

# ROZWÓJ CYRKULARNEGO TRANSPORTU PUBLICZNEGO

Doświadczenia z pilotaży i rozwiązania w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym dla operatorów transportu publicznego



**Interreg**  
CENTRAL EUROPE



Co-funded by  
the European Union

CE4CE

# Stopka redakcyjna

## Projekt

CE0100250 CE4CE - Infrastruktura transportu publicznego w Europie Środkowej - wspieranie przejścia do gospodarki o obiegu zamkniętym

## Kontakt

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH / Lipskie przedsiębiorstwo transportu publicznego,  
Adres: Georgiring 3, 04103 Leipzig, Niemcy  
Strona internetowa: <https://www.l.de/verkehrsbetriebe/>  
E-mail: CE4CE.Verkehrsbetriebe@L.de

## Finansowanie

Interreg Central Europe Programme  
Strona internetowa: <https://www.interreg-central.eu/>

## Autorzy

Danijel Hojski, Marjan Lep, Vlasta Rodošek (Uniwersytet w Mariborze, Słowenia)

## Współautorzy

Stefan Röhl, Conrad Jentzsch (Lipskie przedsiębiorstwo transportu publicznego, Niemcy), Jan Röhl (Kruch Railways, Austria), Liliana Donato, Sara Biffi (ATB Bergamo, Włochy), Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale srl, Włochy), Dominika Kowalkowska (PKA Gdynia, Polska), Agnieszka Szmelter-Jarosz, Marcin Wolek (Uniwersytet Gdański, Polska), Németh Zoltán Ádám, Gábor Jéga-Szabó (SZKT Szeged, Węgry), Mitja Klemencic (Miasto Maribor), Alexandra Scharzenberger, Marta Woronowicz (stowarzyszenie trolley:motion, Austria), Laura López, Ana-Maria Baston (Rupprecht Consult, Niemcy), Nikolett Csörgő (Mobilissimus Kft, Węgry)

## Skład i opracowanie graficzne

Danaja Dvornik (@\_studio\_kai\_)

Data publikacji

kwiecień 2026

## Prawa autorskie

*Niniejsza publikacja stanowi utwór autorski konsorcjum projektu CE4CE, któremu przewodzi Lipskie przedsiębiorstwo transportu publicznego. Wszystkie obrazy i elementy tekstowe w tej publikacji, przy których wskazano źródło, są własnością organizacji lub osób wskazanych jako autorzy.*

## O projekcie CE4CE

Projekt CE4CE promuje systemowe myślenie o gospodarce o obiegu zamkniętym wśród podmiotów transportu publicznego z krajów Europy Środkowej, aby ograniczać odpady i tworzyć wartość w nowych cyklach życia infrastruktury i taboru. W tym celu CE4CE wspólnie opracowuje rozwiązania, które zwiększają wiedzę i kompetencje sektora, pomagają ograniczać bariery i koszty oraz wspierają rozwój nowych usług i wyspecjalizowanych miejsc pracy, a także strategii i planów działań poprawiających kształtowanie polityk, uczenie się i wymianę doświadczeń na poziomie regionalnym i transnarodowym.

Celem projektu CE4CE jest przeniesienie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym do sektora transportu publicznego, a tym samym ograniczenie ilości odpadów, zwiększenie efektywności sektora i poprawa śladu środowiskowego transportu publicznego.



Rysunek 1: Partnerzy CE4CE podczas wspólnej dyskusji na temat rozwiązań i planów działania w 2025 roku. Źródło: Konsorcjum CE4CE.

# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Struktura projektów pilotażowych i rozwiązań CE4CE</b> .....	<b>6</b>
2.1. Powiązanie działań CE4CE z ramą cyklu życia AETE .....	7
<b>3. Projekty pilotażowe i rozwiązania CE4CE</b> .....	<b>10</b>
3.1. Działanie A.1: Opracowanie Kompas Cyrkularności CE4CE i Platformy wiedzy dla transportu publicznego .....	11
3.1.1. Pilotaż P.1: Kompas Cyrkularności dla transportu publicznego.....	11
3.1.2. Rozwiązanie S.1: Platforma wiedzy dla cyrkularnego transportu publicznego .....	13
3.1.3. Rozwiązanie S.2: Internetowy rynek używanych zasobów i platforma kojarzenia partnerów.....	15
3.2. Działanie A.2: Opracowanie wspólnych rozwiązań cyfrowych wspierających i przyspieszających cyrkularność w transporcie publicznym .....	16
3.2.1. Pilotaż P.2: Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcijnemu (Leipzig, Niemcy) . .....	16
3.2.2. Pilotaż P.2: Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcijnemu (Bergamo, Włochy) .....	18
3.2.3. Rozwiązanie S.3: Moduły utrzymania predykcijnego infrastruktury i taboru .....	20
3.2.4. Pilotaż P.4: Symulacja zelektryfikowanych korytarzy transportu publicznego i przepływów energii (Gdynia, Polska) .....	22
3.2.5. Rozwiązanie S.4: Narzędzie do cyrkularnego planowania biznesowego zelektryfikowanego taboru i infrastruktury .....	24
3.3. Działanie A.3: Opracowanie rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego .....	25
3.3.1. Pilotaż P.5: Ponowne użycie zwrotnic trolejbusowych (Szeged, Węgry) .....	25
3.3.2. Rozwiązanie S.5: Określenie kryteriów wdrażania ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych .....	27
3.3.3. Pilotaż P.6: Wykorzystanie baterii trakcyjnych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu energii do szybkiego ładowania z energii odnawialnej (Maribor, Słowenia).....	27
3.3.4. Rozwiązanie S.6: Przenoszalne modele biznesowe wykorzystania baterii trakcyjnych z drugiego życia .....	29
3.4. Działanie A.4: Wspieranie wdrażania rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze .....	30
3.4.1. Pilotaż P.7: Remanufacturing i przeprojektowanie jednostek sterujących tramwaju w celu umożliwienia ponownego użycia komponentów (Szeged, Węgry) .....	30
<b>4. Zdobyte doświadczenia</b> .....	<b>33</b>
<b>5. Lista kontrolna wdrożenia i kluczowe kwestie</b> .....	<b>35</b>
5.1. Kluczowe kwestie dla skutecznego wdrożenia .....	35
5.2. Lista kontrolna wdrożenia .....	35
5.3. Typowe ryzyka i działania ograniczające .....	37
5.4. Wnioski i perspektywy .....	37
<b>6. Źródła</b> .....	<b>38</b>

