

# PROMUOVERE IL TRASPORTO PUBBLICO CIRCOLARE

Esperienze pilota e soluzioni di economia circolare per gli operatori del trasporto pubblico



**Interreg**  
CENTRAL EUROPE



Co-funded by  
the European Union

CE4CE

# Colophon

## Progetto

CE0100250 CE4CE - Infrastrutture del trasporto pubblico in Europa centrale - favorire la transizione verso l'economia circolare

## Contatti

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH/ Azienda di trasporto pubblico di Lipsia,  
Indirizzo: Georgiring 3, 04103 Lipsia, Germania  
Web: <https://www.l.de/verkehrsbetriebe/>  
E-mail: CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de

## Finanziato da

Programma Interreg Central Europe  
Web: <https://www.interreg-central.eu/>

## Autori

Danijel Hojski, Marjan Lep, Vlasta Rodošek (Università di Maribor, Slovenia)

## Contributori

Stefan Röhl, Conrad Jentzsch (Azienda di trasporto pubblico di Lipsia, Germania), Jan Röhl (Kruch Railways, Austria), Liliana Donato, Sara Biffi (ATB Bergamo, Italia), Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale srl, Italia), Dominika Kowalkowska (PKA Gdynia, Polonia), Agnieszka Szmelter-Jarosz, Marcin Wolek (Università di Danzica, Polonia), Németh Zoltán Ádám, Gábor Jéga-Szabó (SZKT Szeged, Ungheria), Mitja Klemencic (Comune di Maribor), Alexandra Scharzenberger, Marta Woronowicz (associazione trolley:motion, Austria), Laura López, Ana-Maria Baston (Rupprecht Consult, Germania), Nikolett Csörgő (Mobilissimus Kft, Ungheria)

## Impaginazione e design

Danaja Dvornik (@\_studio\_kai\_)

Data di pubblicazione

Aprile 2026

## Copyright

*Questa pubblicazione è protetta dal diritto d'autore ed è di proprietà del consorzio del progetto CE4CE, guidato dall'Azienda di trasporto pubblico di Lipsia. Tutte le immagini e tutti gli elementi testuali di questa pubblicazione, per i quali è indicata una fonte, sono di proprietà delle organizzazioni o delle persone citate.*

## Informazioni sul progetto CE4CE

Il progetto CE4CE promuove un approccio sistemico all'economia circolare per gli attori del trasporto pubblico dei Paesi dell'Europa centrale, al fine di ridurre gli sprechi e creare valore lungo nuovi cicli di vita delle infrastrutture e del materiale rotabile. A tal fine, CE4CE sviluppa congiuntamente soluzioni che accrescono le conoscenze e le capacità del settore, contribuiscono a ridurre barriere e costi e avviano lo sviluppo di nuovi servizi e posti di lavoro qualificati, nonché di strategie e piani d'azione che migliorano l'elaborazione delle politiche, l'apprendimento e lo scambio a livello regionale e transnazionale.

CE4CE mira a introdurre i principi dell'economia circolare nel settore del trasporto pubblico e, così facendo, a ridurre gli sprechi, aumentare l'efficienza del settore e migliorare l'impronta ecologica del trasporto pubblico.



Figura 1: Partner CE4CE durante una discussione congiunta sulle soluzioni e sui piani d'azione nel 2025. Crediti: Il consorzio CE4CE.

## Indice

<b>1. Introduzione</b>	<b>6</b>
<b>2. Struttura delle azioni pilota e delle soluzioni CE4CE</b>	<b>6</b>
2.1. Collegamento delle attività CE4CE al quadro del ciclo di vita AETE	7
<b>3. Azioni pilota e soluzioni CE4CE</b>	<b>10</b>
3.1. Attività A.1: Sviluppo del Circularity Compass CE4CE e della Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico	11
3.1.1. Pilota P.1: Circularity Compass per il trasporto pubblico	11
3.1.2. Soluzione S.1: Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico circolare	13
3.1.3. Soluzione S.2: Mercato online dell'usato e piattaforma di matching	15
3.2. Attività A.2: Sviluppo di soluzioni digitali congiunte per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico	16
3.2.1. Pilota P.2: Ottimizzazione digitale delle infrastrutture e dei veicoli tramite manutenzione predittiva (Lipsia, Germania)	16
3.2.2. Pilota P.2: Ottimizzazione digitale delle infrastrutture e dei veicoli tramite manutenzione predittiva (Bergamo, Italia)	18
3.2.3. Soluzione S.3: Moduli per la manutenzione predittiva delle infrastrutture e del materiale rotabile	20
3.2.4. Pilota P.4: Simulazione di corridoi di trasporto pubblico elettrificati e dei flussi energetici (Gdynia, Polonia)	22
3.2.5. Soluzione S.4: Strumento di pianificazione aziendale circolare per flotte e infrastrutture di trasporto pubblico elettrificate	24
3.3. Attività A.3: Sviluppo di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico	25
3.3.1. Pilota P.5: Riutilizzo di scambi filoviari (Szeged, Ungheria)	25
3.3.2. Soluzione S.5: Definizione di criteri di adozione per il riutilizzo di scambi filoviari	27
3.3.3. Pilota P.6: Utilizzo di batterie di trazione di seconda vita come accumulo energetico stazionario per la ricarica rapida alimentata da fonti rinnovabili (Maribor, Slovenia)	27
3.3.4. Soluzione S.6: Modelli di business trasferibili per l'utilizzo di batterie di trazione di seconda vita	29
3.4. Attività A.4: Promozione dell'adozione di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile	30
Pilota P.7: Rigenerazione e riprogettazione delle unità di controllo del tram per consentire il riuso dei componenti (Szeged, Ungheria)	30
<b>4. Lezioni apprese</b>	<b>33</b>
<b>5. Checklist di implementazione e aspetti chiave</b>	<b>35</b>
5.1. Aspetti chiave per un'implementazione di successo	35
5.2. Checklist di implementazione	35
5.3. Rischi comuni e misure di mitigazione	37
5.4. Conclusioni e prospettive	37
<b>6. Riferimenti</b>	<b>38</b>

## Elenco delle abbreviazioni

Abbreviazione	Definizione
AETE	Avoid - Extend - Transform - Enable
BESS	Sistema di accumulo a batteria
CAN-BUS	Bus Controller Area Network
CE4CE	Economia circolare per l'Europa centrale
DC	Corrente continua
EFS	Simulazione dei flussi energetici
GNSS	Sistema globale di navigazione satellitare
IMC	In-Motion Charging
KPI	Indicatore chiave di prestazione
PV	Fotovoltaico
RES	Fonti energetiche rinnovabili

## Elenco delle abbreviazioni dei partner

Abbreviazione	Definizione
LVB	Leipziger Verkehrsbetriebe, Germania
KRUCH	KRUCH Railway Innovations, Austria
TM	trolley:motion, Austria
ATB	Azienda Trasporti Bergamo, Italia
REDMINT	Redmint Impresa Sociale, Italia
SZKT	Azienda di trasporti di Szeged, Ungheria
MOBILISSIMUS	Mobilissimus, Ungheria
PKA	Operatore del trasporto pubblico su autobus di Gdynia, Polonia
MOM	Comune di Maribor, Slovenia
UG	Università di Danzica, Polonia
UM	Università di Maribor, Slovenia
RUPPRECHT	Rupprecht Consult (consulente di LVB), Germania

## Sintesi esecutiva

Il progetto CE4CE sostiene la transizione verso pratiche di economia circolare nei sistemi di trasporto pubblico dell'Europa centrale traducendo i principi dell'economia circolare in azioni pilota concrete e in soluzioni trasferibili che riguardano i cicli di vita delle infrastrutture e del materiale rotabile. Attraverso la sperimentazione in contesti reali e lo sviluppo di soluzioni, CE4CE contribuisce a ridurre gli sprechi, preservare il valore e creare nuove catene del valore circolari nel trasporto pubblico.

Nell'ambito del progetto, autorità del trasporto pubblico, operatori e altri stakeholder hanno sviluppato e testato congiuntamente azioni pilota e soluzioni che aumentano le conoscenze e le capacità del settore, contribuiscono a ridurre le barriere e i costi di attuazione e rendono possibile lo sviluppo di nuovi servizi, competenze e modelli di business circolari. Concentrandosi su applicazioni concrete in condizioni operative reali, CE4CE sostiene un migliore uso delle risorse, una riduzione degli impatti ambientali e la sostenibilità a lungo termine dei sistemi di trasporto pubblico.

Le azioni pilota e le soluzioni presentate in questo manuale si basano su processi di co-creazione, sperimentazione pilota e peer review. Esse mostrano pratiche circolari quali l'estensione della vita utile, il riuso, la riconversione d'uso e la rigenerazione degli asset, nonché meccanismi abilitanti, tra cui strumenti digitali, piattaforme e modelli di business, che sostengono l'adozione nel settore del trasporto pubblico.

CE4CE è stato realizzato da un partenariato transnazionale che riflette una prospettiva di intera catena del valore e di sistema, comprendendo autorità e operatori del trasporto pubblico, comuni, industria e organizzazioni di ricerca di sei Paesi dell'Europa centrale. Il coinvolgimento dei partner associati e delle reti internazionali ha inoltre sostenuto la comunicazione, lo scambio di conoscenze e il più ampio trasferimento dei risultati di progetto.

Questo manuale documenta e diffonde le principali azioni pilota e soluzioni sviluppate nell'ambito di CE4CE, offrendo indicazioni pratiche e orientamenti agli stakeholder che intendono applicare i principi dell'economia circolare nei contesti del trasporto pubblico.

Il manuale è strutturato come segue:

### Il Capitolo 2

introduce il quadro concettuale e metodologico dell'approccio CE4CE, compreso il modello AETE e la sua rilevanza per l'attuazione dell'economia circolare nel trasporto pubblico.

### Il Capitolo 3

presenta le azioni pilota CE4CE insieme alle soluzioni corrispondenti, mettendo in evidenza come le esperienze pratiche siano state tradotte in output trasferibili e orientati all'adozione.

### Il Capitolo 4

sintetizza le principali lezioni apprese in tutti i piloti e le soluzioni, individuando fattori comuni di successo, sfide e implicazioni per la replicazione.

### Il Capitolo 5

fornisce orientamenti per l'implementazione, compresi passaggi pratici, considerazioni chiave e fattori di rischio per l'adozione delle soluzioni CE4CE, e si conclude con una prospettiva sulle future applicazioni e sulla scalabilità



Figura 2: Il consorzio CE4CE alla riunione finale del progetto a Maribor, marzo 2026. Copyright: Università di Maribor.

## 1. Introduzione

### Obiettivo principale del progetto CE4CE

L'obiettivo principale del progetto CE4CE è consentire alle autorità e agli operatori del trasporto pubblico di passare da approcci lineari di gestione degli asset a modelli circolari orientati al ciclo di vita. Affrontando le barriere tecniche, organizzative e di mercato, CE4CE sostiene la preservazione del valore, la riduzione degli sprechi e un uso più efficiente delle risorse nelle infrastrutture del trasporto pubblico, nei veicoli e negli asset correlati.

Per raggiungere questo obiettivo, CE4CE combina l'attuazione di azioni pilota con lo sviluppo di soluzioni orientate all'adozione che possono essere trasferite e adattate oltre il partenariato di progetto.

### Partenariato di progetto

CE4CE è attuato da un partenariato transnazionale che riunisce autorità e operatori del trasporto pubblico, comuni, istituti di ricerca e fornitori di soluzioni di diversi Paesi dell'Europa centrale. Questa diversità consente di

testare e sviluppare approcci di economia circolare in differenti contesti operativi, organizzativi e normativi, promuovendo al contempo apprendimento reciproco e scambio tra regioni.

### Ambito del presente manuale

L'obiettivo di questo manuale è documentare, strutturare e presentare le azioni pilota e le soluzioni sviluppate nell'ambito di CE4CE. Il manuale si concentra su come i principi dell'economia circolare siano stati testati nella pratica e su come le soluzioni risultanti possano sostenere l'adozione da parte delle organizzazioni di trasporto pubblico.

Il manuale è concepito come documento di riferimento pratico per autorità del trasporto pubblico, operatori, decisori politici e altri stakeholder interessati a implementare approcci di economia circolare. Fornisce descrizioni strutturate di azioni pilota e soluzioni, mette in evidenza le lezioni apprese e sostiene la trasferibilità e la replicazione in altri contesti.

## 2. Struttura delle azioni pilota e delle soluzioni CE4CE

All'interno di CE4CE, le azioni pilota e le soluzioni sono organizzate e presentate secondo tre cluster tematici di attività definiti nell'ambito del progetto. Questi cluster tematici riflettono distinte aree di sfida dell'economia circolare nel trasporto pubblico e forniscono il quadro comune entro cui sono stati sviluppati gli output di progetto.

Ciascun cluster di attività comprende sia azioni pilota sia le relative soluzioni. Le azioni pilota sono attuate come interventi pratici in condizioni operative reali e servono a testare approcci, generare evidenze empiriche e individuare sfide tecniche, organizzative e di mercato. Sulla base dell'esperienza, dei risultati e delle evidenze generate attraverso l'attuazione delle azioni pilota e i processi di sviluppo congiunto, ciascun pilota è direttamente collegato a una corrispondente soluzione, che ne consolida i risultati in un output trasferibile e orientato all'adozione.

### Le quattro aree tematiche trattate in questo manuale sono:

- **A.1: Sviluppo del Circularity Compass CE4CE e della Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico**, inclusi un quadro strutturato di valutazione della circolarità, una Piattaforma di conoscenza basata sul web e un mercato online dell'usato e piattaforma di matching a supporto della collaborazione e della condivisione di informazioni tra gli attori del ciclo di vita del trasporto pubblico.

- **A.2: Sviluppo di soluzioni digitali congiunte per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico**, compresi un quadro analitico comune e azioni pilota sulla manutenzione predittiva e sulla simulazione di corridoi elettrificati.

- **A.3: Sviluppo di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico**, affrontando il riutilizzo di componenti infrastrutturali e applicazioni di seconda vita per asset energetici.

- **A.4: Promozione dell'adozione di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile**, con un focus su rigenerazione, riuso e meccanismi orientati al mercato.

La struttura basata sulle attività consente ai lettori di orientarsi facilmente tra azioni pilota e soluzioni all'interno della stessa area tematica e favorisce una chiara comprensione di come gli output CE4CE contribuiscano all'attuazione dei principi dell'economia circolare nei diversi segmenti dei sistemi di trasporto pubblico.

## 2.1. Collegamento delle attività CE4CE al quadro del ciclo di vita AETE

Le attività CE4CE e le relative azioni pilota e soluzioni sono allineate al quadro del ciclo di vita **AVOID-EXTEND-TRANSFORM-ENABLE (AETE)** per l'adozione dell'economia circolare nel trasporto pubblico. Questo quadro supporta l'individuazione sistematica di dove e come il valore circolare possa essere creato o preservato nelle diverse fasi del ciclo di vita degli asset del trasporto pubblico.

Ogni attività CE4CE affronta principalmente specifici campi d'azione AETE, contribuendo al contempo anche alle condizioni abilitanti del sistema. Le azioni pilota realizzate nell'ambito di ciascuna attività rendono quindi operativi i principi dell'economia circolare, intervenendo su fasi concrete del ciclo di vita quali uso, manutenzione, riuso, ricondizionamento o riconversione d'uso.

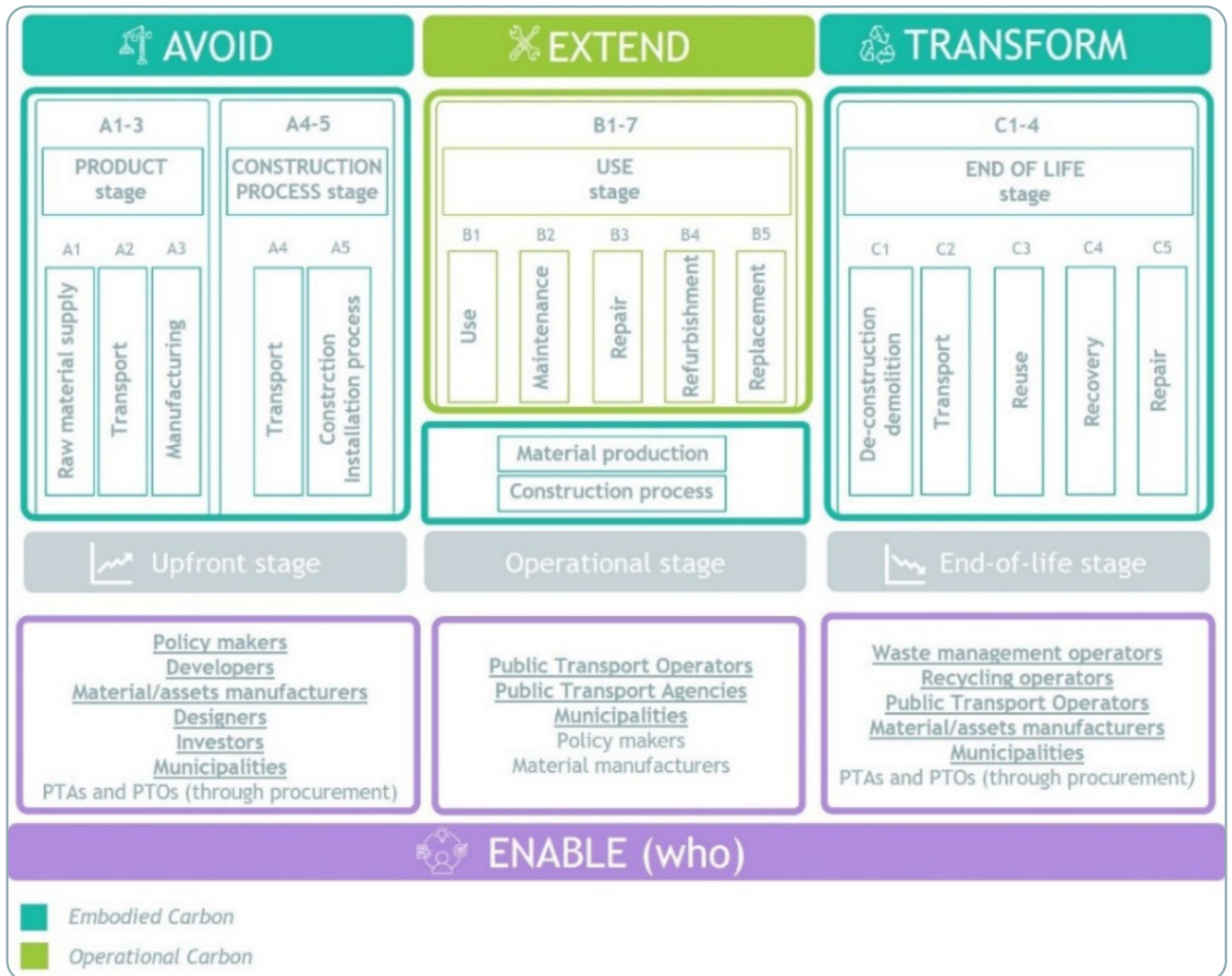


Figura 3: Ciclo di vita PTI adattato sulla base della versione EN15978.

