobile utilizzato per la simulazione, come sequenza di blocchi virtuali di 50 m di lunghezza, con l'aggiunta di distanza di frenatura e margine di sicurezza ben rappresenta le sue prestazioni.

Anche l'ERTMS/ETCS L2 offre migliori prestazioni rispetto all'ATC2, sebbene le differenze siano attenuate dalla curva di frenatura restrittiva nei tratti in cui si verifica la decelerazione (ultime sezioni precedenti le stazioni).

Poiché l'ERTMS/ETCS L3 richiede precondizioni, quali l'adeguamento completo del materiale rotabile, una soluzione potenzialmente intelligente per la linea del caso di studio e per infrastrutture e situazioni operative simili potrebbe essere l'aggiornamento progressivo del segnalamento mediante l'attuazione di versioni ibride dell'ERTMS/ETCS di livello 3.

*more evident by the application of RailSys simulation because the assumptions adopted in analytical method concerning resistance forces plays a significant role.*

*Moreover, the schematization of the moving block used for the simulation, as a sequence of imaginary 50 m long block sections, with addition of braking distance and safety margin is well representing its performances.*

*ERTMS/ETCS L2 is also providing better performances in comparison with ATC2; though the differences are mitigated by the restrictive braking curve in sections where deceleration occurs (last sections before stations).*

*As ERTMS/ETCS L3 requires preconditions, such as full rolling stock fitting, a potential smart solution for the case study line and similar infrastructure and operational situation, could be the progressive upgrade of the signalling by the implementation of hybrid versions of ERTMS/ETCS Level 3.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/ertms--nytt-signalsystem/Om-ERTMS/>
- [2] FURNESS N., VAN HOUTEN H., ARENAS L., BARTHOLOMEUS M. (2017) – “ERTMS Level 3: The Game-Changer” – IRSE News, 232, November 2017.
- [3] EEIG ERTMS Users Group (2018) – “Hybrid ERTMS/ETCS Level 3. Principles” - 16E042, 1C, 13/07/2018, Brussels.
- [4] International Union of Railways (2009) – “Compendium on ERTMS European Rail Traffic Management System”, Eurail Press, Hamburg, ISBN 9783777103969.
- [5] STM Functional Requirements specification - BVS 544.65001 FRS v6, <https://transportstyrelsen.se/globalassets/global/jarnvag/nationella-krav/bvs-544-65001-5-v6-frs-aux.pdf>
- [6] STÄDJE J. (2008) – “Med ATC-systemet går tåget som på räls” <https://techworld.idg.se/2.2524/1.160472/med-atc-systemet-gar-taget-som-pa->
- [7] LAWSON H.W., WALLIN S., BRYNTSE B., FRIMAN B. (2001) – “Twenty Years of Safe Train Control in Sweden” - Eighth Annual IEEE International Conference and Workshop On the Engineering of Computer Based Systems-ECBS, (doi: 10.1109/ECBS.2001.922435).
- [8] MÄNSSON J., WALLENBRO K. (2020) – “Reliability Study of ERTMS in Sweden. An analysis of Swedish Signalling Systems” – Bachelor Thesis, Lund University (LTH), Helsingborg.
- [9] ZIEGER S., WEIK N., NIESSEN N. (2018) – “The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks” - Journal of Rail Transport Planning & Management, 8, 3–4, 220-232 (doi: 10.1016/j.jrtpm.2018.09.001).
- [10] European Union Agency for Railways (2016) – “ERTMS/ETCS System Requirements Specification” - SUBSET-026-1, 3.6.0, 13/05/2016.
- [11] European Union Agency for Railways (2020) – “Introduction to ETCS braking curves” - ERA\_ERTMS\_040026, 1.5, 12/08/20.
- [12] KONTAXI E., RICCI S. (2009) – “Techniques and methodologies for carrying capacity evaluation: Comparative analysis and integration perspectives” - Ingegneria Ferroviaria n. 12, 1051-1080 (ISSN: 0020-0956).
- [13] LINDFELDT O. (2010) – “Railway operation analysis. Evaluation of quality, infrastructure and timetable on single and double-track lines with analytical models and simulation” - PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- [14] LANDEK A., WITTRUP JENSEN L. (2019) – Rail Norrköping 2019 “Infrastructure Capacity in the ERTMS Signalling System - 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis”.
- [15] PARBO J., ANKER NIELSEN O., PRATO G.C. (2016) – “Passenger Perspectives in Railway Timetabling: A Literature Review”, Transport Reviews, 36, 4 (doi: 10.1080/01441647.2015.1113574).