## Wykaz skrótów

Skrót	Definicja
AETE	Avoid - Extend - Transform - Enable (unikaj - wydłużaj - przekształcaj - umożliwiają)
BESS	Bateryjny system magazynowania energii
CAN-BUS	Magistrala komunikacyjna Controller Area Network
CE4CE	Gospodarka o obiegu zamkniętym dla Europy Środkowej
DC	Prąd stały
EFS	Symulacja przepływów energii
GNSS	Globalny system nawigacji satelitarnej
IMC	Ładowanie podczas jazdy
KPI	Kluczowy wskaźnik efektywności
PV	Fotowoltaika
RES	Odnawialne źródła energii

## Wykaz skrótów partnerów

Skrót	Definicja
LVB	Leipziger Verkehrsbetriebe, Niemcy
KRUCH	KRUCH Railway Innovations, Austria
TM	trolley:motion, Austria
ATB	Azienda Trasporti Bergamo, Włochy
REDMINT	Redmint Impresa Sociale, Włochy
SZKT	Przedsiębiorstwo transportowe Szeged, Węgry
MOBILISSIMUS	Mobilissimus, Węgry
PKA	Operator autobusowego transportu publicznego w Gdyni, Polska
MOM	Miasto Maribor, Słowenia
UG	Uniwersytet Gdański, Polska
UM	Uniwersytet w Mariborze, Słowenia
RUPPRECHT	Rupprecht Consult (doradca LVB), Niemcy

## Streszczenie

Projekt CE4CE wspiera przejście na praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym w systemach transportu publicznego w Europie Środkowej poprzez przenoszenie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym do praktycznych działań pilotażowych i przenoszalnych rozwiązań obejmujących cykle życia infrastruktury i taboru. Dzięki eksperymentom w warunkach rzeczywistych i opracowywaniu rozwiązań CE4CE przyczynia się do ograniczania odpadów, zachowania wartości i tworzenia nowych cyrkularnych łańcuchów wartości w transporcie publicznym.

W ramach projektu organizatorzy i operatorzy transportu publicznego oraz inni interesariusze wspólnie opracowali i przetestowali działania pilotażowe i rozwiązania, które zwiększają wiedzę i kompetencje sektora, pomagają ograniczać bariery wdrożeniowe i koszty oraz umożliwiają rozwój nowych usług, kompetencji i cyrkularnych modeli biznesowych. Koncentrując się na konkretnych zastosowaniach w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, CE4CE wspiera efektywniejsze wykorzystanie zasobów, mniejszy wpływ na środowisko i długoterminową trwałość systemów transportu publicznego.

Projekty pilotażowe i rozwiązania przedstawione w niniejszym podręczniku opierają się na współtworzeniu, testach pilotażowych i wzajemnych przeglądach eksperckich. Pokazują praktyki cyrkularne, takie jak wydłużanie okresu użytkowania, ponowne użycie, zmiana przeznaczenia i remanufacturing aktywów, a także mechanizmy umożliwiające, w tym narzędzia cyfrowe, platformy i modele biznesowe, które wspierają wdrażanie w sektorze transportu publicznego.

CE4CE realizowano w ramach partnerstwa transnarodowego, które odzwierciedla kompleksową perspektywę łańcucha wartości i systemu oraz obejmuje organizatorów i operatorów transportu publicznego, gminy, przemysł i organizacje badawcze z sześciu krajów Europy Środkowej. Zaangażowanie partnerów stowarzyszonych i międzynarodowych sieci dodatkowo wspierało komunikację, wymianę wiedzy i szerszy transfer rezultatów projektu.

Niniejszy podręcznik dokumentuje i upowszechnia kluczowe działania pilotażowe i rozwiązania opracowane w ramach projektu CE4CE oraz dostarcza praktycznych wniosków i wskazówek dla interesariuszy, którzy chcą zastosować zasady gospodarki o obiegu zamkniętym w kontekście transportu publicznego.

Podręcznik ma następującą strukturę:

### Rozdział 2

przedstawia ramy koncepcyjne i metodologiczne podejścia CE4CE, w tym model AETE i jego znaczenie dla wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym.

### Rozdział 3

przedstawia działania pilotażowe CE4CE wraz z odpowiadającymi im rozwiązaniami oraz pokazuje, w jaki sposób praktyczne doświadczenia przełożono na przenoszalne wyniki ukierunkowane na wdrożenie.

### Rozdział 4

podsumowuje kluczowe doświadczenia zdobyte we wszystkich projektach pilotażowych i rozwiązaniach oraz identyfikuje wspólne czynniki sukcesu, wyzwania i implikacje dla replikacji.

### Rozdział 5

zawiera wytyczne wdrożeniowe, w tym praktyczne kroki, kluczowe kwestie i czynniki ryzyka przy wdrażaniu rozwiązań CE4CE, a kończy się perspektywami przyszłych zastosowań i skalowania.



Rysunek 2: Konsorcjum CE4CE podczas końcowego spotkania projektowego w Mariborze, marzec 2026. Prawa autorskie: Uniwersytet w Mariborze.

# 1. Wprowadzenie

## Główny cel projektu CE4CE

Głównym celem projektu CE4CE jest umożliwienie organizatorom i operatorom transportu publicznego przejścia od liniowych podejść do zarządzania aktywami do cyrkularnych modeli ukierunkowanych na cykl życia. Poprzez zajęcie się barierami technicznymi, organizacyjnymi i rynkowymi CE4CE wspiera zachowanie wartości, ograniczanie odpadów i bardziej efektywne wykorzystanie zasobów w infrastrukturze, pojazdach i powiązanych aktywach transportu publicznego.

Aby osiągnąć ten cel, CE4CE łączy realizację pilotaży z opracowaniem rozwiązań ukierunkowanych na wdrożenie, które można przenieść i dostosowywać także poza partnerstwo projektowe.

## Partnerstwo projektowe

CE4CE realizuje partnerstwo transnarodowe, które łączy organizatorów i operatorów transportu publicznego, gminy, instytucje badawcze i dostawców rozwiązań z kilku krajów Europy Środkowej. Ta różnorodność umożliwia testowanie i rozwijanie podejść gospodarki

o obiegu zamkniętym w różnych warunkach operacyjnych, organizacyjnych i regulacyjnych, a jednocześnie sprzyja wzajemnemu uczeniu się i wymianie między regionami.