### **A.1: Sviluppo del Circularity Compass CE4CE e della Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico**

Questa attività riguarda principalmente la dimensione ENABLE del quadro AETE. Sviluppando e testando il Circularity Compass CE4CE e la relativa Piattaforma di conoscenza, essa stabilisce le precondizioni sistemiche e organizzative necessarie per l'adozione dell'economia circolare nel trasporto pubblico.

Il pilota Circularity Compass sostiene **ENABLE** fornendo una metodologia di valutazione strutturata per individuare i gap di circolarità e progettare nuove catene del valore lungo il ciclo di vita. Favorisce riflessione strategica, coinvolgimento degli stakeholder e decisioni informate.

La Piattaforma di conoscenza e il mercato online dell'usato e di matching rafforzano ulteriormente le condizioni ENABLE promuovendo scambio di conoscenze, condivisione di informazioni e collaborazione tra gli attori del ciclo di vita. Allo stesso tempo, la piattaforma di matching sostiene indirettamente EXTEND - riuso e rigenerazione, abilitando meccanismi di mercato per componenti di seconda vita e asset ricondizionati.

Questa attività fornisce pertanto la base orizzontale su cui si fondano le azioni pilota e le soluzioni più orientate agli aspetti tecnici.

### **A.2: Soluzioni digitali per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico**

Questa attività riguarda principalmente la dimensione ENABLE del quadro AETE. Attraverso strumenti digitali per la manutenzione predittiva, la simulazione e la pianificazione aziendale, essa crea le condizioni necessarie per sostenere le azioni AVOID ed EXTEND lungo i cicli di vita delle infrastrutture e del materiale rotabile. I piloti di manutenzione predittiva contribuiscono in particolare alle fasi EXTEND - manutenzione e riparazione, consentendo interventi precoci, riducendo i guasti ed estendendo la vita utile degli asset. La simulazione di corridoi elettrificati e flussi energetici sostiene AVOID, favorendo decisioni di pianificazione più efficaci ed evitando il sovradimensionamento degli asset.

### **A.3: Soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico**

Questa attività si colloca principalmente nelle dimensioni EXTEND e TRANSFORM del quadro AETE. Le azioni pilota incentrate sul riutilizzo di scambi filoviari affrontano direttamente EXTEND - riuso, preservando il materiale e l'energia incorporati grazie al mantenimento in servizio dei componenti infrastrutturali oltre la loro prima fase di utilizzo. Il pilota realizzato a Maribor, che analizza l'applicazione di batterie usate per alimentare caricatori rapidi, riguarda EXTEND - riconversione d'uso, poiché le batterie vengono riassegnate dalla loro originaria funzione di trazione a un nuovo impiego come accumulo energetico stazionario. Allo stesso tempo, questa attività contribuisce a TRANSFORM, poiché prepara il terreno a nuove catene del valore lungo il ciclo di vita e a strategie di gestione della fine della prima vita utile.

### **A.4: Promozione dell'adozione di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile**

Questa attività riguarda principalmente EXTEND - ricondizionamento e riuso, nonché ENABLE.

Il pilota sulla rigenerazione delle unità di controllo del tram si concentra sull'estensione della vita funzionale dei componenti dei veicoli attraverso riprogettazione e ricondizionamento. La soluzione associata, una piattaforma online dell'usato e di matching, rafforza le condizioni ENABLE sostenendo condivisione delle informazioni, creazione di mercato e collaborazione tra gli attori del ciclo di vita, prerequisiti per pratiche di riuso e rigenerazione scalabili.

Nel complesso, le attività CE4CE dimostrano come differenti campi d'azione AETE vengano affrontati in modo complementare nei sistemi di trasporto pubblico. Mentre le singole azioni pilota possono concentrarsi su fasi specifiche quali manutenzione, riuso o riconversione d'uso, il loro effetto combinato contribuisce a una transizione sistemica dalla gestione lineare degli asset verso sistemi di trasporto pubblico circolari e orientati al ciclo di vita.

Una panoramica dei cluster tematici di attività e delle corrispondenti coppie pilota-soluzione è fornita nella Tabella 1, che riassume le relazioni tra azioni pilota, soluzioni e partner coinvolti.

Attività	Pilota	Soluzione	Tipo di soluzione	Azione AETE primaria
<b>A.1 Sviluppo del Circularity Compass CE4CE e della Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico</b>	P.1 Circularity Compass per il trasporto pubblico - valutazione dei gap di circolarità e progettazione di nuove catene del valore per aumentare l'efficienza delle risorse	S.1 Piattaforma di conoscenza CE4CE per il trasporto pubblico circolare	Piattaforma digitale / hub di conoscenza	ENABLE - Conoscenza di sistema e collaborazione
		S.2 Mercato online dell'usato e piattaforma di matching per parti usate, prodotti e condivisione di informazioni	Marketplace digitale / strumento di matching	EXTEND - Abilitazione del riuso / della rigenerazione
<b>A.2 Sviluppo di soluzioni digitali congiunte per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico</b>	P.2 & P.3 Ottimizzazione digitale delle infrastrutture e dei veicoli tramite manutenzione predittiva	S.3 Moduli per la manutenzione predittiva delle infrastrutture e del materiale rotabile	Sistema di monitoraggio / soluzione digitale	EXTEND - Manutenzione / Riparazione
	P.4 Simulazione di un corridoio elettrificato e dei flussi energetici per simulare scenari circolari di potenziamento dell'elettrificazione (corsia bus, alimentazione elettrica e ricarica in movimento)	S.4 Strumento di pianificazione aziendale circolare per flotte e infrastrutture di trasporto pubblico elettrificate	Strumento di pianificazione / strumento di supporto alle decisioni	AVOID - Pianificazione ex ante / ottimizzazione del sistema
<b>A.3 Sviluppo di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico</b>	P.5 Dimostrazione della fattibilità del riutilizzo di scambi filoviari	S.5 Definizione di criteri di adozione per il riutilizzo di scambi filoviari	Metodologia / quadro decisionale	EXTEND - Riuso
	P.6 Analisi di applicazioni di batterie usate per immagazzinare energia rinnovabile destinata all'alimentazione di un caricatore rapido, come esempio di orientamento strategico verso la circolarità	S.6 Modelli di business trasferibili per l'utilizzo di batterie di trazione di seconda vita come accumulo stazionario	Modello di business / quadro di implementazione	EXTEND - Riconversione d'uso
<b>A.4 Promozione dell'adozione di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile</b>	P.7 Progettazione delle unità di controllo del tram nell'ambito della rigenerazione dei tram	Promozione e scalabilità supportate tramite S.2 Mercato online dell'usato e di matching		EXTEND - Ricondizionamento / Rigenerazione

Tabella 1: Panoramica dei piloti CE4CE e delle soluzioni corrispondenti per attività.

### 3. Azioni pilota e soluzioni CE4CE

Le azioni pilota costituiscono un elemento centrale di implementazione del progetto CE4CE. Esse traducono i concetti, i metodi e gli strumenti dell'economia circolare in applicazioni concrete in condizioni operative reali, consentendo ad autorità del trasporto pubblico, operatori e altri stakeholder di testare approcci, valutarne la fattibilità e maturare esperienza pratica.

I piloti realizzati nell'ambito di CE4CE assolvono a più finalità. Forniscono evidenze empiriche sulle implicazioni tecniche, organizzative ed economiche delle pratiche di economia circolare, sostengono l'apprendimento tra i partner e riducono le incertezze legate all'implementazione e all'adozione. Allo stesso tempo, le azioni pilota fungono da ponte tra obiettivi strategici e sviluppo di soluzioni, generando le evidenze e i dati necessari a consolidare l'esperienza dei piloti in soluzioni trasferibili e scalabili.

All'interno di CE4CE, le azioni pilota si concentrano su un insieme di **temi pilota definiti**, che riflettono i principali punti di leva dell'economia circolare affrontati dal progetto lungo i cicli di vita delle infrastrutture del trasporto pubblico e del materiale rotabile:

- Valutazione della circolarità e progettazione di nuove catene del valore lungo il ciclo di vita
- Manutenzione predittiva delle infrastrutture del trasporto pubblico e del materiale rotabile
- Simulazione digitale di corridoi di trasporto pubblico elettrificati e dei flussi energetici
- Riutilizzo di componenti delle infrastrutture del trasporto pubblico
- Utilizzo di batterie di trazione di seconda vita come accumulo energetico stazionario
- Rigenerazione e riuso di componenti del materiale rotabile

Questi temi pilota sono affrontati attraverso **sette azioni pilota**, attuate da autorità e operatori del trasporto pubblico in diverse città dell'Europa centrale:

- Un pilota sul **Circularity Compass per il trasporto pubblico**, coordinato dall'associazione trolley:motion (con il supporto di Rupprecht Consult), ha sviluppato e testato uno strumento di valutazione strutturato per individuare i gap di circolarità e progettare nuove catene del valore al fine di aumentare l'efficienza delle risorse. Il pilota ha incluso lo sviluppo di un'interfaccia web e l'applicazione pratica all'interno del partenariato di progetto.
- A **Lipsia**, in Germania, l'operatore locale del trasporto pubblico LVB ha realizzato un pilota sulla **manutenzione predittiva**, applicando il monitoraggio digitale delle condizioni a

infrastrutture selezionate e a componenti del materiale rotabile per testare approcci di manutenzione basati sui dati e sostenere l'estensione della vita utile.

- A **Bergamo**, in Italia, ATB ha realizzato un analogo **pilota sulla manutenzione predittiva** in un diverso contesto operativo, consentendo il confronto tra metodologie, requisiti di dati e condizioni organizzative tra reti differenti.
- A **Gdynia**, in Polonia, l'operatore del trasporto pubblico PKA ha realizzato un pilota sulla **simulazione di corridoi di trasporto pubblico elettrificati** per analizzare i flussi energetici e valutare scenari di elettrificazione circolare, inclusi la ricarica in movimento e l'elettrificazione delle corsie bus.
- A **Szeged**, in Ungheria, l'operatore del trasporto pubblico SZKT ha realizzato un pilota che dimostra il **riutilizzo di scambi filoviari**, concentrandosi sull'estensione della vita utile di componenti infrastrutturali fortemente sollecitati e sulla riduzione degli sprechi di materiale.
- A **Maribor**, in Slovenia, il Comune di Maribor - MOM ha analizzato l'**utilizzo di batterie di trazione di seconda vita** come accumulo energetico stazionario a supporto di infrastrutture di ricarica rapida alimentate da fonti rinnovabili, esplorandone la fattibilità tecnica e gli aspetti di integrazione.
- A **Szeged**, SZKT ha inoltre realizzato un ulteriore pilota dedicato alla **rigenerazione e riprogettazione delle unità di controllo del tram**, con l'obiettivo di estendere la vita utile dei componenti e consentirne il riuso attraverso un design adattato e la condivisione delle informazioni.

Mentre le azioni pilota si concentrano sulla sperimentazione e validazione di approcci in ambienti operativi reali, le soluzioni rappresentano output consolidati e orientati all'adozione, sviluppati sulla base dell'attuazione dei piloti e del lavoro analitico congiunto.

Le soluzioni traducono l'esperienza dei piloti in **strumenti strutturati, metodologie, criteri e modelli di business** che possono essere trasferiti, replicati e scalati in altri contesti di trasporto pubblico. Ogni soluzione è collegata a una o più azioni pilota della stessa area tematica di attività e si basa su evidenze empiriche, feedback degli stakeholder e processi iterativi di affinamento.

Per ciascuna area di attività, le azioni pilota sono descritte insieme alle relative soluzioni, mettendo in evidenza il percorso che va dalla sperimentazione e validazione al consolidamento e al trasferimento.

## 3.1. Attività A.1: Sviluppo del Circularity Compass CE4CE e della Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico

Sebbene questa attività non appartenga formalmente al pacchetto di lavoro “Dimostrare come il trasporto pubblico possa diventare circolare”, il Circularity Compass è stato implementato e validato attraverso un processo di test analogo a un pilota. Lo strumento è stato sviluppato e successivamente testato con stakeholder del trasporto pubblico attraverso workshop, indagini ed esercizi di validazione che hanno coinvolto operatori, autorità,

ricercatori e rappresentanti dell’industria. Queste attività hanno consentito una verifica pratica della metodologia e l’affinamento dello strumento sulla base di feedback operativi reali. Il Circularity Compass rappresenta quindi un pilota tecnico e una soluzione a supporto della transizione verso sistemi di trasporto pubblico circolari, pur essendo collocato organizzativamente nel pacchetto di lavoro metodologico del progetto anziché nel pacchetto di lavoro dimostrativo.

### 3.1.1. Pilota P.1: Circularity Compass per il trasporto pubblico

#### Breve descrizione del pilota

Il pilota Circularity Compass è stato sviluppato per affrontare una sfida chiave nella transizione verso sistemi di trasporto pubblico circolari: la mancanza di strumenti pratici che aiutino le organizzazioni a comprendere dove e come i principi dell’economia circolare possano essere integrati nelle operazioni quotidiane e nella pianificazione strategica.

Sebbene i concetti di economia circolare siano sempre più discussi nel settore dei trasporti, autorità e operatori del trasporto pubblico spesso non dispongono di approcci strutturati per tradurre tali principi in azioni concrete. Il Circularity Compass mira quindi a fornire uno strumento pratico di orientamento che aiuti le organizzazioni a valutare le proprie pratiche attuali di circolarità e a individuare opportunità di miglioramento nell’intero sistema di trasporto pubblico.

L’obiettivo del pilota era sviluppare e validare una metodologia che consenta agli stakeholder del trasporto pubblico di valutare le pratiche di economia circolare lungo il ciclo di vita delle infrastrutture, dei veicoli e dei sistemi energetici. A differenza dei piloti infrastrutturali o tecnologici implementati all’interno di CE4CE, il Circularity Compass rappresenta una soluzione basata sulla conoscenza, progettata per abilitare la transizione circolare attraverso una migliore comprensione del sistema e un processo decisionale più efficace.

#### La soluzione Circularity Compass

[Il Circularity Compass](#) è uno strumento online di [autovalutazione](#) disponibile tramite la Piattaforma di conoscenza CE4CE. Fornisce un quadro strutturato che consente alle organizzazioni di trasporto pubblico di valutare le pratiche di economia circolare nelle diverse componenti dei propri sistemi.

La valutazione copre quattro aree chiave dei sistemi di trasporto pubblico: le flotte, compresi veicoli e batterie; le infrastrutture; i sistemi energetici; e la governance, che comprende le condizioni organizzative e abilitanti. Affrontando congiuntamente queste aree, lo strumento riflette la natura sistemica della circolarità nel trasporto pubblico.

Il quadro segue la logica del ciclo di vita circolare Avoid - Extend - Transform - Enable (AETE). In pratica, ciò significa che le organizzazioni sono guidate a riflettere su come ridurre il consumo di risorse attraverso una migliore pianificazione e approvvigionamento, estendere la vita utile degli asset attraverso manutenzione e ricondizionamento, trasformare gli asset attraverso riuso o riconversione d’uso e creare le condizioni organizzative necessarie a sostenere l’attuazione dei principi circolari.

Al centro dello strumento vi è un questionario strutturato di autovalutazione che copre le principali fasi del ciclo di vita, dalla produzione e dagli approvvigionamenti fino all’esercizio, alla manutenzione e alla gestione di fine vita. I risultati forniscono una chiara panoramica delle pratiche attuali di circolarità e mettono in evidenza le aree in cui le organizzazioni possono sviluppare ulteriormente strategie e soluzioni circolari.

## 10 R-principles for circular public transport systems



Figura 4: Adattamento dei principi 10R dell'economia circolare ai sistemi di trasporto pubblico.

### Risorse necessarie

L'implementazione del Circularity Compass richiede principalmente risorse organizzative e analitiche. Si basa sul coinvolgimento degli stakeholder, sulla facilitazione da parte di esperti e sull'accesso alle conoscenze operative all'interno delle organizzazioni di trasporto pubblico.

La fase di test è stata condotta attraverso workshop, consultazioni con esperti e questionari di autovalutazione che hanno coinvolto operatori del trasporto pubblico, autorità e ricercatori. Questo processo collaborativo ha garantito che lo strumento rispecchiasse le reali condizioni operative e fosse applicabile in diversi contesti organizzativi.

### Risultati/benefici attesi

Il Circularity Compass consente alle organizzazioni di trasporto pubblico di individuare i gap di circolarità, valutare il proprio grado di preparazione all'adozione dell'economia circolare ed esplorare possibili aree di miglioramento lungo l'intero ciclo di vita del trasporto pubblico.