- [16] LANDEX A. (2008) – “*Methods to estimate railway capacity and passenger delays*” -. PhD Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby.
- [17] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M.A., TORMOS L.A., LOVA A. (2008) – “*An assessment of railway capacity*” - Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 44, 5, 774-806 (doi: 10.1016/j.tre.2007.04.001).
- [18] ROTOLI F., MALAVASI G., RICCI S., NAVAJAS E.C., IBANEZ J.N. (2016) – “*Capacity analysis of suburban rail networks*” – WIT Transactions on The Built Environment 162 (doi:10.2495/CR160111) .
- [19] International Union of Railways (2013) – “*UIC Code 406 2nd edition*” - Technical Report.
- [20] DICEMBRE A., RICCI S. (2011) – “*Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable*” - Journal of Rail Transport Planning & Management, 1, 2, 59-68 (doi: 10.24355/dbbs.084-200611210100-0).
- [21] GOVERDE R.M.P., CORMAN F., D'ARIANO A. (2013) – “*Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions*” - Journal of Rail Transport Planning & Management, 3, 2013, 78-94 (doi: 10.1016/j.jrtpm.2013.12.001).
- [22] ROTOLI F., RICCI S., NAVAJAS CAWOOD E., MALAVASI G. (2015) – “*Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility measures for rail networks*” – Ingegneria Ferroviaria, 70, 12, 1011-1040.
- [23] Aachen University (2008) – “*Influence of ETCS online capacity*” - Generic study.
- [24] PACHL J., WHITE T. (2004) – “*Analytical Capacity Management with Blocking Times*”. Universitätsbibliothek Braunschweig, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00015768>.
- [25] Aachen University (2010) – “*Influence of the European Train Control System (ETCS) on the capacity of nodes*”.
- [26] HELLSTRÖM P., WOLFMAIER J. (2009) – “*ERTMS-simuleringar Olskroken. Etapp 1*” - Tekniskt PM, Ultredning Kapacitet.
- [27] International Union of Railways (2004) – “*UIC CODE 406. 1st edition*” – Technical Report
- [28] ASUKA M., KOMAYA K. (1996) – “*A simulation method for rail traffic using microscopic and macroscopic models*” – WIT Transactions on the Built Environment, 18, 287-296.
- [29] JENSEN L. W. (2015). “*Robustness indicators and capacity models for railway networks*”. DTU Management.
- [30] MAGNARINI M., NELLDAL B., DALLA CHIARA B. (2011) – “*Evaluation of ETCS on railway capacity in congested area: a case study within the network of Stockholm*”, 2° Convegno Nazionale - Sicurezza ed esercizio ferroviario: innovazione e nuove sfide nei sistemi ferroviari, 223-232, ISBN: 978-888665864-5.
- [31] SCHWANHÄUSSER W. (1974) – “*Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*” – Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen.
- [32] ZIEGER S., WEIK N., NIESSEN N. (2018) – “*The impact of buffer time distributions on the nominal capacity of railway lines*”, Institute of Transport Science - RWTH Aachen University.
- [33] SOLINEN E., NICHOLSON G., PETERSON A. (2017) – “*A microscopic evaluation of railway timetable robustness and critical points*” - Journal of Rail Transport Planning & Management, 7, Issue 4, 207-223, (doi: 10.1016/j.jrtpm.2017.08.005).
- [34] <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/jarnvag/Kapacitet/>