## Zakres niniejszego podręcznika

Celem niniejszego podręcznika jest udokumentowanie, uporządkowanie i przedstawienie działań pilotażowych oraz rozwiązań opracowanych w ramach projektu CE4CE. Koncentruje się on na tym, jak zasady gospodarki o obiegu zamkniętym zostały przetestowane w praktyce i w jaki sposób powstałe rozwiązania mogą wspierać ich wdrażanie w organizacjach transportu publicznego.

Podręcznik ma służyć jako praktyczny dokument referencyjny dla organizatorów transportu publicznego, operatorów, decydentów i innych interesariuszy zainteresowanych wdrażaniem podejść gospodarki o obiegu zamkniętym. Zawiera uporządkowane opisy pilotaży i rozwiązań, podkreśla zdobyte doświadczenia oraz wspiera przenoszalność i replikację w innych kontekstach.

# 2. Struktura projektów pilotażowych i rozwiązań CE4CE

W ramach CE4CE działania pilotażowe i rozwiązania zostały zorganizowane i przedstawione według **trzech tematycznych obszarów** działań zdefiniowanych w projekcie. Obszary te odzwierciedlają różne problemy gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym i zapewniają wspólne ramy, w których rozwijano rezultaty projektu.

Każdy obszar działań obejmuje **działania pilotażowe i odpowiadające im rozwiązania**. Działania pilotażowe są realizowane jako praktyczne interwencje w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych i służą testowaniu podejść, pozyskiwaniu dowodów empirycznych oraz identyfikacji wyzwań technicznych, organizacyjnych i rynkowych. Na podstawie doświadczeń, wyników i wniosków uzyskanych z realizacji pilotaży oraz wspólnych procesów rozwojowych **każdy pilotaż jest bezpośrednio powiązany z odpowiednim rozwiązaniem**, które syntetyzuje ustalenia z pilotażu w przenoszalny rezultat ukierunkowany na wdrożenie.

**Cztery obszary tematyczne omówione w niniejszym podręczniku to:**

- **A.1: Opracowanie Kompasów Cyrkularności CE4CE i Platformy wiedzy dla transportu publicznego**, w tym ustrukturyzowanych ram oceny cyrkularności, internetowej platformy wiedzy oraz internetowego rynku używanych zasobów i platformy kojarzenia partnerów, które wspierają współpracę i wymianę informacji między uczestnikami cyklu życia transportu publicznego.

- **A.2: Opracowanie wspólnych rozwiązań cyfrowych wspierających i przyspieszających cyrkularność w transporcie publicznym**, w tym wspólnych ram analitycznych oraz pilotaży w zakresie utrzymania predykcyjnego i symulacji e-korytarza.

- **A.3: Opracowanie rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego**, obejmujących ponowne użycie komponentów infrastruktury i wykorzystanie aktywów energetycznych w drugim życiu.

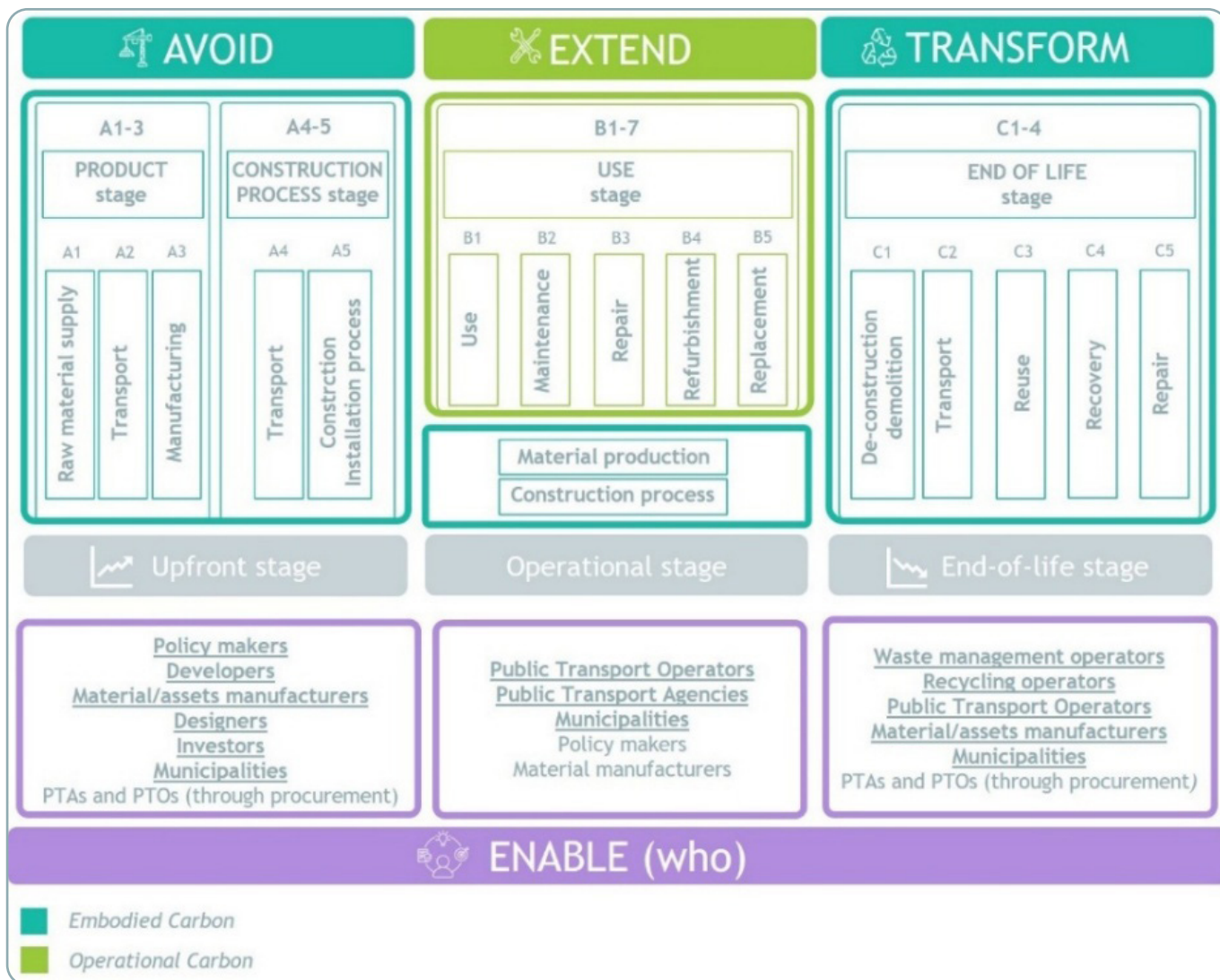
- **A.4: Wspieranie wdrażania rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze**, ze szczególnym uwzględnieniem remanufacturingu, ponownego użycia i mechanizmów rynkowych.