Strutturando informazioni complesse in un quadro di valutazione chiaro, lo strumento sostiene la sensibilizzazione e la pianificazione strategica. Aiuta le organizzazioni a comprendere meglio come i principi dell'economia circolare possano essere applicati nella pratica, in particolare in ambiti quali la gestione delle infrastrutture, l'esercizio delle flotte e i sistemi energetici.

### Circularity Compass

The Circularity Compass is a life-cycle orientation tool designed for public transport operators and authorities to foster circularity approaches, principles, and solutions through their planning, procurement, operations, maintenance, and end-of-life stages of public transport systems.

It aims to enhance understanding and raises awareness of the importance and benefits of implementing a circular economy, assesses current status and readiness levels, and uncovers actionable solutions to operationalise the transition towards circular public transport systems where resources are used mindfully, assets are durable and repairable by design, and ecological footprint is being reduced to net zero.

- Vehicles
- Batteries
- Railway Infrastructure
- Electric Infrastructure
- Buildings
- Energy
- Knowledge, Governance & Policy

Figura 5: Interfaccia online dello strumento di autovalutazione CE4CE Circularity Compass.

## Scalabilità e potenziale di sviluppo futuro

Il Circularity Compass offre un quadro scalabile a supporto della transizione verso pratiche di economia circolare nel settore del trasporto pubblico. Come strumento di sensibilizzazione e autovalutazione, aiuta le organizzazioni a individuare i gap di circolarità e a dare priorità alle azioni relative a infrastrutture, flotte e sistemi energetici.

I risultati della valutazione possono fungere da punto di partenza per analisi più

dettagliate, come valutazioni del ciclo di vita, strategie di approvvigionamento circolare o pianificazione dell'efficienza delle risorse. Allo stesso tempo, l'ulteriore sviluppo e la rilevanza pratica dello strumento dipendono fortemente dal coinvolgimento attivo degli stakeholder e dal continuo contributo di conoscenze ed esperienze del settore.

Con un apporto costante da parte degli stakeholder, il Circularity Compass può evolversi in una più ampia piattaforma di conoscenza e benchmarking a sostegno della transizione circolare nei sistemi di trasporto pubblico.

### 3.1.2. Soluzione S.1: Piattaforma di conoscenza per il trasporto pubblico circolare

#### Breve descrizione della soluzione

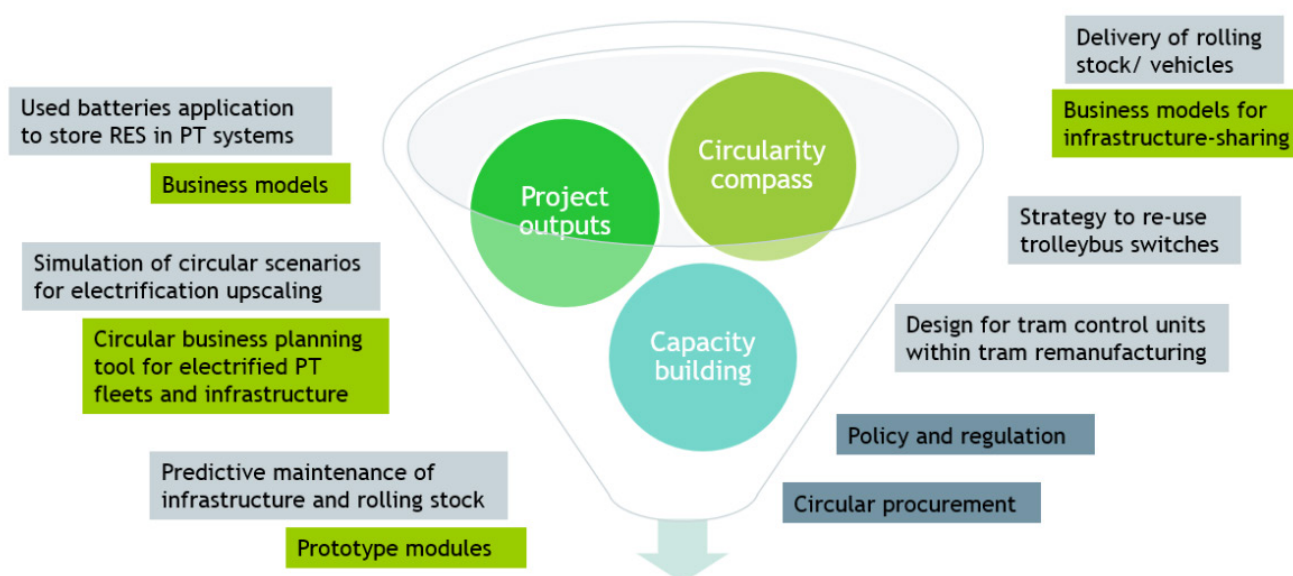
La Piattaforma di conoscenza CE4CE è un hub online della conoscenza progettato per sostenere la transizione verso pratiche di economia circolare nel settore del trasporto pubblico. Offre un ambiente digitale strutturato in cui gli stakeholder del trasporto pubblico possono accedere a strumenti, buone pratiche, metodologie e materiali formativi relativi alla circolarità nei sistemi di trasporto.

La piattaforma affronta una sfida chiave individuata durante il progetto: le conoscenze relative alle soluzioni di trasporto pubblico circolare sono spesso frammentate e difficilmente accessibili ai professionisti. Centralizzando le risorse pertinenti e collegandole ai risultati pratici del progetto, la piattaforma sostiene il rafforzamento delle capacità, lo scambio di conoscenze e una più ampia adozione delle soluzioni circolari.

La piattaforma è accessibile pubblicamente all'indirizzo: <https://circularity4publictransport.eu/>

#### Obiettivi della soluzione

L'obiettivo principale della Piattaforma di conoscenza CE4CE è rafforzare la capacità degli stakeholder del trasporto pubblico di implementare i principi dell'economia circolare. In pratica, la piattaforma funge da punto di accesso centralizzato in cui gli utenti possono accedere a strumenti e risorse di economia circolare, esplorare esempi pratici e soluzioni testate e comprendere meglio come affrontare i gap di circolarità individuati. Essa sostiene il trasferimento di conoscenze nel settore e aiuta al contempo le organizzazioni a orientarsi tra approcci disponibili e percorsi di implementazione.



### CE4CE knowledge platform matches new skills with knowledge

Figura 6: Struttura concettuale della Piattaforma di conoscenza CE4CE che collega soluzioni circolari, strumenti e capacity building.

## Concetto di base della soluzione

La Piattaforma di conoscenza CE4CE è stata sviluppata in parallelo con il **Circularity Compass**, che funge da strumento di autovalutazione per valutare le pratiche di economia circolare nelle organizzazioni di trasporto pubblico.

Le due soluzioni sono concettualmente collegate:

- il **Circularity Compass** consente alle organizzazioni di valutare le proprie prestazioni di circolarità e individuare aree di miglioramento
- la **Piattaforma di conoscenza** fornisce le risorse, gli strumenti e gli esempi che aiutano ad affrontare i gap individuati

In questo modo, la piattaforma collega i **risultati della valutazione con un supporto pratico all'implementazione**.

Il concetto della piattaforma si basa sui principi 10R dell'economia circolare, adattati al contesto del trasporto pubblico. Tali principi guidano l'organizzazione delle risorse di conoscenza nelle principali componenti del sistema di trasporto pubblico, quali infrastrutture, veicoli, sistemi energetici e governance.

La Piattaforma di conoscenza è strutturata in cinque componenti principali:

1. **Mappa delle competenze** - individua le competenze e le conoscenze chiave necessarie per implementare i principi dell'economia circolare nel trasporto pubblico.
2. **Circularity Compass** - un questionario online di autovalutazione che consente alle organizzazioni di valutare il proprio livello di circolarità.
3. **Buone pratiche** - una raccolta di casi studio che mostrano soluzioni circolari nel settore.
4. **Hub di conoscenza** - un archivio di strumenti, linee guida, report e metodologie a supporto della pianificazione, dell'esercizio e della manutenzione in ottica circolare.
5. **Forum di matching** - un marketplace digitale pianificato che consente lo scambio di pezzi di ricambio e attrezzature tra organizzazioni di trasporto pubblico

Attraverso questa struttura, la piattaforma collega la **valutazione della circolarità, le risorse di conoscenza e le soluzioni pratiche**, creando un ambiente di supporto completo per le organizzazioni che implementano sistemi di trasporto pubblico circolari.

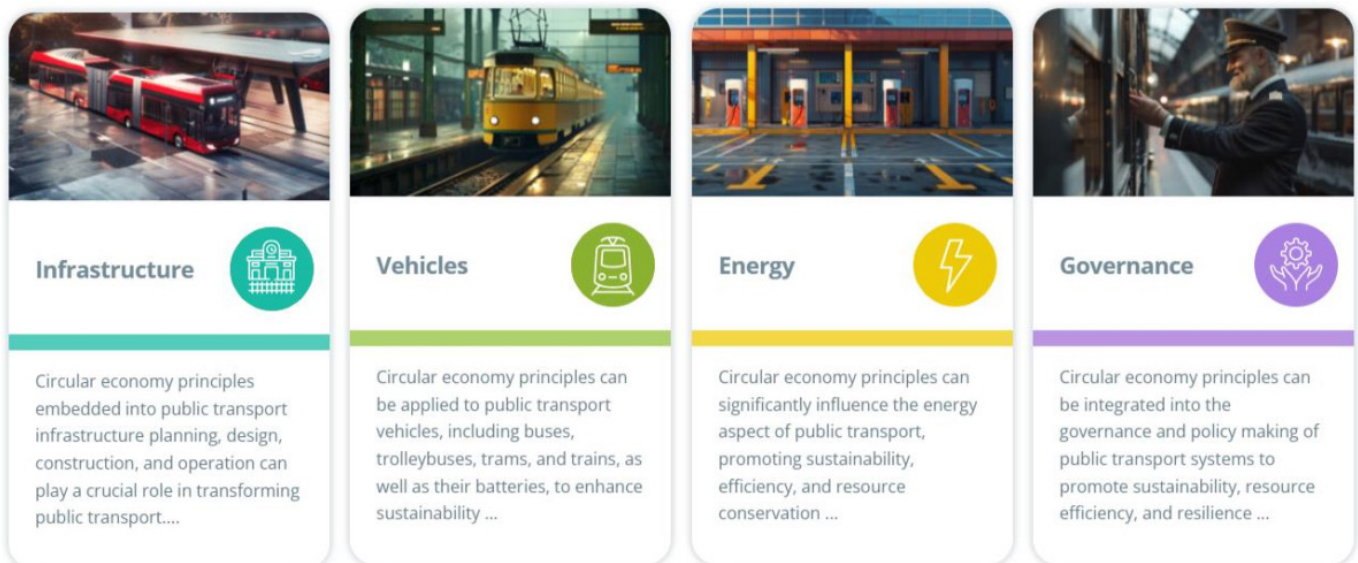


Figura 7: Principali aree di competenza della Piattaforma di conoscenza CE4CE: infrastrutture, veicoli, energia e governance.

## Conclusione della soluzione

La Piattaforma di conoscenza CE4CE offre un ambiente strutturato e scalabile a supporto della transizione verso sistemi di trasporto pubblico circolari. Collegando valutazione (Circularity Compass), risorse di conoscenza e soluzioni pratiche, consente agli stakeholder di passare dalla consapevolezza all'implementazione. Il suo valore a lungo termine dipende dallo sviluppo continuo dei contenuti, dal coinvolgimento degli stakeholder e dall'integrazione con le iniziative del settore, che le permettono di evolvere in un punto di riferimento centrale per le pratiche di economia circolare nel trasporto pubblico.

### 3.1.3. Soluzione S.2: Mercato online dell'usato e piattaforma di matching

#### Breve descrizione della soluzione

La soluzione introduce una piattaforma digitale di matching che consente agli stakeholder del trasporto pubblico di scambiare informazioni su veicoli usati, pezzi di ricambio e componenti infrastrutturali, favorendone il riuso e la rigenerazione.

Sviluppata come modulo funzionale della Piattaforma di conoscenza CE4CE, la soluzione integra il suo ruolo di conoscenza e sviluppo delle capacità fornendo uno

strumento pratico per individuare e realizzare casi d'uso circolari. Essa risponde alla mancanza di meccanismi di scambio strutturati nel settore, dove le opportunità di riuso vengono spesso perse a causa della limitata visibilità e della frammentazione della comunicazione.

Il forum di matching è accessibile pubblicamente all'indirizzo:

<https://circularity4publictransport.eu/matchmaking-forum/>

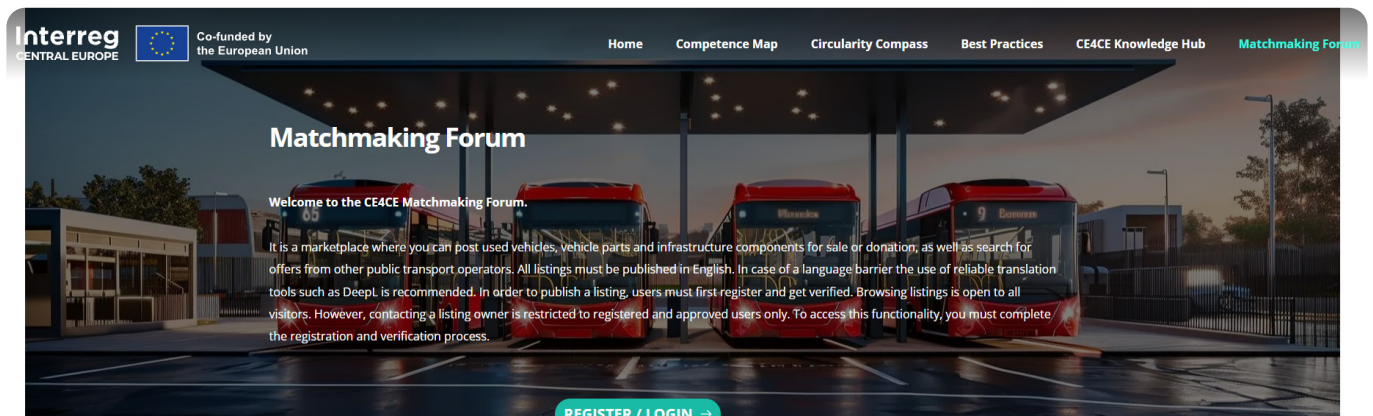


Figura 8: Interfaccia utente del forum di matching CE4CE - pagina di destinazione.

#### Obiettivi della soluzione

L'obiettivo principale della soluzione è consentire uno scambio strutturato di asset usati nel settore del trasporto pubblico e aumentare la visibilità dei componenti riutilizzabili.

Migliorando il flusso informativo e sostenendo i collegamenti tra operatori, autorità e fornitori, la piattaforma contribuisce alle pratiche di riuso e rigenerazione, riduce la dismissione prematura degli asset e rafforza la collaborazione nel settore.

#### Concetto di base della soluzione

La soluzione si basa su un **forum digitale di matching** che mette in contatto domanda e offerta di asset usati del trasporto pubblico. Il suo funzionamento segue un processo semplice:

1. le organizzazioni pubblicano offerte o richieste di veicoli, componenti o elementi infrastrutturali
2. gli utenti cercano e filtrano gli annunci in base a criteri rilevanti
3. le parti interessate entrano in contatto tramite la piattaforma

La piattaforma agisce come **strumento di condivisione delle informazioni e di matching**, non come sistema transazionale. Riducendo i gap informativi e aumentando la trasparenza, crea le condizioni affinché le pratiche di riuso e rigenerazione possano crescere di scala nel settore.

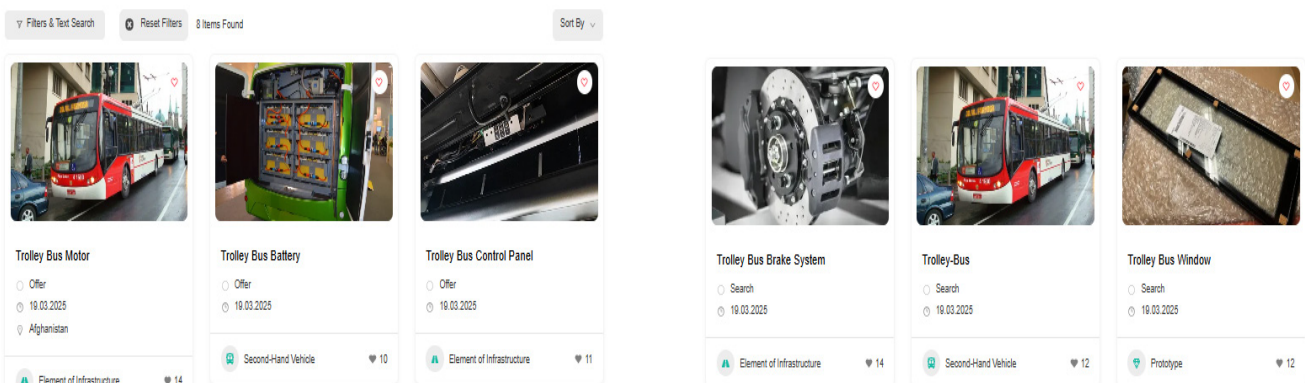


Figura 9: Esempi di annunci nel forum di matching CE4CE per veicoli usati, componenti ed elementi infrastrutturali.

### Conclusione della soluzione

Il forum di matching rappresenta uno strumento pratico abilitante che sostiene l'implementazione dell'economia circolare facilitando il riuso ed estendendo il ciclo di vita degli asset del trasporto pubblico. La sua efficacia aumenta con una partecipazione più ampia, poiché un numero

maggiore di utenti migliora la visibilità e le opportunità di matching.

Con il continuo coinvolgimento degli stakeholder e l'ulteriore sviluppo delle funzionalità, la piattaforma ha il potenziale per diventare un importante meccanismo di supporto alle catene del valore circolari nel trasporto pubblico.