Struktura oparta na działaniach umożliwia czytelnikom łatwe poruszanie się między działaniami pilotażowymi i rozwiązaniami w ramach tego samego obszaru tematycznego oraz wspiera jasne zrozumienie, w jaki sposób rezultaty CE4CE przyczyniają się do wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych segmentach systemów transportu publicznego.

## 2.1. Powiązanie działań CE4CE z ramą cyklu życia AETE

Działania CE4CE oraz powiązane z nimi działania pilotażowe i rozwiązania są zgodne z ramą cyklu życia **AVOID-EXTEND-TRANSFORM-ENABLE (AETE)** dla wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym. Rama ta wspiera systematyczną identyfikację tego, gdzie i jak można tworzyć lub zachowywać wartość cyrkularną na różnych etapach cyklu życia aktywów transportu publicznego.

Każde działanie CE4CE przede wszystkim dotyczy określonych **obszarów działania AETE**, a jednocześnie przyczynia się do warunków umożliwiających w całym systemie. Pilotaże realizowane w ramach poszczególnych działań operacjonalizują zatem zasady gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez ukierunkowanie na konkretne etapy cyklu życia, takie jak użytkowanie, utrzymanie, ponowne użycie, odnowa czy zmiana przeznaczenia.



Rysunek 3: Dostosowana wersja cyklu życia PTI na podstawie EN15978.

### A.1: Opracowanie Kompasów Cyrkularności CE4CE i Platformy wiedzy dla transportu publicznego

To działanie przede wszystkim dotyczy wymiaru **ENABLE** w ramach AETE. Poprzez opracowanie i testowanie Kompasów Cyrkularności CE4CE oraz powiązanej Platformy wiedzy tworzy systemowe i organizacyjne warunki wstępne niezbędne do wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym.

Pilotaż Kompasów Cyrkularności wspiera wymiar **ENABLE**, zapewniając **ustrukturyzowaną metodologię** oceny służącą identyfikacji luk w cyrkularności i projektowaniu nowych łańcuchów wartości cyklu życia. Umożliwia refleksję strategiczną, angażowanie interesariuszy i świadome podejmowanie decyzji.

Platforma wiedzy oraz internetowy rynek używanych zasobów i platforma kojarzenia partnerów dodatkowo wzmacniają warunki **ENABLE** poprzez promowanie wymiany wiedzy, dzielenia się informacjami i współpracy między uczestnikami cyklu życia. Platforma kojarzenia partnerów pośrednio wspiera także **EXTEND - ponowne użycie i remanufacturing** - ponieważ umożliwia rynkowe mechanizmy dla komponentów z drugiego życia i odnowionych aktywów.

Działanie to zapewnia zatem horyzontalną podstawę, na której opierają się bardziej technicznie ukierunkowane działania pilotażowe i rozwiązania.

### A.2: Rozwiązania cyfrowe wspierające i przyspieszające cyrkularność w transporcie publicznym

To działanie przede wszystkim dotyczy wymiaru **ENABLE** w ramach AETE. Dzięki narzędziom cyfrowym do utrzymania predykcyjnego, symulacji i planowania biznesowego tworzy warunki potrzebne do wspierania działań **AVOID** i **EXTEND** w cyklach życia infrastruktury i taboru. Pilotaże utrzymania predykcyjnego w szczególności przyczyniają się do faz **EXTEND - utrzymanie i naprawy** - ponieważ umożliwiają wczesną interwencję, ograniczają awarie i wydłużają okres użytkowania aktywów. Symulacja e-korytarzy i przepływów energii wspiera **AVOID**, umożliwiając lepsze decyzje planistyczne i zapobiegając przewymiarowaniu aktywów.

### A.3: Rozwiązania służące zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego

To działanie jest osadzone przede wszystkim w wymiarach **EXTEND** i **TRANSFORM** w ramach AETE. Pilotaże skupione na ponownym użyciu zwrotnic trolejbusowych bezpośrednio dotyczą **EXTEND - ponownego użycia** - ponieważ poprzez utrzymywanie komponentów infrastruktury w eksploatacji także po pierwszej fazie użytkowania zachowują wbudowany materiał i energię. Pilotaż zrealizowany w Mariborze, analizujący wykorzystanie używanych baterii do zasilania szybkich ładowarek, dotyczy **EXTEND - zmiany przeznaczenia** - ponieważ baterie są przenoszone z pierwotnej funkcji trakcyjnej do nowego zastosowania jako stacjonarny magazyn energii. Jednocześnie działanie to przyczynia się do **TRANSFORM**, ponieważ przygotowuje podstawy pod nowe łańcuchy wartości cyklu życia i strategię zarządzania po zakończeniu pierwszego okresu użytkowania.

### A.4: Wspieranie wdrażania rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze

To działanie przede wszystkim dotyczy **EXTEND - odnowy i ponownego użycia** - oraz **ENABLE**. Pilotaż remanufacturingu jednostek sterujących tramwaju koncentruje się na wydłużeniu funkcjonalnego okresu użytkowania komponentów pojazdów poprzez przeprojektowanie i odnowę. Powiązane rozwiązanie, internetowy rynek używanych zasobów i platforma kojarzenia partnerów, wzmacnia warunki **ENABLE**, wspierając wymianę informacji, tworzenie rynku i współpracę między uczestnikami cyklu życia, które są warunkami wstępnymi skalowalnych praktyk ponownego użycia i remanufacturingu.

Działania CE4CE jako całość pokazują, jak różne obszary **działania AETE są komplementarnie podejmowane** w systemach transportu publicznego. Poszczególne pilotaże mogą koncentrować się na specyficznych fazach, takich jak utrzymanie, ponowne użycie czy zmiana przeznaczenia, ale ich łączny efekt przyczynia się do systemowego przejścia od liniowego zarządzania aktywami do cyrkularnych systemów transportu publicznego ukierunkowanych na cykl życia.

Przegląd tematycznych obszarów działań oraz odpowiadających im par pilotaż-rozwiązanie przedstawiono w Tabeli 1, która podsumowuje relacje między działaniami pilotażowymi, rozwiązaniami i zaangażowanymi partnerami.