## 3.2. Attività A.2: Sviluppo di soluzioni digitali congiunte per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico

Questa attività si concentra sull'applicazione di strumenti digitali per sostenere una gestione circolare ed efficiente delle risorse nelle infrastrutture del trasporto pubblico e nel materiale rotabile. Essa esplora come il monitoraggio e la simulazione basati sui dati possano migliorare le pratiche di manutenzione, la pianificazione infrastrutturale e l'efficienza operativa lungo il ciclo di vita del sistema.

Nell'ambito di questa attività sono stati realizzati tre piloti a Lipsia, Bergamo e Gdynia. I piloti di Lipsia e Bergamo testano la manutenzione

predittiva attraverso il monitoraggio digitale delle condizioni, mentre il pilota di Gdynia applica la modellazione del gemello digitale e la simulazione dei flussi energetici per sostenere la pianificazione di corridoi di trasporto pubblico elettrificati.

I risultati e le esperienze di questi piloti costituiscono la base per lo sviluppo di una soluzione congiunta che fornisce strumenti digitali modulari per la manutenzione predittiva e la pianificazione circolare dei sistemi di trasporto pubblico, presentata nella sezione seguente.

### 3.2.1. Pilota P.2: Ottimizzazione digitale manutenzione predittiva (Lipsia, Germania)

#### Breve descrizione del pilota

Questo pilota si concentra sull'implementazione di approcci di manutenzione predittiva per le infrastrutture del trasporto pubblico e il materiale rotabile attraverso l'uso del monitoraggio digitale delle condizioni. Realizzato da Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) a Lipsia, il pilota mira a passare da una manutenzione reattiva e a scadenza a una manutenzione predittiva basata sui dati, così da estendere la vita utile degli asset, ridurre i guasti non

#### delle infrastrutture e dei veicoli tramite

programmati e minimizzare gli interventi ad alta intensità di risorse.

Tre veicoli tranviari sono stati equipaggiati con sensori, telecamere e sistemi laser per monitorare i binari e la linea aerea lungo 14 km della Linea 1 durante il normale esercizio. I dati raccolti vengono analizzati per rilevare i primi segni di usura e consentire azioni di manutenzione mirate; è stato inoltre esplorato il monitoraggio del consumo energetico.

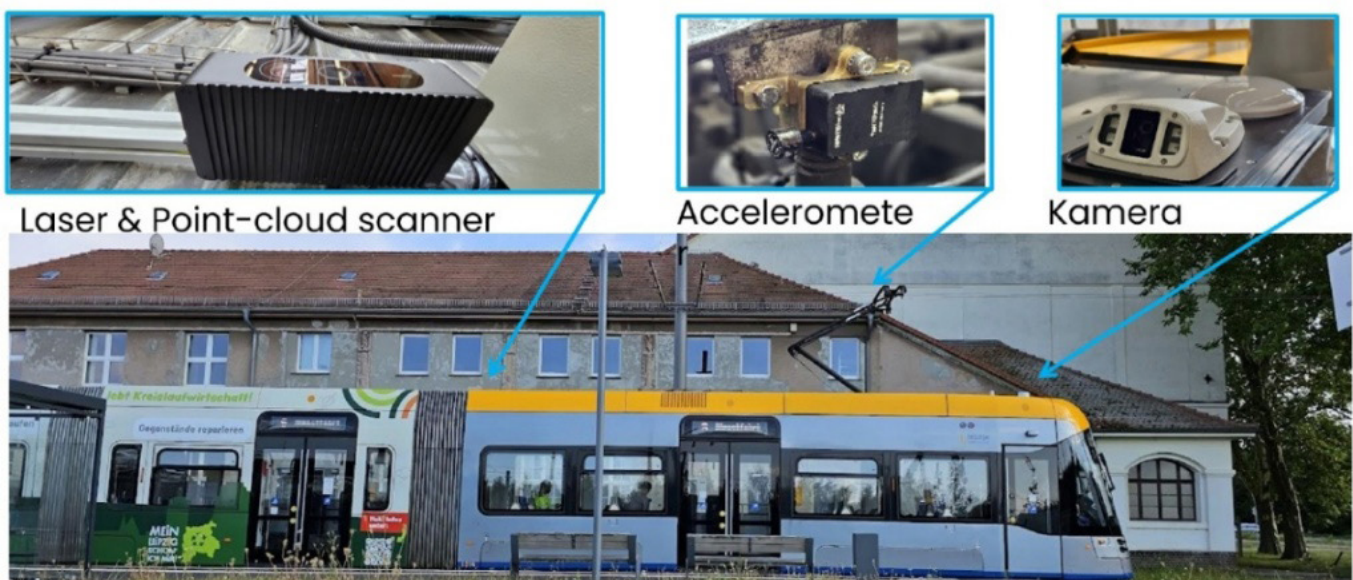


Figura 10: Parte del sistema di monitoraggio delle vibrazioni installato sui tram (PantoHealth).

## Risorse necessarie

L'implementazione ha richiesto sistemi sensoristici, infrastrutture di elaborazione dei dati e software analitici, combinati con il coordinamento tra operatore, fornitori di tecnologia e partner di

progetto. Ulteriori sforzi hanno riguardato la formazione del personale, l'integrazione nei flussi di lavoro e il rispetto delle norme ferroviarie e delle procedure di certificazione per l'impiego in condizioni operative reali.

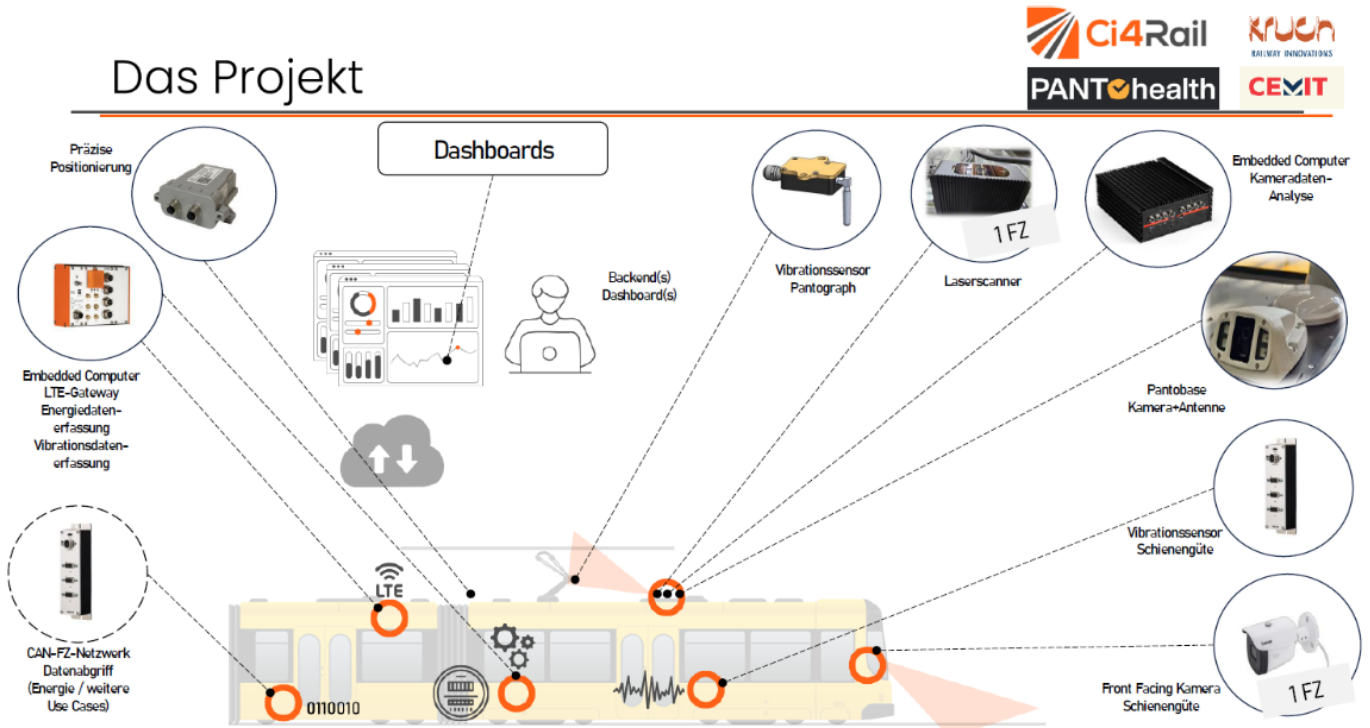


Figura 11: Panoramica dell'assetto di monitoraggio per la manutenzione predittiva implementato nel pilota di Lipsia.

## Evidenze di successo

Il pilota ha confermato che il monitoraggio continuo basato sui veicoli è fattibile ed efficace in condizioni operative reali (giugno 2024 - febbraio 2025), consentendo l'individuazione precoce di difetti infrastrutturali.

Sono stati individuati otto punti critici della linea aerea, inclusi due isolatori di sezione regolati,

mentre sono state rilevate otto aree di difetto del binario, comprese tre rotaie interrotte non rilevate in precedenza; dieci siti sono stati ispezionati e sono state attuate azioni correttive.

I risultati hanno portato all'aggiornamento dei piani di manutenzione nelle tratte con deterioramento accelerato e a un miglioramento dell'affidabilità dei dati grazie all'integrazione di un'interfaccia CAN-BUS diretta per il monitoraggio energetico.

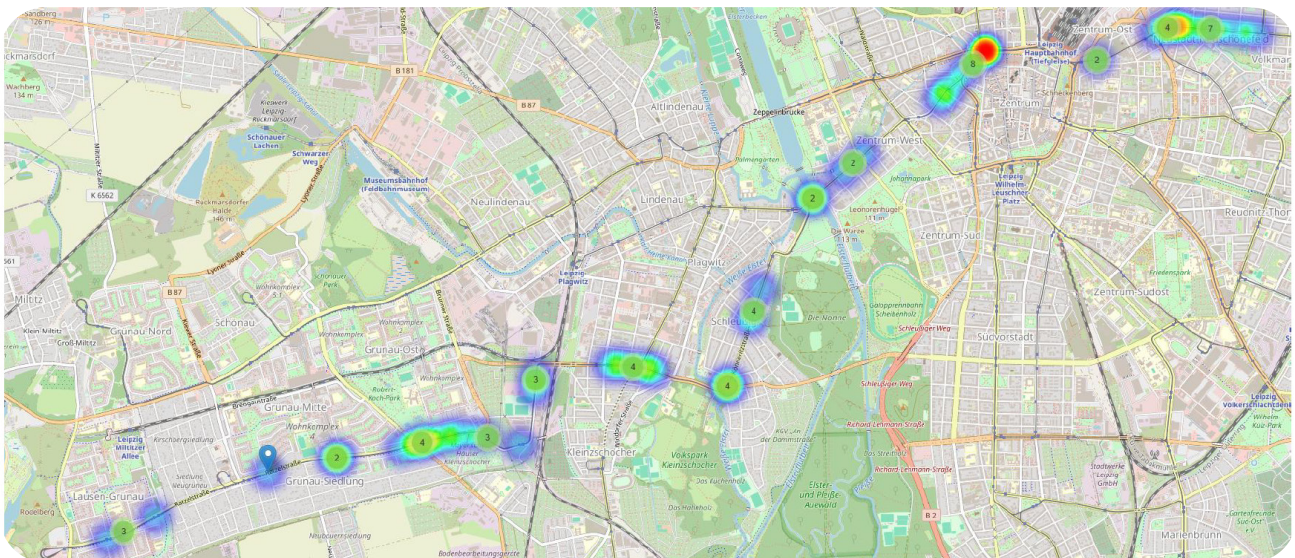


Figura 12: Mappa di calore con le aree di difetto del binario.

## Sfide incontrate

Durante l'implementazione sono emerse diverse sfide. Tra queste, l'integrazione di nuovi sistemi sensoristici nei veicoli esistenti, la garanzia della qualità e dell'affidabilità dei dati e la gestione dei limiti dei sistemi esistenti di misurazione energetica. In particolare, l'inaffidabilità dei dati energetici legacy ha richiesto l'individuazione di fonti dati alternative e l'integrazione di interfacce aggiuntive per accedere direttamente ai dati energetici del veicolo.

Le sfide operative relative all'installazione durante il servizio in corso, al coordinamento tra più fornitori di servizi e alla necessità di soddisfare severi requisiti di certificazione ferroviaria sono state affrontate attraverso un'implementazione per fasi, un coordinamento stretto e test iterativi.

### 3.2.2. Pilota P.2: Ottimizzazione digitale delle infrastrutture e dei veicoli tramite manutenzione predittiva (Bergamo, Italia)

#### Breve descrizione del pilota

Questo pilota si concentra sulla manutenzione predittiva delle infrastrutture tranviarie e del materiale rotabile attraverso il monitoraggio digitale delle condizioni e gli strumenti di simulazione. Realizzato da Azienda Trasporti Bergamo (ATB) in cooperazione con KRUCH Railway Innovations, mira a migliorare l'affidabilità dell'infrastruttura e a ottimizzare l'uso dell'energia all'interno della rete.

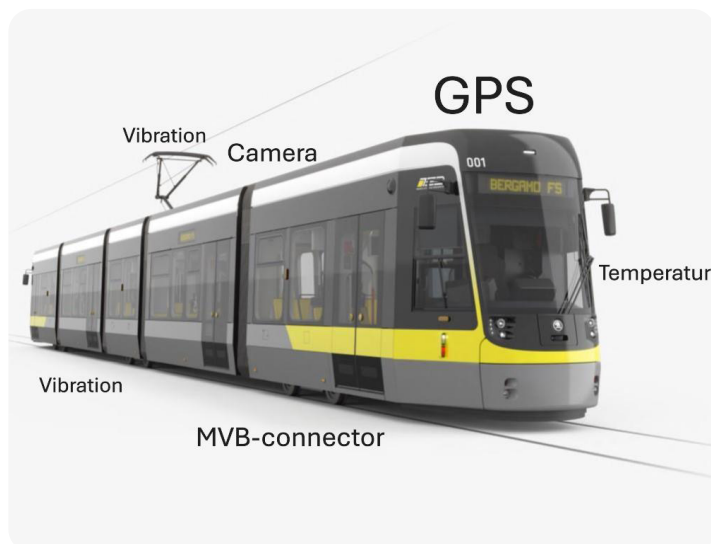


Figura 13: Sistema di monitoraggio basato su sensori e strumento di simulazione digitale utilizzati nel pilota di manutenzione predittiva di Bergamo.

#### Risorse necessarie

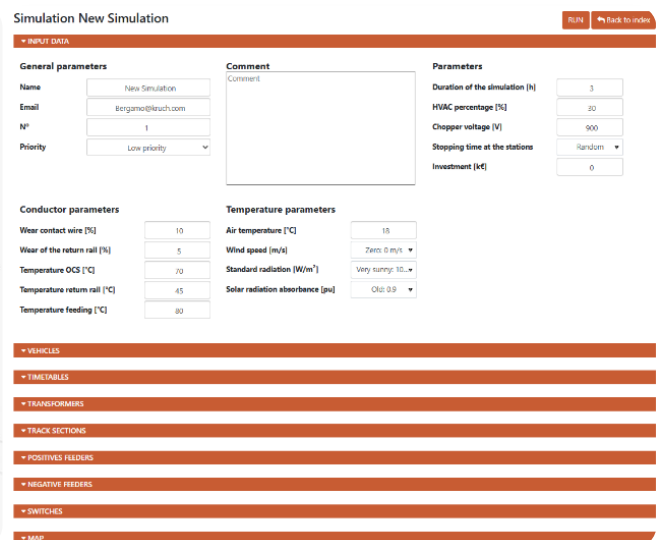
L'implementazione ha richiesto sistemi sensoristici modulari, unità di calcolo a bordo, infrastrutture di comunicazione e strumenti di analisi dei dati. Inoltre, è stato sviluppato un ambiente di simulazione basato su MATLAB e SIMULINK/SimPowerSystems per modellare la rete tranviaria

## Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un elevato potenziale di trasferibilità grazie al suo approccio modulare e all'uso dei veicoli come piattaforme di monitoraggio, che consente un'implementazione scalabile senza apparecchiature ispettive dedicate.

Tra le principali lezioni apprese figurano l'importanza della qualità dei dati, dell'implementazione per fasi e dell'integrazione degli strumenti di analisi nei processi di manutenzione. L'approccio sostiene i principi dell'economia circolare consentendo interventi precoci, estendendo la vita utile degli asset e migliorando l'efficienza delle risorse.

Un veicolo tranviario in servizio quotidiano è stato equipaggiato con un sistema sensoristico modulare, comprensivo di moduli GNSS, sensori di accelerazione, telecamere, interfacce CAN-bus e dispositivi di edge computing a bordo. Il sistema consente il monitoraggio continuo dell'interazione pantografo-linea aerea e la raccolta dei dati in tempo reale. Parallelamente, è stato sviluppato un gemello digitale della rete di alimentazione tranviaria per simulare i flussi energetici e analizzare diversi scenari operativi.



e il suo sistema di alimentazione elettrica. Il pilota ha richiesto anche il coordinamento tra ATB, KRUCH e altri stakeholder, inclusi calibrazione del sistema, formazione del personale e integrazione nei processi di manutenzione e gestione degli asset.

KRUCH «On November 5, we installed the sensors and on-board computer on the tram and its pantograph:

- High precision GPS
- Camera
- Accelerometers
- Rail certified edge-computer and communication

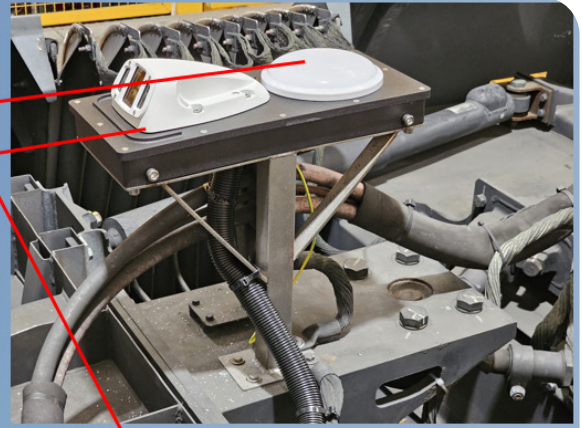
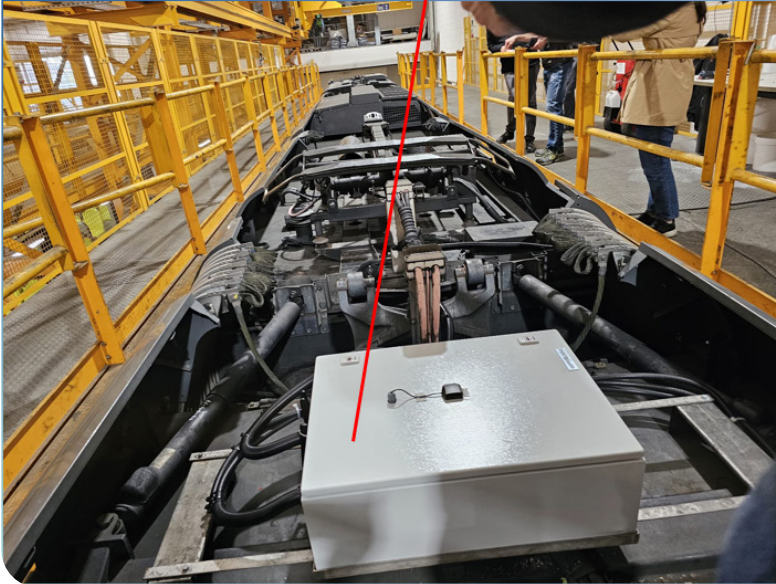


Figura 14: Sistema sensoristico installato sul pantografo del tram per monitorare l'interazione tra veicolo e linea di contatto aerea.

## DEVELOPING A DIGITAL TWIN: Energy Flow Simulation

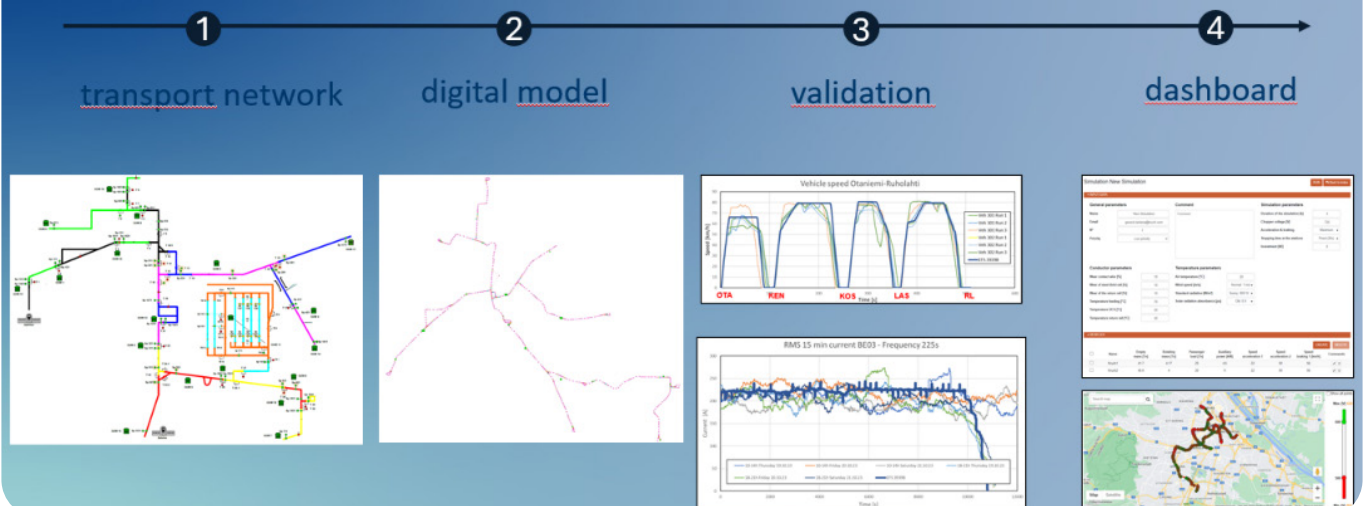


Figura 15: Utilizzo di modellazione del gemello digitale e simulazione dei flussi energetici per analizzare scenari operativi ed energetici nella rete tranviaria di Bergamo.

## Evidenze di successo

Il pilota ha confermato che la combinazione di monitoraggio in tempo reale e simulazione sostiene la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione energetica. Il sistema di monitoraggio è stato installato sul veicolo tranviario n. 004 operante sulla linea T1, consentendo la raccolta continua di dati ogni 1-3 secondi, inclusi parametri di posizione, velocità e consumo energetico.

Il sistema ha rilevato interazioni irregolari tra pantografo e linea aerea e ha individuato punti

con maggiore rischio di usura. Parallelamente, è stato sviluppato un gemello digitale della rete tranviaria ed è stato utilizzato per simulare molteplici scenari operativi, analizzando consumo energetico, potenziale di recupero e prestazioni del sistema.

Nel complesso, il pilota ha dimostrato che l'integrazione tra dati di monitoraggio e strumenti di simulazione migliora il processo decisionale e sostiene una gestione più efficiente delle infrastrutture e dell'energia.

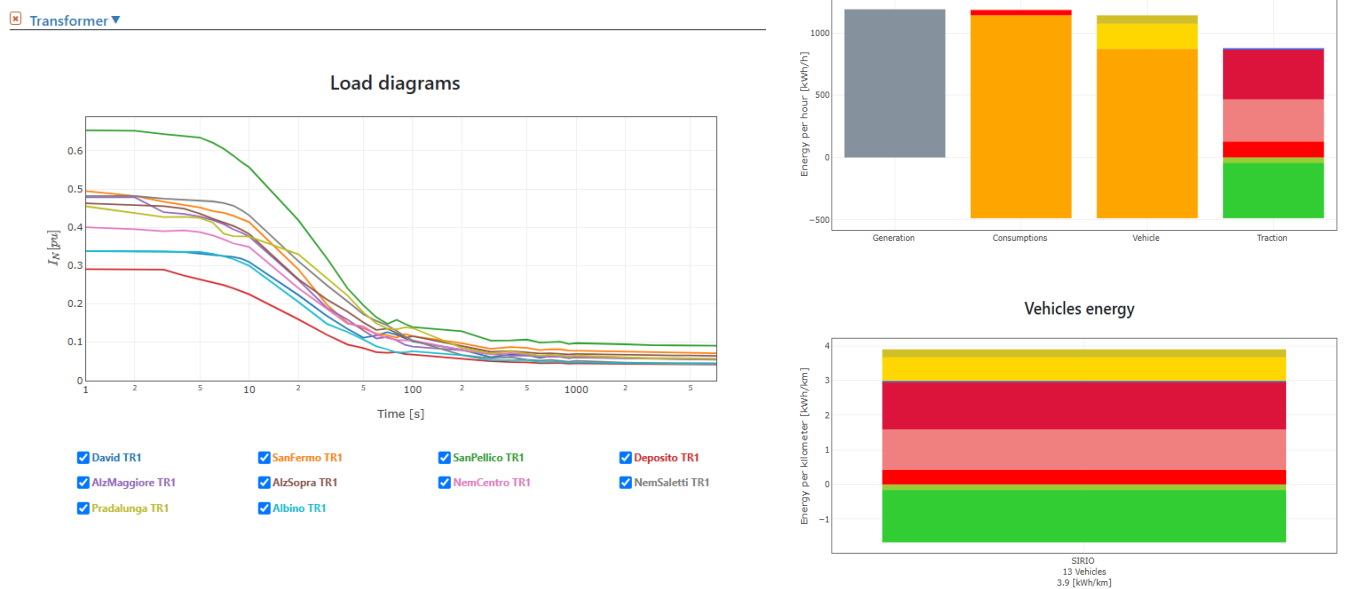


Figura 16: Risultati della simulazione dei flussi energetici utilizzati per analizzare i carichi dei trasformatori e ottimizzare il consumo energetico nel sistema tranviario di Bergamo.

## Sfide incontrate

Le sfide hanno incluso l'integrazione dei sistemi sensoristici nei veicoli esistenti e la garanzia di una trasmissione affidabile dei dati in ambienti urbani. Sono stati necessari adeguamenti di calibrazione e configurazione per migliorare l'accuratezza dei sensori e la stabilità della comunicazione.

Un'ulteriore complessità è derivata dall'integrazione dei dati di monitoraggio del mondo reale con i modelli di simulazione, rendendo necessarie validazioni continue e un coordinamento costante tra i partner di progetto.

### 3.2.3. Soluzione S.3: Moduli per la manutenzione predittiva delle infrastrutture e del materiale rotabile

#### Breve descrizione della soluzione

Questa soluzione fornisce un quadro modulare per la manutenzione predittiva delle infrastrutture del trasporto pubblico e del materiale rotabile basato sul monitoraggio continuo delle condizioni tramite veicolo. Si fonda sulle implementazioni pilota di Lipsia e Bergamo, combinando monitoraggio delle infrastrutture, analisi dei dati energetici e simulazione

#### Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un forte potenziale di trasferibilità, in particolare per i sistemi tranviari di piccole e medie dimensioni. Il suo assetto modulare di monitoraggio e la separazione tra raccolta dati, analisi e simulazione consentono un adattamento flessibile a reti differenti.

Tra le principali lezioni apprese figurano l'importanza del pre-test dei sistemi modulari, della combinazione tra monitoraggio e simulazione e della stretta cooperazione tra operatori e fornitori di tecnologia. L'approccio sostiene i principi dell'economia circolare estendendo la vita utile degli asset e migliorando l'efficienza delle risorse a livello di sistema.

in un approccio trasferibile.

La soluzione sostiene la transizione da una manutenzione reattiva e a scadenza verso una gestione degli asset basata sui dati, consentendo un'individuazione più precoce dei difetti, interventi più mirati e una migliore affidabilità operativa.

## Obiettivi della soluzione

La soluzione mira a consentire il monitoraggio continuo delle condizioni di infrastrutture e veicoli, rilevare difetti nelle fasi iniziali e sostenere interventi di manutenzione tempestivi.

Migliorando la disponibilità dei dati e il processo decisionale, contribuisce a estendere la vita utile degli asset, ridurre le riparazioni ad alta intensità di materiale e aumentare l'efficienza complessiva delle risorse.

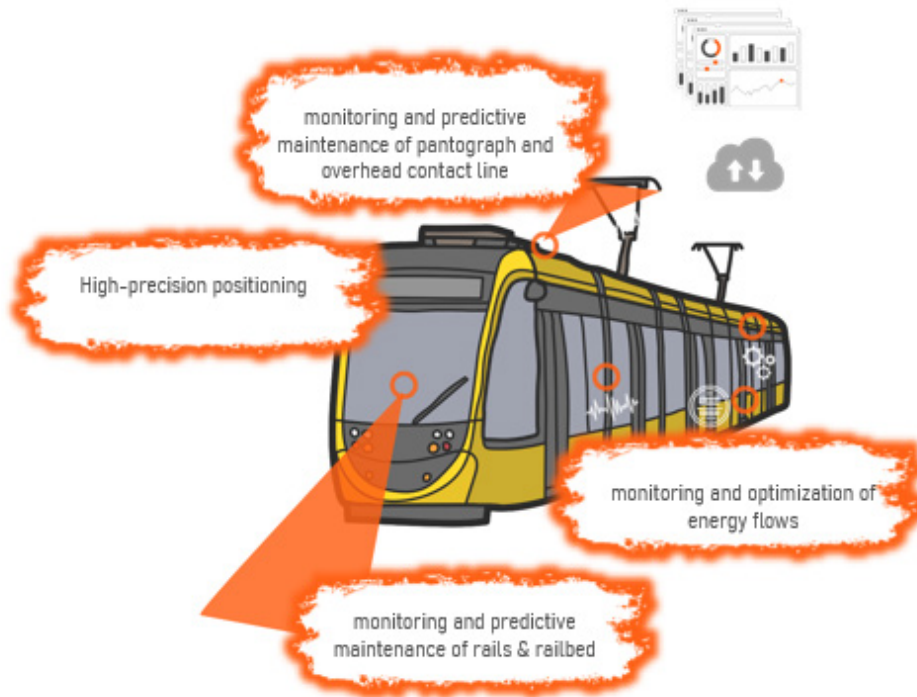


Figura 17: Ambito di applicazione della manutenzione predittiva nei sistemi di trasporto pubblico.

## Concetto di base della soluzione

La soluzione si basa su una catena modulare di monitoraggio che integra raccolta dati, elaborazione e supporto alle decisioni nei flussi di lavoro di manutenzione esistenti. Sensori e sistemi di monitoraggio installati sui veicoli raccolgono dati durante il normale esercizio, che vengono elaborati e analizzati per rilevare anomalie e individuare pattern

di degrado.

I risultati vengono integrati nei sistemi di gestione degli asset mediante georeferenziazione e visualizzati tramite dashboard, sostenendo la prioritizzazione delle azioni di manutenzione. Il sistema opera come un ciclo continuo che collega rilevazione, validazione e intervento, consentendo una manutenzione predittiva basata sulle condizioni.

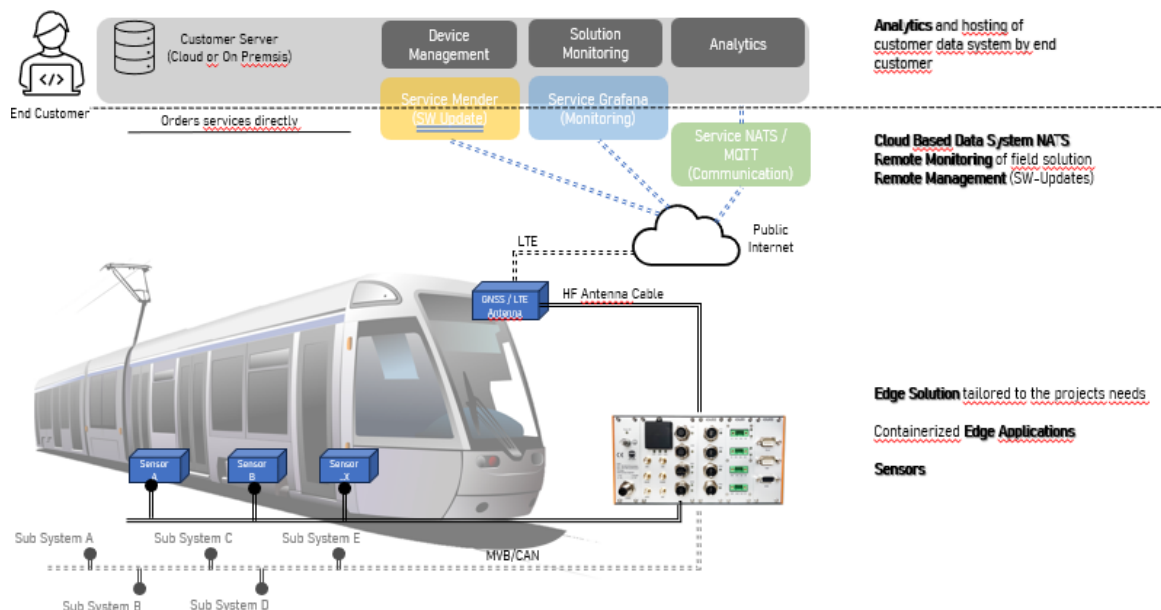


Figura 18: Architettura end-to-end del sistema di manutenzione predittiva, dall'acquisizione dei dati all'analisi e al monitoraggio.

### Indicazioni sull'implementazione

L'implementazione ha evidenziato che qualità dei dati, pipeline dati stabili e integrazione del sistema sono elementi critici per ottenere risultati utilizzabili. I rilevamenti automatizzati richiedono validazione tramite ispezioni sul campo, mentre l'architettura modulare consente un dispiegamento flessibile in sistemi diversi.

Anche la preparazione organizzativa è essenziale, poiché la manutenzione predittiva introduce nuovi flussi di lavoro e nuovi ruoli, e il suo valore aumenta quando è integrata nei processi esistenti di gestione degli asset e pianificazione.

### Potenziale di trasferibilità

La soluzione dimostra un forte potenziale di trasferibilità per gli operatori che gestiscono infrastrutture ferroviarie e materiale rotabile. Il suo approccio modulare consente l'implementazione graduale e l'adattamento a reti, tipi di veicolo e contesti organizzativi differenti.

Consentendo interventi precoci e una gestione degli asset orientata al ciclo di vita, la soluzione sostiene i principi dell'economia circolare, in particolare attraverso l'estensione della vita utile degli asset e il miglioramento dell'efficienza delle risorse.

La soluzione contribuisce principalmente alla fase **EXTEND - manutenzione e riparazione**, consentendo interventi precoci ed estendendo la vita utile degli asset.

### 3.2.4. Pilota P.4: Simulazione di corridoi di trasporto pubblico elettrificati e dei flussi energetici (Gdynia, Polonia)

#### Breve descrizione del pilota

Questo pilota si concentra sull'uso di strumenti di modellazione e simulazione digitale per sostenere una pianificazione dell'elettrificazione circolare ed efficiente sotto il profilo delle risorse nei sistemi di trasporto pubblico. Realizzato a Gdynia dall'operatore del trasporto pubblico PKA Gdynia in cooperazione con l'Università di Danzica (UG) e il partner tecnologico Kruch Railway Innovations, mira a consentire decisioni basate sui dati per investimenti infrastrutturali, tecnologie dei veicoli e strategie operative.