Działanie	Pilotaż	Rozwiązanie	Rodzaj rozwiązania	Podstawowe działanie AETE
<b>A.1 Opracowanie Kompas Cykularności CE4CE i Platformy wiedzy dla transportu publicznego</b>	P.1 Kompas Cykularności dla transportu publicznego - ocena luk w cykularności i projektowanie nowych łańcuchów wartości w celu zwiększenia efektywności zasobowej	S.1 Platforma wiedzy CE4CE dla cykularnego transportu publicznego	Platforma cyfrowa / centrum wiedzy	ENABLE - wiedza systemowa i współpraca
		S.2 Internetowy rynek używanych części i produktów oraz platforma kojarzenia partnerów i wymiany informacji	Cyfrowy rynek / narzędzie kojarzenia partnerów	EXTEND - umożliwienie ponownego użycia / remanufacturingu
<b>A.2 Opracowanie wspólnych rozwiązań cyfrowych wspierających i przyspieszających cykularność w transporcie publicznym</b>	P.2 i P.3 Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcijnemu	S.3 Moduły utrzymania predykcijnego infrastruktury i taboru	System monitoringu / rozwiązanie cyfrowe	EXTEND - utrzymanie / naprawa
	P.4 Symulacja e-korytarza i przepływów energii do symulacji cykularnych scenariuszy rozwoju elektryfikacji (pas autobusowy, zasilanie elektryczne i ładowanie podczas jazdy)	S.4 Narzędzie do cykularnego planowania biznesowego zelektryfikowanego taboru i infrastruktury transportu publicznego	Narzędzie planistyczne / narzędzie wspomagania decyzji	AVOID - planowanie wyprzedzające / optymalizacja systemu
<b>A.3 Opracowanie rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego</b>	P.5 Demonstracja wykonalności ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych	S.5 Określenie kryteriów wdrażania ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych	Metodologia / ramy decyzyjne	EXTEND - ponowne użycie
	P.6 Analiza wykorzystania używanych baterii do magazynowania energii odnawialnej na potrzeby zasilania szybkiej ładowarki jako przykład strategicznego kierunku ku cykularności	S.6 Przenoszalne modele biznesowe wykorzystania baterii trakcyjnych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu	Model biznesowy / ramy wdrożeniowe	EXTEND - zmiana przeznaczenia
<b>A.4 Wspieranie wdrażania rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze</b>	P.7 Projekt jednostek sterujących tramwaju w ramach remanufacturingu tramwajów	Promocja i upowszechnianie wspierane przez S.2 Internetowy rynek używanych zasobów i platformę kojarzenia partnerów		EXTEND - odnowa / remanufacturing

Tabela 1: Przegląd pilotaży CE4CE i odpowiadających im rozwiązań według działań.

### 3. Projekty pilotażowe i rozwiązania CE4CE

Działania pilotażowe są centralnym elementem wdrożeniowym projektu CE4CE. Przenoszą koncepcje, metody i narzędzia gospodarki o obiegu zamkniętym do konkretnych zastosowań w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, umożliwiając organizatorom i operatorom transportu publicznego oraz innym interesariuszom testowanie podejść, ocenę wykonalności i zdobywanie praktycznego doświadczenia.

Pilotaże realizowane w ramach CE4CE mają kilka celów. Dostarczają empirycznych dowodów dotyczących technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych implikacji praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym, wspierają uczenie się między partnerami i zmniejszają niepewność związaną z realizacją i wdrożeniem. Jednocześnie działania pilotażowe działają jako pomost między celami strategicznymi a rozwojem rozwiązań, ponieważ generują wiedzę i dane potrzebne do przekształcania doświadczeń pilotażowych w przenoszalne i skalowalne rozwiązania.

W ramach CE4CE działania pilotażowe koncentrują się na zestawie określonych tematów pilotażowych, które odzwierciedlają główne dźwignie gospodarki o obiegu zamkniętym uwzględnione w projekcie w cyklach życia infrastruktury i taboru transportu publicznego:

- Ocena cyrkularności i projektowanie nowych łańcuchów wartości cyklu życia
- Utrzymanie predykcyjne infrastruktury transportu publicznego i taboru
- Cyfrowa symulacja zelektryfikowanych korytarzy transportu publicznego i przepływów energii
- Ponowne użycie komponentów infrastruktury transportu publicznego
- Wykorzystanie baterii trakcyjnych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu energii
- Remanufacturing i ponowne użycie komponentów taboru

Tematy te są realizowane poprzez **siedem działań pilotażowych** przeprowadzonych przez organizatorów i operatorów transportu publicznego w różnych miastach Europy Środkowej:

- **Pilotaż Kompas Cykularności dla transportu publicznego**, koordynowany przez stowarzyszenie trolley:motion (przy wsparciu Rupprecht Consult), opracował i przetestował ustrukturyzowane narzędzie oceny służące identyfikacji luk w cyrkularności i projektowaniu nowych łańcuchów wartości w celu zwiększenia efektywności zasobowej. Pilotaż obejmował opracowanie interfejsu internetowego i praktyczne zastosowanie w partnerstwie projektowym.
- W **Lipsku** w Niemczech lokalny operator transportu publicznego LVB przeprowadził **pilotaż utrzymania predykcyjnego**, w którym wykorzystał cyfrowe monitorowanie stanu wybranych aktywów

infrastrukturalnych i taborowych do testowania podejść opartych na danych w utrzymaniu oraz wspierania wydłużania okresu użytkowania

- W **Bergamo** we Włoszech ATB zrealizowało podobny **pilotaż utrzymania predykcyjnego** w innym środowisku operacyjnym, co umożliwiło porównanie metodologii, wymagań dotyczących danych i warunków organizacyjnych między sieciami
- W **Gdyni** w Polsce operator transportu publicznego PKA przeprowadził **pilotaż symulacji zelektryfikowanych korytarzy transportu publicznego** w celu analizy przepływów energii i oceny cyrkularnych scenariuszy elektryfikacji, w tym ładowania podczas jazdy i elektryfikacji pasa autobusowego.
- W **Segedynie** na Węgrzech operator transportu publicznego SZKT przeprowadził **pilotaż demonstrujący ponowne użycie zwrotnic trolejbusowych**, koncentrując się na wydłużeniu okresu użytkowania intensywnie eksploatowanych komponentów infrastruktury i ograniczeniu odpadów materiałowych.
- W **Mariborze** w Słowenii miasto Maribor - MOM przeanalizowało **wykorzystanie baterii trakcyjnych z drugiego życia** jako stacjonarnego magazynu energii wspierającego infrastrukturę szybkiego ładowania zasilaną energią odnawialną oraz zbadało wykonalność techniczną i aspekty integracyjne.
- W **Segedynie** SZKT przeprowadziło również dodatkowy **pilotaż dotyczący remanufacturingu i przeprojektowania jednostek sterujących tramwaju**, którego celem było wydłużenie okresu użytkowania komponentów i umożliwienie ich ponownego użycia dzięki dostosowanemu projektowi i wymianie informacji.

Podczas gdy działania pilotażowe koncentrują się na testowaniu i walidacji podejść w rzeczywistych środowiskach operacyjnych, rozwiązania stanowią zagregowane wyniki ukierunkowane na wdrożenie, opracowane na podstawie realizacji pilotaży i wspólnych prac analitycznych.

**Rozwiązania** przekształcają doświadczenia pilotażowe w **ustrukturyzowane narzędzia, metodologie, kryteria i modele biznesowe**, które można przenosić, powielać i skalować w innych kontekstach transportu publicznego. Każde rozwiązanie jest powiązane z jednym lub większą liczbą działań pilotażowych w ramach tego samego obszaru tematycznego i opiera się na dowodach empirycznych, informacjach zwrotnych od interesariuszy oraz iteracyjnych procesach doskonalenia.

Dla każdego obszaru działań działania pilotażowe opisano wraz z odpowiadającymi im rozwiązaniami, podkreślając drogę od testowania i walidacji do syntezy i transferu.

### 3.1. Działanie A.1: Opracowanie Kompas Cirkularności CE4CE i Platformy wiedzy dla transportu publicznego

Chociaż działanie to formalnie nie należy do pakietu roboczego „Pokazanie, w jaki sposób transport publiczny może stać się cirkularny”, Kompas Cirkularności został zrealizowany i zweryfikowany w procesie testowania zbliżonym do pilotażu. Narzędzie zostało opracowane, a następnie przetestowane z udziałem interesariuszy transportu publicznego poprzez warsztaty, ankiety i działania walidacyjne, w których uczestniczyli operatorzy, organizatorzy,

badacze i przedstawiciele przemysłu. Działania te umożliwiły praktyczną weryfikację metodologii i udoskonalenie narzędzia na podstawie rzeczywistych informacji zwrotnych z eksploatacji. Kompas Cirkularności stanowi zatem techniczny pilotaż i rozwiązanie wspierające przejście do cirkularnych systemów transportu publicznego, mimo że organizacyjnie jest umieszczony w metodologicznym pakiecie roboczym projektu, a nie w demonstracyjnym pakiecie roboczym.

#### 3.1.1. Pilotaż P.1: Kompas Cirkularności dla transportu publicznego

##### Krótki opis pilotażu

Pilotaż Kompas Cirkularności został opracowany jako odpowiedź na kluczowe wyzwanie związane z przejściem do cirkularnych systemów transportu publicznego: brak praktycznych narzędzi pomagających organizacjom zrozumieć, gdzie i w jaki sposób zasady gospodarki o obiegu zamkniętym można włączyć do codziennego funkcjonowania i planowania strategicznego.

Chociaż o koncepcjach gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze transportu dyskutuje się coraz częściej, organizatorzy i operatorzy transportu publicznego często nie dysponują ustrukturyzowanymi podejściami do przekładania tych zasad na konkretne działania. Kompas Cirkularności ma zatem zapewnić praktyczne narzędzie orientacyjne, które pomaga organizacjom ocenić ich obecne praktyki cirkularne i zidentyfikować możliwości usprawnień w całym systemie transportu publicznego.

Celem pilotażu było opracowanie i walidacja metodologii umożliwiającej interesariuszom transportu publicznego ocenę praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w całym cyklu życia infrastruktury, pojazdów i systemów energetycznych. W odróżnieniu od pilotaży infrastrukturalnych lub technologicznych realizowanych w ramach CE4CE, Kompas Cirkularności stanowi rozwiązanie oparte na wiedzy, którego celem jest ułatwienie przejścia cirkularnego dzięki lepszemu zrozumieniu systemu i procesów decyzyjnych.

##### Rozwiązanie Kompas Cirkularności

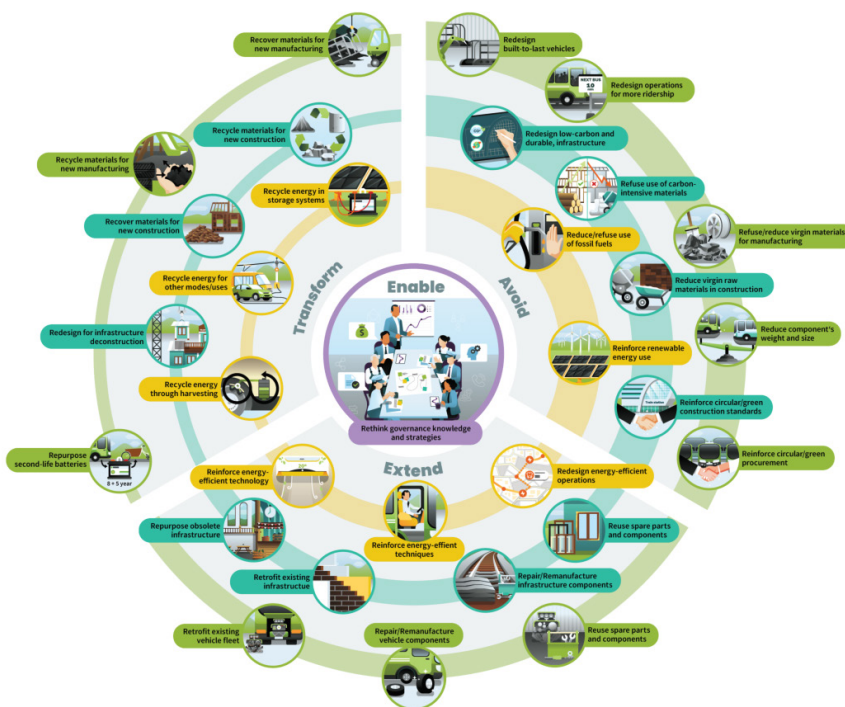
[Kompas Cirkularności](#) to internetowe [narzędzie samooceny](#) dostępne za pośrednictwem Platformy wiedzy CE4CE. Zapewnia ustrukturyzowane ramy, które umożliwiają organizacjom transportu publicznego ocenę praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych komponentach ich systemów.

Ocena obejmuje cztery kluczowe obszary systemów transportu publicznego: tabor, w tym pojazdy i baterie; infrastrukturę; systemy energetyczne; oraz zarządzanie, obejmujące warunki organizacyjne i umożliwiające. Ujęcie tych obszarów łącznie odzwierciedla systemowy charakter cirkularności w transporcie publicznym.