È stato sviluppato un gemello digitale del Corridoio Occidentale utilizzando lo strumento Energy Flow Simulation (EFS). Il modello integra dati operativi quali caratteristiche della flotta, frequenze di servizio e consumo energetico, consentendo la simulazione di diversi scenari di elettrificazione, inclusi autobus elettrici a batteria, filobus con In-Motion Charging (IMC) e configurazioni ibride.



Figura 19: Disposizione spaziale del Corridoio Occidentale a Gdynia.

## Risorse necessarie

Il pilota ha richiesto strumenti di modellazione, dati operativi e una stretta cooperazione tra operatori del trasporto, ricercatori e fornitori di tecnologia. Le risorse chiave includevano l'ambiente di simulazione EFS e dati di input dettagliati quali orari dei veicoli, parametri di consumo energetico e condizioni di

traffico.

Il coordinamento istituzionale è stato essenziale per garantire ipotesi di modellazione realistiche e la validazione dei risultati, incluso il coinvolgimento dell'operatore, delle autorità comunali e degli stakeholder infrastrutturali.

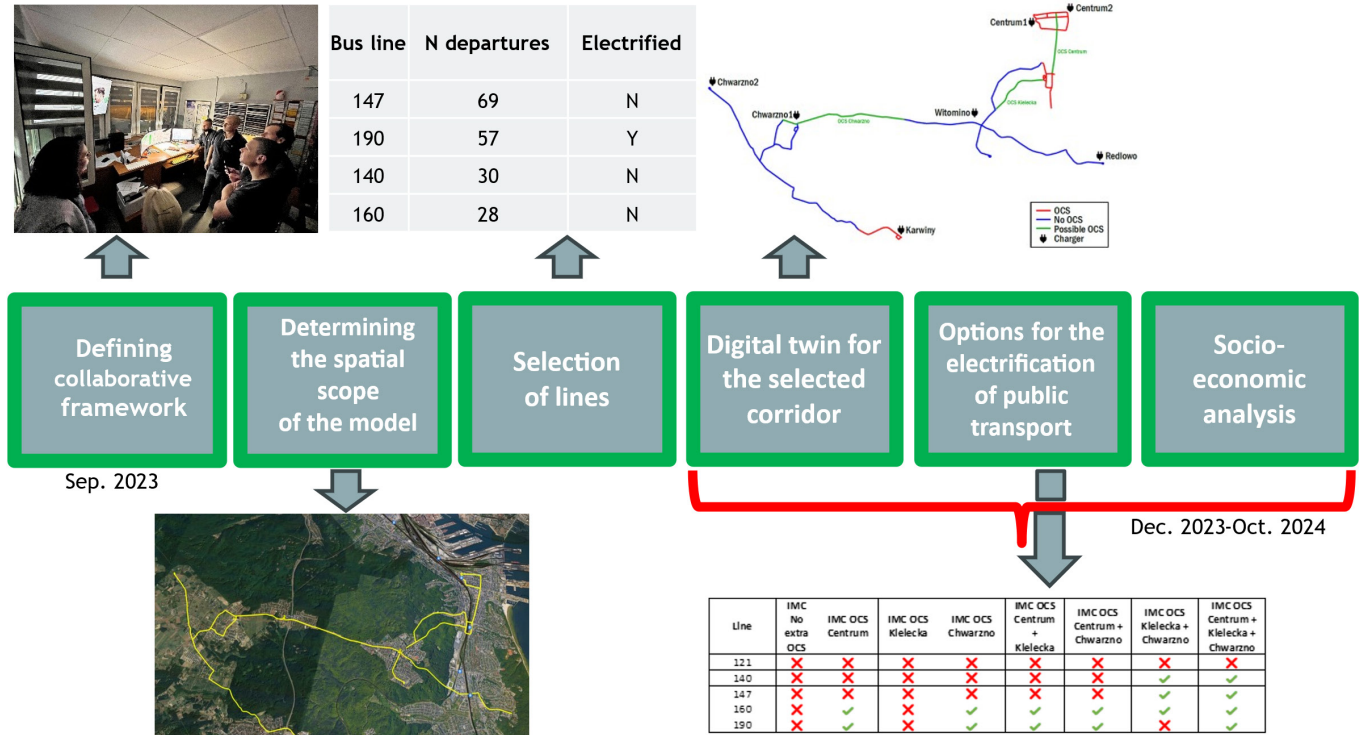


Figura 20: Processo di sviluppo del modello Energy Flow Simulation (EFS) per il gemello digitale di Gdynia.

## Evidenze di successo

Il pilota ha dimostrato che la simulazione digitale può sostenere efficacemente la pianificazione dell'elettificazione e l'ottimizzazione delle infrastrutture. Un gemello digitale del corridoio è stato sviluppato con successo e validato utilizzando dati operativi reali della linea autobus 190.

Sono stati simulati oltre 110 scenari di elettificazione, confrontando autobus elettrici a batteria, filobus IMC e approcci ibridi. L'analisi

ha mostrato che l'esercizio IMC richiede estensioni infrastrutturali mirate, mentre alcune linee, come la linea 190, possono operare senza ulteriore infrastruttura aerea.

I risultati hanno inoltre evidenziato che l'esercizio con autobus elettrici a batteria può richiedere un numero maggiore di veicoli rispetto alle soluzioni IMC e hanno confermato che le condizioni di traffico influenzano in modo significativo il consumo energetico, il fabbisogno di veicoli e i costi di sistema.

Line	E-bus base	E-bus extra	IMC No extra OCS	IMC OCS Centrum	IMC OCS Kielecka	IMC OCS Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka	IMC OCS Centrum + Chwarzno	IMC OCS Kielecka + Chwarzno	IMC OCS Centrum + Kielecka + Chwarzno
121	✓		X			✓		✓	✓	✓
140	X	✓+2	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
147	X	✓+3	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	X	✓+2	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
190 Loop	X	✓+3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Total vehicles	26	36	26	26	26	26	26	26	26	26
Total chargers	7	7								
Extra Substations				1	1	2	2	3	3	4
Extra OCS km				1,51	1,54	3,12	3,05	4,63	4,66	6,17

Figura 21: Esempio di risultati di simulazione che confrontano diversi scenari di elettificazione, mostrando il bilancio energetico del veicolo e la fattibilità dello stato di carica dopo 10 ore di esercizio.

Line	Vehicles	IMC without OCS		IMC with extra OCS in Centrum		IMC with extra OCS in Chwarzno		IMC with extra OCS in Kielecka		IMC with extra OCS in Centrum and Chwarzno		IMC with extra OCS in Centrum and Kielecka		IMC with extra OCS in Chwarzno and Kielecka	
		SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]	SOC [%]	Battery [h]
121	3	20	1,4	20	1,4	49	>10	20	1,4	48,9	>10	20	1,4	49,1	>10
140	7	20	1	20	1	59,4	>10	20	2,7	59,8	>10	24,2	>10	64,2	>10
147	7	20	4	31,6	>10	66,4	>10	40,9	>10	68,8	>10	41,5	>10	71,1	>10
160	3	20	2	41	>10	67	>10	52	>10	68,8	>10	51,9	>10	78,8	>10
190Loop	6	54	>10	60,1	>10	54,7	>10	55,1	>10	60,3	>10	60,3	>10	56,1	>10

Figura 22: Confronto tra scenari di elettrificazione che mostra la fattibilità operativa di diverse tecnologie di veicolo e configurazioni infrastrutturali.

### Sfide incontrate

Le sfide hanno riguardato principalmente l'integrazione dei dati e la modellazione. I dati operativi provenienti da fonti diverse (traffico, esercizio ed energia) hanno richiesto armonizzazione, rallentando inizialmente il processo di modellazione.

Ulteriore complessità è emersa nella modellazione del degrado delle batterie e delle prestazioni lungo il ciclo di vita, nonché nella rappresentazione accurata delle condizioni di traffico, che ha richiesto una calibrazione iterativa del modello e l'inclusione di elementi come i semafori.

Queste sfide sono state affrontate mediante affinamento iterativo del modello e validazione con dati reali.

### 3.2.5. Soluzione S.4: Strumento di pianificazione aziendale circolare per flotte e infrastrutture di trasporto pubblico elettrificate

#### Breve descrizione della soluzione

Questa soluzione fornisce uno strumento strutturato di pianificazione che sostiene operatori e autorità del trasporto pubblico nella progettazione e nel confronto di scenari di elettrificazione utilizzando i principi dell'economia circolare. Si basa sul pilota di Gdynia, in cui la modellazione del gemello digitale e le simulazioni dei flussi energetici sono state utilizzate per valutare diverse strategie di elettrificazione. La soluzione traduce tali esperienze in un quadro trasferibile basato su KPI, che collega obiettivi circolari con decisioni pratiche di pianificazione e investimento.

#### Obiettivi della soluzione

La soluzione mira a sostenere una pianificazione dei sistemi di trasporto pubblico elettrificati basata su evidenze e a migliorare la coerenza nella valutazione degli scenari. Traduce gli obiettivi dell'economia circolare in indicatori misurabili, consentendo il confronto tra opzioni di elettrificazione, migliorando la trasparenza delle ipotesi e sostenendo l'integrazione della pianificazione di flotte, infrastrutture ed energia.

#### Concetto di base della soluzione

La soluzione si basa su un flusso di pianificazione guidato da KPI, supportato da un processo strutturato di selezione e configurazione. Consente agli utenti di definire indicatori rilevanti, fissare obiettivi e confrontare diversi scenari di elettrificazione utilizzando un quadro coerente.

### Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un forte potenziale di trasferibilità per le città che pianificano l'elettrificazione dei sistemi di trasporto pubblico. L'approccio basato sul gemello digitale consente di confrontare molteplici scenari prima di impegnarsi in investimenti infrastrutturali, sostenendo un processo decisionale più efficiente e informato.

La sua struttura modulare consente l'adattamento a diversi contesti urbani, purché siano disponibili dati operativi sufficienti. L'approccio sostiene la pianificazione circolare ottimizzando l'uso delle risorse, riducendo gli investimenti non necessari e migliorando l'efficienza a livello di sistema.

L'approccio tratta flotte, infrastrutture e sistemi energetici come un dominio di pianificazione integrato, collegando prestazioni tecniche, uso dell'energia ed esiti di circolarità per sostenere decisioni informate.

In fase operativa, lo strumento supporta un flusso di lavoro strutturato:

**selezione** → **configurazione** → **analisi degli scenari**  
→ **confronto** → **supporto alle decisioni**

La soluzione tratta flotte, infrastrutture e sistemi energetici come un unico dominio di pianificazione, in cui l'energia agisce come dorsale del sistema influenzando prestazioni, costi ed esiti di circolarità.

#### Indicazioni sull'implementazione

L'implementazione ha mostrato che disponibilità e qualità dei dati sono critiche e spesso richiedono la combinazione di più fonti. Definizioni standardizzate dei KPI e una governance chiara, inclusi titolarità e procedure di aggiornamento, sono essenziali per un utilizzo coerente.

Si raccomanda un approccio graduale, iniziando con un set base di KPI e ampliandolo nel tempo, assicurando al contempo l'allineamento con i processi esistenti di pianificazione e reporting.

#### Potenziale di trasferibilità

La soluzione dimostra un forte potenziale di trasferibilità per gli operatori del trasporto pubblico che pianificano

l'elettrificazione delle flotte. Può essere applicata a diversi tipi di sistema e adattata alle condizioni locali, inclusi mix energetico, vincoli infrastrutturali e requisiti operativi.

Sostenendo un confronto coerente tra scenari e una pianificazione orientata al ciclo di vita, la soluzione

contribuisce a un uso più efficiente delle risorse e a decisioni di investimento più informate.

La soluzione contribuisce principalmente alla fase **AVOID - pianificazione ex ante e ottimizzazione del sistema**, consentendo decisioni più informate e coerenti.

### 3.3. Attività A.3: Sviluppo di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico

Questa attività si concentra sull'estensione del ciclo di vita dei componenti infrastrutturali del trasporto pubblico e degli asset energetici attraverso approcci di riuso e riconversione d'uso. Essa affronta i principi dell'economia circolare a livello infrastrutturale esplorando come componenti e materiali esistenti possano rimanere in servizio oltre il loro originario contesto operativo.

Nell'ambito di questa attività sono state realizzate due azioni pilota. A Szeged, il pilota ha esaminato la fattibilità del riutilizzo di scambi filoviari per estendere la vita utile di componenti infrastrutturali critici e ridurre gli sprechi di materiale. A Maribor, il pilota ha

analizzato la riconversione d'uso di batterie di trazione di seconda vita come accumulo energetico stazionario a supporto dell'infrastruttura di ricarica degli autobus elettrici.

Nel loro insieme, questi piloti dimostrano approcci pratici alla preservazione del valore incorporato nelle infrastrutture del trasporto pubblico e negli asset correlati, riducendo al contempo il consumo di risorse e sostenendo pratiche di gestione degli asset più circolari. L'esperienza maturata attraverso questi piloti costituisce la base per lo sviluppo delle soluzioni trasferibili presentate nelle sezioni seguenti.

#### 3.3.1. Pilota P.5: Riutilizzo di scambi filoviari (Szeged, Ungheria)

##### Breve descrizione del pilota

Questo pilota si concentra sull'applicazione pratica dei principi dell'economia circolare attraverso il riutilizzo di componenti infrastrutturali filoviari. Realizzato da Szeged Transport Company (SZKT), dimostra come componenti non più ottimali per un esercizio ad alta intensità possano essere riutilizzati in parti del sistema con minore domanda operativa.

Nell'ambito del pilota, quattro scambi aerei ad alta velocità della rete operativa, originariamente installati tra il 2005 e il 2014, sono stati sostituiti con nuove apparecchiature e successivamente riutilizzati nel deposito. Questo approccio ha esteso la vita utile dei componenti esistenti migliorando al contempo l'affidabilità sia della rete sia dell'infrastruttura di deposito.



Figura 23: Scambio aereo filoviario utilizzato nella rete di Szeged.

## Risorse necessarie

Il pilota ha richiesto risorse tecniche relativamente limitate, poiché il lavoro ha riguardato principalmente la sostituzione e il ricollocamento di componenti infrastrutturali esistenti all'interno del sistema filoviario. L'implementazione si è basata sulle capacità

interne di SZKT, inclusi team di manutenzione delle infrastrutture, esercizio del traffico e unità logistiche. È stato necessario coordinare i lavori di installazione e gli adeguamenti temporanei del servizio, nonché cooperare con le autorità locali durante brevi interventi stradali.



Figura 24: Installazione di uno scambio filoviario da parte del team di manutenzione SZKT.

## Evidenze di successo

Il pilota ha dimostrato con successo che il riutilizzo di componenti infrastrutturali può migliorare l'affidabilità riducendo al contempo il fabbisogno di investimenti. Quattro nuovi scambi sono stati installati nella rete principale, mentre quattro scambi riutilizzati sono stati impiegati nel deposito, migliorando le prestazioni dell'infrastruttura in otto località.

La sostituzione ha ridotto i guasti nelle sezioni ad alta frequenza ed eliminato i problemi degli scambi obsoleti del deposito, evitando al contempo acquisti non necessari di apparecchiature aggiuntive e riducendo gli sprechi di materiale.

Il pilota ha dimostrato con successo che il riutilizzo circolare di componenti infrastrutturali può migliorare l'affidabilità operativa riducendo al tempo stesso il fabbisogno di investimenti. I principali risultati conseguiti durante l'implementazione includono:

## Sfide incontrate

Le sfide hanno riguardato principalmente il coordinamento e l'integrazione all'interno del sistema infrastrutturale esistente. Variazioni negli elementi di supporto, quali pali e fondazioni, hanno richiesto aggiustamenti durante l'installazione. Sono state inoltre necessarie ulteriori attività per organizzare disposizioni temporanee del traffico e garantire un'integrazione sicura dei componenti riutilizzati nel sistema.

## Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un approccio circolare semplice e trasferibile applicabile a molti sistemi di trasporto pubblico. I componenti infrastrutturali rimossi da sezioni di rete ad alta intensità possono spesso essere riutilizzati in ambienti a minore domanda come i depositi.

Individuando sistematicamente tali opportunità, gli operatori possono estendere la vita utile degli asset, ridurre i costi di investimento e minimizzare gli sprechi di materiale, sostenendo una gestione infrastrutturale più efficiente e circolare.

### 3.3.2. Soluzione S.5: Definizione di criteri di adozione per il riutilizzo di scambi filoviari

#### Breve descrizione della soluzione

Questa soluzione fornisce un quadro trasferibile per il riutilizzo circolare di scambi aerei filoviari nei sistemi di trasporto pubblico. Si basa sull'esperienza del pilota di Szeged e traduce l'approccio pratico in un insieme di criteri di adozione applicabili da altri operatori.

La soluzione introduce un modello di riuso a cascata, in cui i componenti infrastrutturali rimossi da sezioni di rete ad alta intensità vengono ridistribuiti in località con minore domanda operativa come i depositi. Questo approccio estende la vita utile degli asset, riduce gli sprechi e migliora l'efficienza dei costi nel rinnovo delle infrastrutture.

#### Obiettivi della soluzione

La soluzione mira a sostenere gli operatori del trasporto pubblico nell'implementazione di pratiche di gestione circolare delle infrastrutture.

Si concentra sull'estensione della vita operativa dei componenti infrastrutturali, sulla riduzione del consumo di materiali, sul miglioramento dell'efficienza degli investimenti e sul mantenimento di affidabilità e sicurezza attraverso approcci strutturati di riuso.

#### Concetto di base della soluzione

La soluzione si basa sull'abbinamento tra componenti infrastrutturali e diversi livelli di intensità operativa all'interno della rete. I componenti rimossi da sezioni di rete ad alta frequenza possono non soddisfare più i rigorosi requisiti di affidabilità, ma continuare comunque a funzionare efficacemente in ambienti a minore domanda come i depositi. Ciò conduce a un

approccio infrastrutturale a due livelli, che distingue tra aree operative ad alta intensità e ambienti di servizio a minore intensità. Allineando la condizione dei componenti ai requisiti operativi, gli operatori possono estendere la vita utile degli asset mantenendo le prestazioni del sistema.

#### Indicazioni sull'implementazione

L'implementazione mostra che il riuso di successo dipende da una corretta valutazione delle condizioni e dalla compatibilità con elementi infrastrutturali esistenti quali pali, cablaggi e fondazioni. Durante l'installazione è richiesto un coordinamento efficace tra manutenzione ed esercizio, mentre l'identificazione e il tracciamento sistematici dei componenti riutilizzabili sono fondamentali per scalare l'approccio.

#### Potenziale di trasferibilità

La soluzione dimostra un forte potenziale di trasferibilità per gli operatori che gestiscono infrastrutture filoviarie o tranviarie. In molti sistemi esistono condizioni simili, in cui l'infrastruttura opera con differenti livelli di intensità tra rete e depositi.

Integrando l'intensità operativa nell'gestione degli asset, gli operatori possono identificare sistematicamente opportunità di riuso, ridurre i costi ed estendere il ciclo di vita delle infrastrutture, sostenendo i principi dell'economia circolare.

La soluzione contribuisce pertanto alla fase **EXTEND - riuso** del quadro dell'economia circolare nella gestione delle infrastrutture del trasporto pubblico.

### 3.3.3. Pilota P.6: Utilizzo di batterie di trazione di seconda vita come accumulo energetico stazionario per la ricarica rapida alimentata da fonti rinnovabili (Maribor, Slovenia)

#### Breve descrizione del pilota

Questo pilota esplora l'uso di batterie agli ioni di litio di seconda vita come accumulo energetico stazionario a supporto dell'infrastruttura di ricarica degli autobus elettrici. Realizzato dal Comune di Maribor con il supporto dell'Università di Maribor, si concentra sul miglioramento dell'efficienza energetica estendendo al contempo il ciclo di vita delle batterie di trazione.

Alla stazione capolinea di Vzpenjača, un caricatore rapido da 150 kW supporta la linea di autobus elettrici G6, che opera su un percorso di 7,7 km con frequenti eventi di ricarica brevi. Per ottimizzare l'uso dell'energia, un sistema di accumulo a batteria (BESS) basato su batterie riutilizzate per una seconda vita è stato integrato nell'infrastruttura di ricarica, fungendo da buffer tra rete, fonti rinnovabili e domanda di ricarica.

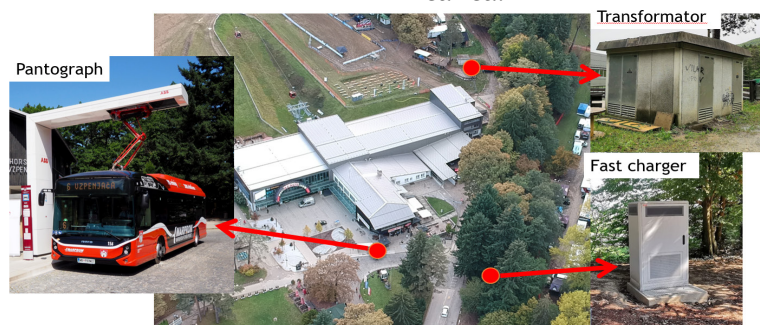


Figura 25: Infrastruttura di ricarica attuale presso la stazione di Vzpenjača.

## Risorse necessarie

Il pilota ha richiesto l'integrazione di un sistema di accumulo con batterie di seconda vita con capacità di 136 kWh, combinato con un inverter ibrido da 80 kW e integrato con un caricatore rapido DC esistente da 150 kW. Il sistema includeva inoltre componenti di monitoraggio e controllo, nonché un piccolo impianto fotovoltaico. Il BESS è collegato in

configurazione ibrida parallela, consentendo l'alimentazione simultanea dalla rete e dal sistema di accumulo durante gli eventi di ricarica degli autobus.

L'implementazione ha richiesto il coordinamento tra autorità comunali, partner di ricerca e fornitori tecnici, nonché il rispetto dei requisiti di sicurezza e normativi per i sistemi a batteria.

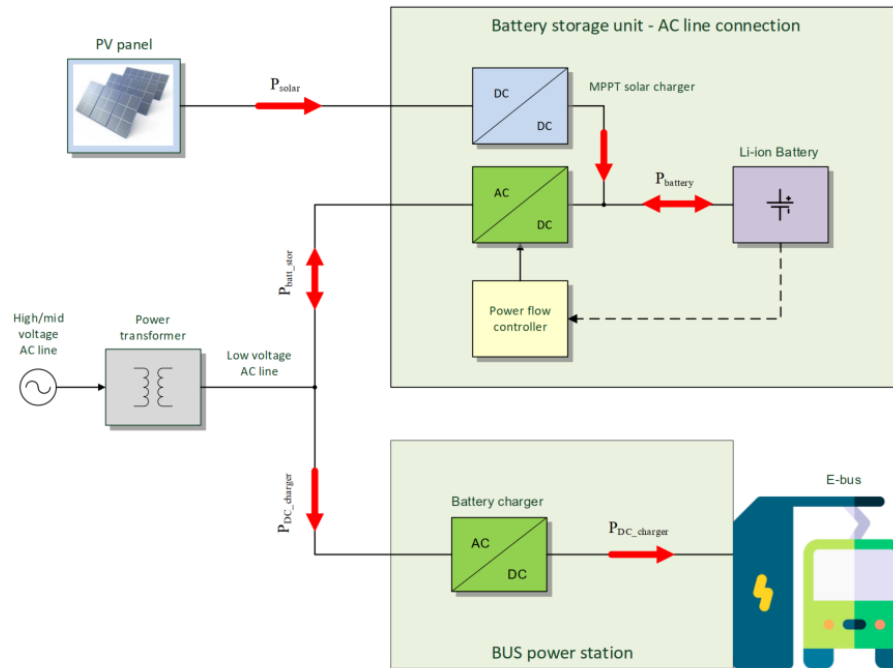


Figura 26: Schema tecnico della configurazione parallela dell'integrazione del BESS. Fonte: Università di Maribor.

## Evidenze di successo

Il pilota ha confermato la fattibilità tecnica dell'integrazione di batterie di seconda vita nell'infrastruttura di ricarica. Il sistema supporta una domanda annua di ricarica di circa 145.000 kWh, con un consumo giornaliero intorno a 400 kWh e picchi fino a 650 kWh, mentre le singole sessioni di ricarica durano circa 5 minuti con un trasferimento di 8-14 kWh.

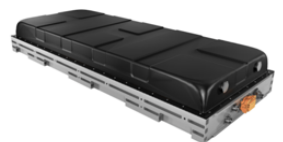
Il BESS ha consentito una riduzione del carico di picco di circa 25 kW e ha dimostrato il funzionamento ibrido tra rete e accumulo. L'integrazione della generazione fotovoltaica ha ulteriormente sostenuto la flessibilità energetica e ridotto la dipendenza dalla rete.

Nel complesso, il pilota ha mostrato che l'accumulo con batterie di seconda vita può migliorare la gestione dell'energia ed estendere il ciclo di vita delle batterie nei sistemi di trasporto pubblico.



- Solar Panel (10 pcs. Array)**  
350W Monocrystalline
- Vmp: 36,11V
  - Imp: 9,69A
  - Voc: 44,05V
  - Isc: 10,37A
  - Cell Size: 156mm
  - Cells Quantity: 72 PCS
  - Cells Array: 6'12 PCS
  - Panel Size: 1950\*992\*40mm
  - Weight: 19,5 KG

- Energy Storage Battery Pack**
- FPT - Model eBS 69
  - Application: Bus
  - Nominal capacity: 107 Ah
  - Nominal energy: 69,3 kWh
  - Nominal voltage: 647,5 V
  - Voltage range: 525 - 735 V
  - C-rate: 1 C
  - Weight: 389 kg
  - Cathode technology: NMC
  - Cell configuration: 175S-2P
  - Cooling system: Glycol/Water



- Three Phase Hybrid Inverter DEYE SUN-80K**
- Max. charging/discharging current of 160A
  - Support storing energy from diesel generator
  - Max. 10 pcs parallel for on-grid and off-grid operation
  - Support multiple batteries parallel
  - AC couple to retrofit existing solar system
  - 6 time periods for battery charging/discharging
  - High voltage battery, higher efficiency
  - 100% unbalanced output

Figura 27: Componenti chiave del sistema BESS: pannelli FV, inverter e pacco batterie di seconda vita.

## Sfide incontrate

Le sfide hanno incluso la limitata standardizzazione dell'integrazione delle batterie di seconda vita, la compatibilità tra moduli batteria e sistemi inverter e la garanzia di stabilità termica e sicurezza antincendio.

Ulteriori problematiche relative all'approvvigionamento di batterie idonee, ai requisiti normativi e alla limitata esperienza di mercato sono state affrontate mediante un'attenta progettazione del sistema e la cooperazione con esperti specializzati.

## Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un forte potenziale di trasferibilità per le città che stanno ampliando le infrastrutture per autobus elettrici. L'accumulo con batterie di seconda vita può supportare la gestione dei carichi di picco, migliorare la flessibilità energetica e consentire una migliore integrazione delle fonti di energia rinnovabile.

La natura modulare delle soluzioni BESS consente l'adattamento a contesti diversi, sostenendo i principi dell'economia circolare attraverso l'estensione del ciclo di vita delle batterie e il miglioramento dell'efficienza delle risorse.

### 3.3.4. Soluzione S.6: Modelli di business trasferibili per l'utilizzo di batterie di trazione di seconda vita

#### Breve descrizione della soluzione

Questa soluzione fornisce un quadro trasferibile per l'utilizzo di batterie di trazione di seconda vita come accumulo energetico stazionario nell'infrastruttura di ricarica del trasporto pubblico. Si basa sul pilota di Maribor e traduce la sua esperienza tecnica e operativa in modelli di business e condizioni di implementazione applicabili in altri contesti.

La soluzione sostiene i principi dell'economia circolare estendendo il ciclo di vita delle batterie prima del riciclo, migliorando al contempo la gestione dell'energia, riducendo la domanda elettrica di picco e sostenendo l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile.

#### Obiettivi della soluzione

La soluzione mira a supportare operatori e autorità del trasporto pubblico a implementare sistemi di accumulo con batterie di seconda vita come parte dell'infrastruttura di trasporto elettrificata.

Si concentra sull'estensione del ciclo di vita delle batterie, sul miglioramento della flessibilità di ricarica,

sulla riduzione della domanda di picco, sul sostegno all'integrazione delle energie rinnovabili e sulla creazione di approcci economicamente sostenibili per le applicazioni delle batterie di seconda vita.

#### Concetto di base della soluzione

La soluzione si basa sull'integrazione di sistemi di accumulo energetico con batterie di seconda vita tra la rete elettrica, le fonti di energia rinnovabile e la domanda di ricarica. In questo ruolo, il sistema batteria agisce come buffer energetico flessibile che supporta peak shaving, load shifting e utilizzo dell'energia rinnovabile.

La sua applicazione pratica dipende dall'allineamento di tre dimensioni: integrazione tecnica, strategia di gestione energetica e condizioni economiche e normative. Piuttosto che offrire un unico modello fisso, la soluzione fornisce un quadro flessibile adattabile a infrastrutture locali, profili di carico e condizioni di mercato. Sebbene il solo peak shaving offra benefici limitati, la combinazione tra accumulo, ottimizzazione tariffaria e integrazione delle energie rinnovabili migliora in modo significativo le prestazioni complessive.

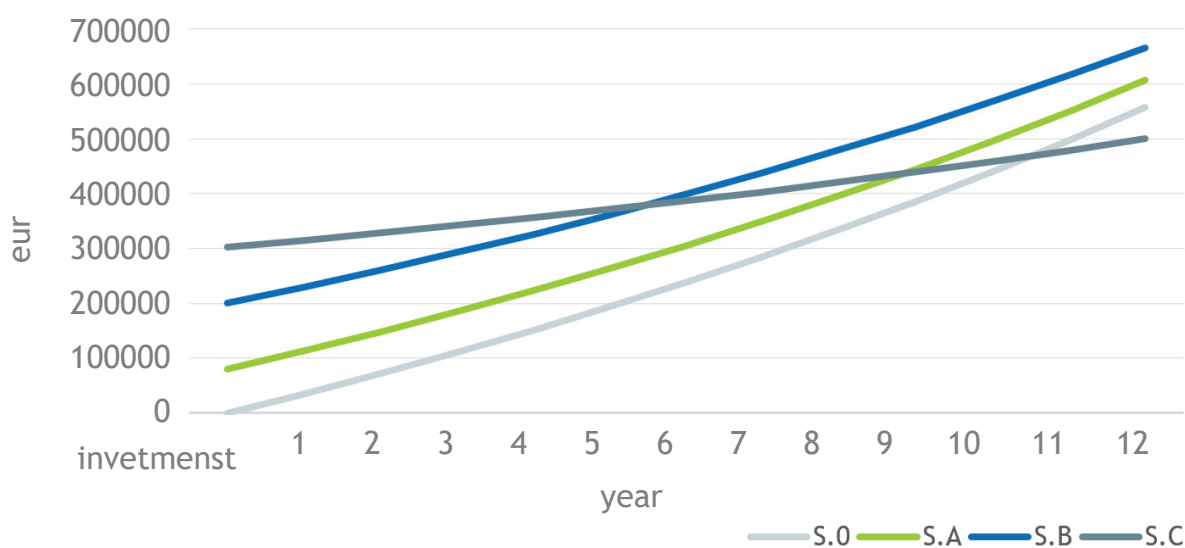


Figura 28: Confronto dei costi cumulativi dell'elettricità in diversi scenari di gestione energetica.

- S.0: Scenario di base (senza accumulo): piena dipendenza dall'elettricità di rete
- S.1: Peak shaving: riduzione dei picchi di potenza di breve durata con ritorno economico limitato
- S.2: Ottimizzazione tariffaria: spostamento dei consumi energetici verso periodi a costo inferiore, migliorando l'efficienza dei costi
- S.3: Integrazione delle rinnovabili: combinazione di accumulo e FER per ridurre la dipendenza dalla rete e massimizzare il valore a lungo termine

### Indicazioni sull'implementazione

L'implementazione ha mostrato che la compatibilità tra moduli batteria, sistemi inverter e infrastruttura di ricarica è una condizione chiave di successo, mentre i requisiti di sicurezza e l'architettura del sistema devono essere considerati fin dall'inizio.

Il caso economico dipende fortemente dalla dimensione del sistema, dal profilo di carico, dalle tariffe elettriche e dai vincoli di rete. Il solo peak

shaving offre ritorni limitati su piccola scala, mentre la combinazione tra accumulo e integrazione delle energie rinnovabili migliora in modo significativo il valore nel lungo periodo.

### Potenziale di trasferibilità

La soluzione dimostra un forte potenziale di trasferibilità per i sistemi di trasporto pubblico in fase di elettrificazione. Molte città affrontano sfide simili legate alla domanda di ricarica, ai vincoli di rete e alla futura gestione delle batterie.

L'accumulo con batterie di seconda vita offre un modo pratico per affrontare simultaneamente questi aspetti e può essere applicato presso stazioni di ricarica rapida in linea, depositi o hub di mobilità. In questo modo, la soluzione sostiene sia gli obiettivi di economia circolare sia una gestione dell'energia più flessibile nei sistemi di trasporto pubblico.

La soluzione contribuisce principalmente alla fase **EXTEND - riconversione d'uso** della gerarchia dell'economia circolare, consentendo l'uso a cascata delle batterie di trazione prima del loro riciclo finale.

## 3.4. Attività A.4: Promozione dell'adozione di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile

Questa attività si concentra sull'estensione della vita utile dei componenti del materiale rotabile attraverso ricondizionamento, rigenerazione e una migliore condivisione delle informazioni nel settore del trasporto pubblico.

Il pilota realizzato a Szeged dimostra la riprogettazione e la rigenerazione di un'obsoleta unità di controllo delle porte del tram, consentendo la prosecuzione dell'esercizio dei tram Tatra più datati. Sostituendo un componente elettronico critico

non più disponibile sul mercato, il pilota illustra come una riprogettazione mirata dei componenti possa preservare il valore operativo del materiale rotabile esistente.

L'esperienza maturata attraverso il pilota è collegata allo sviluppo di una piattaforma digitale dell'usato e di matching, che sostiene lo scambio di informazioni e la collaborazione tra gli attori del trasporto pubblico per facilitare il riuso e la rigenerazione dei componenti dei veicoli.

### 3.4.1. Pilota P.7: Rigenerazione e riprogettazione delle unità di controllo del tram per consentire il riuso dei componenti (Szeged, Ungheria)

#### Breve descrizione del pilota

Questo pilota si concentra sull'estensione della vita operativa dei tram attraverso la riprogettazione e la rigenerazione di un componente elettronico critico. Realizzato da Szeged Transport Company (SZKT), affronta il problema dell'obsolescenza delle unità di controllo delle porte utilizzate nelle flotte tranviarie Tatra T6A2 e KT4D-ME, non più disponibili sul mercato dei ricambi.

Per mitigare questo rischio, è stata sviluppata una nuova unità di controllo parametrizzabile e diagnosticabile utilizzando componenti moderni. L'unità è stata progettata per essere compatibile con entrambi i tipi di tram e per integrarsi con i sistemi porta esistenti, consentendo il proseguimento dell'esercizio dei veicoli più datati senza necessità di sostituzione prematura.



Figura 29: Veicoli tranviari Tatra (tipi KT4D e T6A2) in esercizio a Szeged.

### Risorse necessarie

L'implementazione ha richiesto analisi tecniche dei sistemi esistenti, sviluppo di nuovo hardware e software diagnostico e creazione di un ambiente di prova controllato.