Ramy są zgodne z logiką cirkularnego cyklu życia Avoid - Extend - Transform - Enable (AETE). W praktyce oznacza to, że organizacje są prowadzone do refleksji nad tym, jak poprzez lepsze planowanie i zamówienia mogą ograniczyć zużycie zasobów, wydłużyć okres użytkowania aktywów dzięki utrzymaniu i odnowie, przekształcać aktywa poprzez ponowne użycie lub zmianę przeznaczenia oraz tworzyć warunki organizacyjne niezbędne do wspierania wdrożeń cirkularnych.

Rdzeniem narzędzia jest ustrukturyzowana ankieta samooceny, obejmująca kluczowe etapy cyklu życia - od produkcji i zamówień po eksploatację, utrzymanie i zarządzanie po zakończeniu użytkowania. Wyniki zapewniają jasny przegląd aktualnych praktyk cirkularnych i wskazują obszary, w których organizacje mogą dalej rozwijać strategie i rozwiązania cirkularne.

## 10 R-principles for circular public transport systems



Rysunek 4: Dostosowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym 10R do systemów transportu publicznego.

### Wymagane zasoby

Wdrożenie Kompas Cykularności wymaga przede wszystkim zasobów organizacyjnych i analitycznych. Opiera się na zaangażowaniu interesariuszy, eksperckiej facylitacji i dostępie do wiedzy operacyjnej w organizacjach transportu publicznego.

Faza testowania została przeprowadzona poprzez warsztaty, konsultacje eksperckie i ankiety samooceny, w które zaangażowani byli operatorzy transportu publicznego, organizatorzy i badacze. Ten proces współpracy zapewnił, że narzędzie odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne i jest użyteczne w różnych środowiskach organizacyjnych.

### Oczekiwane rezultaty / korzyści

Kompas Cykularności umożliwia organizacjom transportu publicznego identyfikację luk w cykularności, ocenę gotowości do wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym oraz analizę możliwych obszarów doskonalenia w całym cyklu życia transportu publicznego.

Dzięki uporządkowaniu złożonych informacji w jasne ramy oceny narzędzie wspiera budowanie świadomości i planowanie strategiczne. Pomaga organizacjom lepiej zrozumieć, w jaki sposób zasady gospodarki o obiegu zamkniętym można stosować w praktyce, szczególnie w obszarach zarządzania infrastrukturą, funkcjonowania taboru i systemów energetycznych.



Rysunek 5: Interfejs internetowego narzędzia samooceny CE4CE Kompas Cykularności.

## Możliwości upowszechnienia i dalszego rozwoju

Kompas Cyrkularności zapewnia skalowalne ramy wspierające przejście na praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze transportu publicznego. Jako narzędzie budowania świadomości i samooceny pomaga organizacjom identyfikować luki w cyrkularności i określać priorytetowe działania związane z infrastrukturą, taborem i systemami energetycznymi.

Wyniki oceny mogą służyć jako punkt wyjścia do

bardziej szczegółowych analiz, takich jak oceny cyklu życia, strategię cyrkularnych zamówień publicznych czy planowanie efektywnego wykorzystania zasobów. Jednocześnie dalszy rozwój i praktyczna przydatność narzędzia w dużym stopniu zależą od aktywnego zaangażowania interesariuszy oraz ciągłego wkładu wiedzy i doświadczeń sektorowych.

Przy trwałym wkładzie interesariuszy Kompas Cyrkularności może rozwinąć się w szerszą platformę wiedzy i benchmarkingu wspierającą cyrkularne przejście w systemach transportu publicznego.

### 3.1.2. Rozwiązanie S.1: Platforma wiedzy dla cyrkularnego transportu publicznego

#### Krótki opis rozwiązania

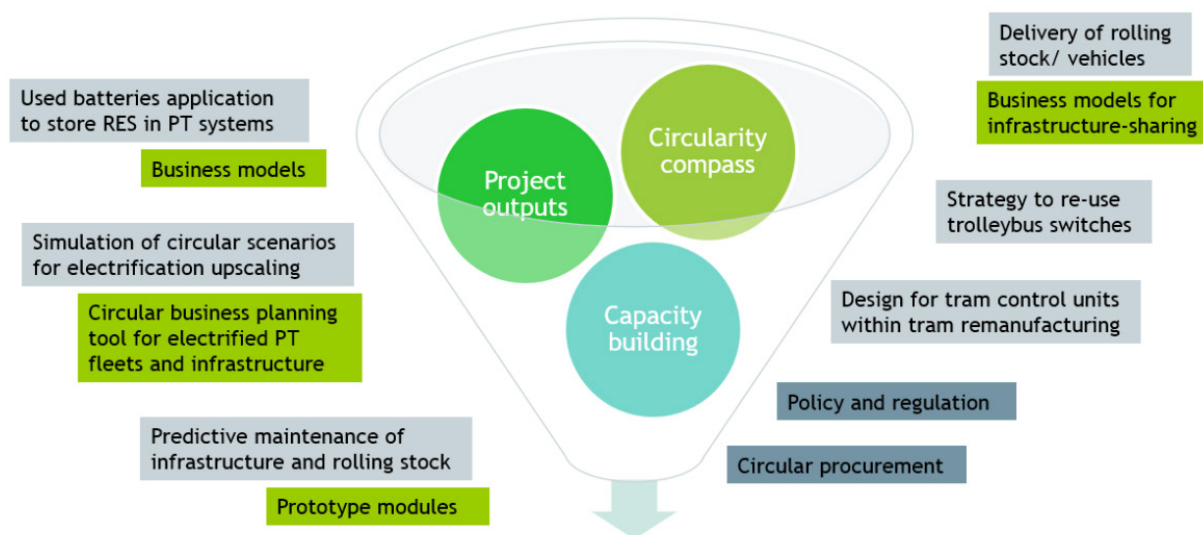
Platforma wiedzy CE4CE jest internetowym centrum wiedzy zaprojektowanym w celu wspierania przejścia na praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze transportu publicznego. Zapewnia ustrukturyzowane środowisko cyfrowe, w którym interesariusze transportu publicznego mogą uzyskać dostęp do narzędzi, dobrych praktyk, metodologii i materiałów edukacyjnych związanych z cyrkularnością w systemach transportowych.

Platforma odpowiada na kluczowe wyzwanie zidentyfikowane w trakcie projektu: wiedza o rozwiązaniach cyrkularnych w transporcie publicznym jest często rozproszona i trudno dostępna dla praktyków. Centralizując odpowiednie zasoby i łącząc je z praktycznymi wynikami projektu, platforma wspiera budowanie kompetencji, wymianę wiedzy i szersze wdrażanie rozwiązań cyrkularnych.