Ulteriori attività hanno incluso la certificazione da parte di un organismo accreditato, l'approvazione normativa per l'esercizio e la produzione di un lotto iniziale di unità sostitutive, sostenute da una stretta cooperazione tra team interni e partner esterni.



Figura 30: Ambiente di prova controllato utilizzato per il collaudo funzionale della nuova unità di controllo delle porte.

### Evidenze di successo

Il pilota ha sviluppato e messo in servizio con successo un'unità di controllo sostitutiva compatibile con due tipi di tram. Un totale di 99 unità originali è stato identificato come componente critico su 28 veicoli, e un primo lotto di 40 nuove unità è stato prodotto e installato.

La soluzione ha eliminato l'obsolescenza dei ricambi per un componente chiave, ha garantito la continuità operativa della flotta e ha introdotto funzionalità diagnostiche a supporto di una migliore manutenzione e del rilevamento dei guasti.



Figura 31: Nuova unità di controllo delle porte installata in un veicolo tranviario.

### Sfide incontrate

La sfida principale è stata il processo di approvazione per un componente elettronico safety-critical di nuova progettazione, poiché le procedure normative non erano chiaramente definite e hanno richiesto un ampio coordinamento con gli organismi di certificazione. Ulteriore complessità ha riguardato la garanzia di compatibilità con diversi sistemi tranviari e la definizione di specifiche tecniche adeguate all'esercizio di lungo periodo.

### Potenziale di apprendimento e trasferimento

Il pilota dimostra un approccio trasferibile per affrontare l'obsolescenza dei ricambi nel materiale rotabile invecchiato. Molte città gestiscono flotte tranviarie simili e affrontano sfide comparabili.

La metodologia – individuazione dei componenti critici, riprogettazione delle sostituzioni e ottenimento della certificazione – può essere replicata da altri operatori, sostenendo strategie di manutenzione circolare ed estendendo la vita utile dei veicoli.

L'approccio contribuisce principalmente alla dimensione **EXTEND** del quadro AETE, in particolare attraverso il ricondizionamento e la rigenerazione dei componenti del materiale rotabile.

## 4. Lezioni apprese

Dai piloti CE4CE sono emersi diversi temi chiave, che riflettono il modo in cui le soluzioni circolari si comportano nella pratica in differenti condizioni operative.

### **Dati e integrazione di sistema**

I piloti di manutenzione predittiva hanno dimostrato che l'efficacia delle soluzioni digitali dipende fortemente dalla qualità dei dati e dall'integrazione del sistema. A Lipsia, il monitoraggio continuo basato sui veicoli ha consentito l'individuazione precoce dei difetti infrastrutturali, ma ha anche evidenziato la necessità di pipeline di dati stabili e di validazione tramite ispezioni sul campo. Analogamente, gli approcci basati sulla simulazione hanno mostrato che l'armonizzazione dei dati provenienti da fonti diverse è un prerequisito per una modellazione affidabile e per il supporto alle decisioni.

### **Estendere la vita utile degli asset attraverso riuso e rigenerazione**

I piloti incentrati sul riuso di infrastrutture e componenti hanno evidenziato il potenziale di estendere la vita utile degli asset. A Szeged, il riutilizzo di scambi filoviari ha mostrato che i componenti rimossi da sezioni di rete ad alta intensità possono essere efficacemente ridistribuiti in ambienti a minore domanda. Un principio analogo è stato applicato nella rigenerazione delle unità di controllo del tram, dove la riprogettazione ha consentito la prosecuzione dell'esercizio dei veicoli più datati nonostante l'obsolescenza dei ricambi.

### **Integrazione di sistema e creazione di valore nelle applicazioni energetiche**

I piloti relativi all'energia hanno dimostrato che il valore delle soluzioni circolari aumenta con l'integrazione di sistema. A Maribor, l'accumulo con batterie di seconda vita ha mostrato benefici limitati se utilizzato solo per il peak shaving, ma un valore significativamente maggiore quando combinato con l'integrazione delle energie rinnovabili e una gestione energetica flessibile. Ciò evidenzia l'importanza di considerare le soluzioni circolari come parte di un'ottimizzazione di sistema più ampia, anziché come interventi autonomi.

### **Preparazione organizzativa e processi di implementazione**

In tutti i piloti, l'implementazione di successo è dipesa dal coordinamento tra più stakeholder e dall'integrazione nelle strutture operative esistenti. Approcci di implementazione per fasi, iniziando con il test pilota e proseguendo con una scalabilità graduale, si sono dimostrati efficaci per gestire la complessità tecnica e organizzativa.

**Queste indicazioni sono riassunte nella tabella seguente.**

Area	Lezioni chiave
<b>Aspetti tecnici e dati</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le soluzioni di successo dipendono dalla compatibilità con infrastrutture e sistemi esistenti, in particolare in ambienti preesistenti.</li> <li>• Un'implementazione affidabile richiede dati di alta qualità e armonizzati, supportati da pipeline dati stabili.</li> <li>• La progettazione modulare del sistema consente un'implementazione scalabile e un'integrazione flessibile.</li> </ul>
<b>Aspetti operativi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'implementazione richiede coordinamento tra le diverse funzioni organizzative e integrazione nei flussi di lavoro esistenti.</li> <li>• Il coinvolgimento precoce degli stakeholder riduce significativamente i rischi e facilita l'implementazione.</li> <li>• Approcci per fasi consentono test, validazione e scalabilità graduale.</li> </ul>
<b>Aspetti economici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le soluzioni circolari richiedono in genere un investimento iniziale, ma generano valore su orizzonti temporali più lunghi.</li> <li>• Le prestazioni economiche dipendono dalla scala del sistema, dal livello di integrazione e dal contesto operativo.</li> <li>• Una quota significativa del valore è creata da benefici indiretti, quali affidabilità ed efficienza.</li> </ul>
<b>Indicazioni sull'economia circolare</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il maggiore potenziale risiede nell'estensione della vita utile degli asset, nel riuso dei componenti e nella riconversione d'uso degli asset energetici.</li> <li>• Le strategie circolari seguono spesso una logica a cascata in diversi contesti d'uso.</li> <li>• Una prospettiva di ciclo di vita è essenziale per cogliere appieno il valore.</li> </ul>
<b>Trasferibilità</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le soluzioni basate su approcci modulari e adattabili mostrano il più alto potenziale di trasferibilità.</li> <li>• La trasferibilità dipende dalle condizioni organizzative, tecniche e normative locali.</li> <li>• La condivisione delle conoscenze e una documentazione chiara sostengono la replicazione.</li> </ul>

Tabella 7: Panoramica delle lezioni apprese trasversali.

## 5. Checklist di implementazione e aspetti chiave

Sulla base delle lezioni apprese presentate nel Capitolo 4, questo capitolo fornisce indicazioni pratiche per l'implementazione delle soluzioni CE4CE in diversi contesti locali. Traduce le evidenze individuate in passaggi operativi, fattori chiave di successo e considerazioni sui rischi, per sostenere gli stakeholder nell'adozione di approcci di economia circolare nei sistemi di trasporto pubblico.

Le indicazioni sono rivolte a operatori del trasporto pubblico, autorità e altri stakeholder che intendono adattare e implementare le soluzioni CE4CE, tenendo conto delle condizioni tecniche, organizzative ed economiche locali.

### 5.1. Aspetti chiave per un'implementazione di successo

L'implementazione delle soluzioni CE4CE richiede di affrontare un insieme di aspetti chiave che ne determinano fattibilità, efficacia e scalabilità. Tali aspetti riflettono i requisiti pratici individuati attraverso le azioni pilota e i processi di sviluppo delle soluzioni.

Un'implementazione di successo dipende dalla garanzia di compatibilità con infrastrutture e sistemi esistenti, in particolare negli ambienti preesistenti, nonché dalla disponibilità di dati affidabili e ben strutturati. Allo stesso tempo, la preparazione organizzativa svolge un ruolo chiave, includendo coordinamento tra dipartimenti, coinvolgimento degli stakeholder e capacità di integrare nuovi approcci nei flussi di lavoro esistenti.

involvement and the ability to integrate new approaches into existing workflows.

La sostenibilità economica deve essere considerata da una prospettiva di ciclo di vita, tenendo conto sia dei benefici diretti sia di quelli indiretti, mentre requisiti normativi e procedure di approvazione possono influenzare le tempistiche di implementazione e la progettazione delle soluzioni. Inoltre, le soluzioni dovrebbero essere progettate tenendo conto di scalabilità e trasferibilità, così da consentirne l'adattamento a diversi contesti operativi e istituzionali.

### 5.2. Checklist di implementazione

La Tabella 9 fornisce un approccio strutturato passo dopo passo per sostenere l'implementazione di soluzioni di economia circolare nei sistemi di trasporto pubblico, dalla valutazione iniziale fino alla scalabilità e all'integrazione nelle operazioni standard.

Fase	Focus
<b>Fase 1: Valutazione iniziale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Individuare opportunità di economia circolare nelle infrastrutture, nei veicoli e nei sistemi energetici</li> <li>• Analizzare le pratiche attuali di gestione del ciclo di vita degli asset</li> <li>• Definire le aree prioritarie di intervento</li> </ul>
<b>Fase 2: Analisi di fattibilità</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valutare la fattibilità tecnica delle soluzioni selezionate</li> <li>• Valutare la disponibilità dei dati e i requisiti di sistema</li> <li>• Analizzare la sostenibilità economica e i benefici potenziali</li> <li>• Individuare i vincoli normativi</li> </ul>
<b>Fase 3: Progettazione della soluzione</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definire il concetto tecnico e l'architettura del sistema</li> <li>• Selezionare tecnologie e partner appropriati</li> <li>• Sviluppare un piano e una tempistica di implementazione</li> <li>• Definire gli indicatori di prestazione</li> </ul>
<b>Fase 4: Implementazione</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementare la soluzione in un ambiente pilota controllato</li> <li>• Monitorare le prestazioni e raccogliere dati</li> <li>• Coinvolgere il personale operativo e gli stakeholder</li> <li>• Adattare il sistema sulla base del feedback</li> </ul>
<b>Fase 5: Valutazione e ottimizzazione</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizzare i risultati del pilota e i dati di prestazione</li> <li>• Individuare miglioramenti e potenziale di ottimizzazione</li> <li>• Validare i benefici economici e operativi</li> </ul>
<b>Fase 6: Scalabilità e trasferimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sviluppare una strategia di scalabilità all'interno dell'organizzazione</li> <li>• Adattare la soluzione ad altri contesti o località</li> <li>• Condividere conoscenze e lezioni apprese</li> <li>• Integrare la soluzione nelle operazioni standard</li> </ul>

Tabella 9: Checklist di implementazione passo dopo passo.

### 5.3. Rischi comuni e misure di mitigazione

L'implementazione di soluzioni di economia circolare nei sistemi di trasporto pubblico comporta una serie di rischi comuni legati ai dati, alla tecnologia, alla capacità organizzativa e al contesto normativo.

Una delle principali sfide riguarda la disponibilità e la qualità dei dati, poiché dati incompleti o incoerenti possono limitare l'efficacia degli strumenti digitali e dei processi decisionali basati sulle evidenze. Ciò richiede una valutazione precoce della disponibilità dei dati, insieme a procedure di validazione e all'istituzione di processi affidabili di gestione dei dati.

Anche le incompatibilità tecniche con le infrastrutture esistenti e i sistemi legacy possono incidere sull'implementazione. Queste sfide possono essere affrontate adottando una progettazione modulare e flessibile del sistema, che consenta un'integrazione graduale negli ambienti esistenti senza richiedere modifiche estese al sistema.

I requisiti normativi e le procedure di approvazione possono influenzare le tempistiche di implementazione, in particolare per le soluzioni innovative o critiche per la sicurezza. È quindi importante coinvolgere precocemente le autorità regolatrici, così da chiarire i requisiti e ridurre il

rischio di ritardi. Vincoli di capacità organizzativa, comprese competenze o risorse limitate, possono incidere ulteriormente sull'implementazione. Questi rischi possono essere mitigati attraverso capacity building, formazione mirata e l'allocatione di risorse adeguate a sostegno dell'implementazione e dell'esercizio.

Infine, il coinvolgimento degli stakeholder svolge un ruolo cruciale per un'implementazione di successo. Un coinvolgimento limitato o una mancata convergenza tra gli stakeholder possono ostacolare i progressi, mentre una comunicazione continua e un coinvolgimento precoce favoriscono coordinamento, accettazione ed efficace implementazione.

Rischi	Misure di mitigazione
Mancanza di dati o scarsa qualità dei dati	Valutazione e validazione precoce dei dati
Incompatibilità tecnica	Progettazione modulare del sistema
Ritardi normativi	Coinvolgimento precoce delle autorità regolatrici
Capacità organizzativa limitata	Sviluppo delle capacità e formazione
Scarso coinvolgimento degli stakeholder	Comunicazione continua con gli stakeholder

### 5.4. Conclusioni e prospettive

Il manuale CE4CE dimostra come i principi dell'economia circolare possano essere tradotti in applicazioni pratiche all'interno dei sistemi di trasporto pubblico. Attraverso azioni pilota implementate in differenti contesti operativi, il progetto ha generato un'esperienza preziosa su come preservare il valore, ridurre gli sprechi e migliorare l'efficienza delle risorse nelle infrastrutture, nei veicoli e nei sistemi energetici.

Le soluzioni presentate in questo manuale si basano su tale esperienza e forniscono approcci strutturati e trasferibili che possono sostenere autorità e operatori del trasporto pubblico nell'implementazione di pratiche circolari.

Insieme alle lezioni apprese trasversali, offrono sia un orientamento strategico sia indicazioni pratiche per la transizione da una gestione lineare a una gestione circolare degli asset.

La checklist illustrata in questo capitolo fornisce un approccio strutturato adattabile a diversi contesti di trasporto pubblico e a differenti soluzioni circolari. Saranno essenziali uno scambio continuo di conoscenze, la collaborazione tra stakeholder e l'ulteriore sviluppo di modelli di business circolari per portare questi approcci su scala più ampia e sostenere la transizione verso sistemi di trasporto pubblico sostenibili e circolari.

## 6. Riferimenti

### Deliverable del progetto CE4CE:

- D.1.1.3 Il Circularity Compass del trasporto pubblico - Sintesi dei risultati con indicazioni per l'adozione.
- D.1.2.2 Relazione su implementazione, test, valutazione e peer review della piattaforma CE4CE per la circolarità del trasporto pubblico.
- D.3.1.1 Relazione sui requisiti congiunti, sulla preparazione, implementazione e valutazione dei piloti: manutenzione predittiva a Lipsia e Bergamo e simulazione di un corridoio elettrificato a Gdynia.
- D.3.1.2 Relazione sullo sviluppo di soluzioni digitali congiunte per abilitare e accelerare la circolarità nel trasporto pubblico.
- D.3.2.1 Relazione sui requisiti congiunti e sul piano di preparazione, implementazione e valutazione dei piloti: riutilizzo di scambi filoviari a Szeged e riutilizzo di batterie usate a Maribor.
- D.3.2.2 Relazione sullo sviluppo di soluzioni per preservare il valore e ridurre gli sprechi delle infrastrutture del trasporto pubblico.
- D.3.3.1 Relazione sui requisiti congiunti e sul piano di preparazione, implementazione e valutazione dei piloti.
- D.3.3.2 Relazione per facilitare l'adozione di soluzioni volte a preservare il valore e ridurre gli sprechi di veicoli e materiale rotabile.

### Schede informative sugli output del progetto CE4CE:

- O1.1 Circularity Compass CE4CE per il trasporto pubblico.
- O1.2 Piattaforma di conoscenza CE4CE per la circolarità del trasporto pubblico.
- O3.1 Ottimizzazione digitale delle infrastrutture e dei veicoli tramite manutenzione predittiva.
- O3.2 Moduli per la manutenzione predittiva delle infrastrutture e del materiale rotabile.
- O3.3 Simulazione di un corridoio elettrificato e dei flussi energetici per simulare scenari circolari di potenziamento dell'elettificazione.
- O3.4 Strumento di pianificazione aziendale circolare per flotte e infrastrutture di trasporto pubblico elettrificate.
- O3.5 Dimostrazione della fattibilità del riutilizzo di scambi filoviari.
- O3.6 Definizione di criteri di adozione per il riutilizzo di scambi filoviari.
- O3.7 Analisi di applicazioni di batterie usate per immagazzinare energia rinnovabile destinata all'alimentazione di un caricatore rapido, come esempio di orientamento strategico verso la circolarità.
- O3.8 Sviluppo di modelli di business trasferibili per il riutilizzo di batterie destinate all'accumulo di energia rinnovabile nei sistemi di trasporto pubblico.
- O3.9 Progettazione delle unità di controllo del tram nell'ambito della rigenerazione dei tram.
- O3.10 Mercato online dell'usato e piattaforma di matching per parti usate, prodotti e condivisione di informazioni.



Scan me for the project website

Copyright: Szeged Transport Company

Il progetto CE4CE (Infrastrutture del trasporto pubblico in Europa centrale - facilitare la transizione verso l'economia circolare) rafforza il pensiero sistemico dell'economia circolare tra gli attori del trasporto pubblico dell'Europa centrale, con l'obiettivo di ridurre gli sprechi e creare valore lungo nuovi cicli di vita delle infrastrutture e del materiale rotabile.

## CONTATTACI

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH/ azienda di trasporto pubblico di Lipsia

Coordinatore di progetto: sig. Stefan Röll

Email: [CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de](mailto:CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de)

Sito web del progetto: <https://www.interreg-central.eu/projects/ce4ce/>

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/interreg-ce4ce/> YouTube:

<https://www.youtube.com/@InterregCE4CE>

Piattaforma di conoscenza del progetto:

<https://circularity4publictransport.eu/>