Platforma jest publicznie dostępna pod: <https://circularity4publictransport.eu/>

#### Cele rozwiązania

Głównym celem Platformy wiedzy CE4CE jest wzmocnienie kompetencji interesariuszy transportu publicznego w zakresie wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. W praktyce platforma działa jako scentralizowany punkt wejścia, w którym użytkownicy mogą uzyskać dostęp do narzędzi i zasobów związanych z gospodarką o obiegu zamkniętym, poznawać praktyczne przykłady i przetestowane rozwiązania oraz lepiej rozumieć, jak adresować zidentyfikowane luki w cyrkularności. Wspiera transfer wiedzy w sektorze, a jednocześnie pomaga organizacjom orientować się w dostępnych podejściach i ścieżkach wdrożenia.



### CE4CE knowledge platform matches new skills with knowledge

Rysunek 6: Konceptyjna struktura Platformy wiedzy CE4CE łącząca rozwiązania cyrkularne, narzędzia i rozwój kompetencji.

## Podstawowa koncepcja rozwiązania

Platforma wiedzy CE4CE została opracowana równolegle z **Kompasem Cyrkularności**, który działa jako narzędzie samooceny służące ocenie praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w organizacjach transportu publicznego.

Rozwiązania te są koncepcyjnie powiązane:

- **Kompas Cyrkularności** umożliwia organizacjom ocenę ich wyników w zakresie cyrkularności i identyfikację obszarów wymagających poprawy
- **Platforma wiedzy** zapewnia zasoby, narzędzia i przykłady, które pomagają niwelować zidentyfikowane luki

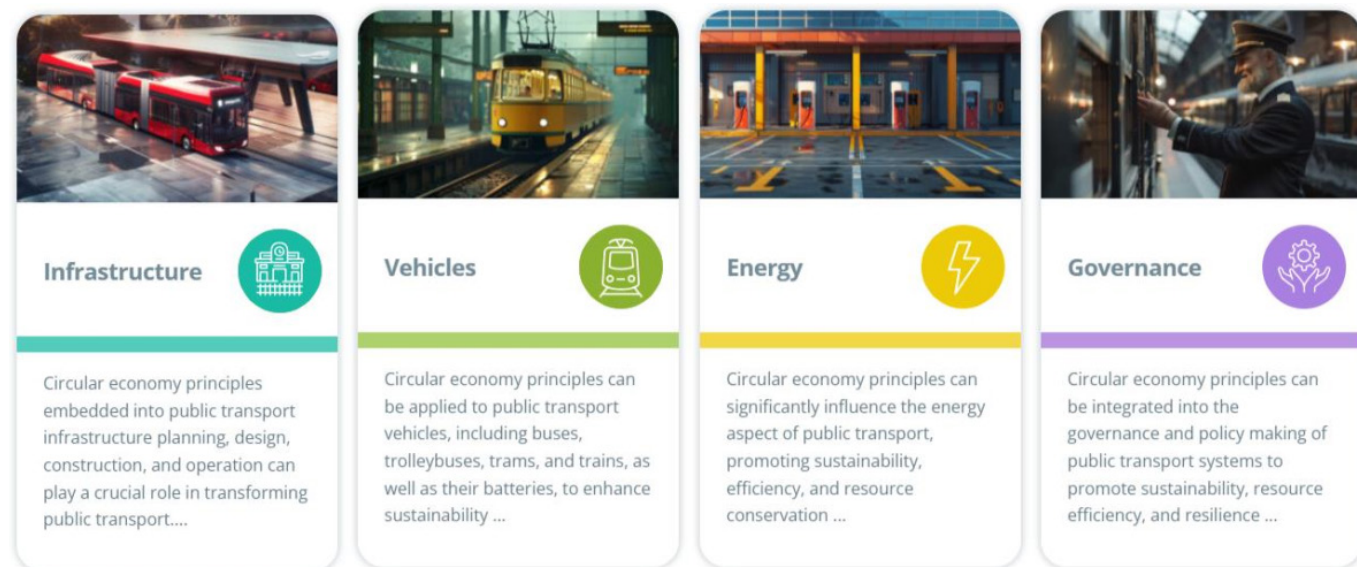
W ten sposób platforma łączy wyniki **oceny z praktycznym wsparciem wdrożenia**.

Koncepcja platformy opiera się na **zasadach gospodarki o obiegu zamkniętym 10R**, dostosowanych do kontekstu transportu publicznego. Zasady te ukierunkowują organizację zasobów wiedzy według kluczowych komponentów systemu transportu publicznego, takich jak infrastruktura, pojazdy, systemy energetyczne i zarządzanie.

Platforma wiedzy jest zorganizowana wokół pięciu głównych komponentów:

1. **Mapa kompetencji** - definiuje kluczowe umiejętności i wiedzę potrzebne do wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym.
2. **Kompas Cyrkularności** - internetowa ankieta samooceny, która umożliwia organizacjom ocenę ich poziomu cyrkularności.
3. **Dobre praktyki** - zbiór studiów przypadków prezentujących rozwiązania cyrkularne w sektorze.
4. **Centrum wiedzy** - repozytorium narzędzi, wytycznych, raportów i metodologii wspierających cyrkularne planowanie, eksploatację i utrzymanie.
5. **Forum kojarzenia partnerów** - planowany cyfrowy rynek umożliwiający wymianę części zamiennych i wyposażenia między organizacjami transportu publicznego.

Dzięki tej strukturze platforma łączy **ocenę cyrkularności, zasoby wiedzy i praktyczne rozwiązania**, tworząc kompleksowe środowisko wsparcia dla organizacji wdrażających cyrkularne systemy transportu publicznego.



Rysunek 7: Główne obszary kompetencyjne Platformy wiedzy CE4CE: infrastruktura, pojazdy, energia i zarządzanie.

## Podsumowanie rozwiązania

Platforma wiedzy CE4CE zapewnia ustrukturyzowane i skalowalne środowisko wspierające przejście do cyrkularnych systemów transportu publicznego. Łącząc ocenę (Kompas Cyrkularności), zasoby wiedzy i praktyczne rozwiązania, umożliwia interesariuszom przejście od budowania świadomości do wdrożenia. Jej długoterminowa wartość zależy od ciągłego rozwoju treści, zaangażowania interesariuszy i powiązania z inicjatywami sektorowymi, co pozwala jej stać się centralnym punktem odniesienia dla praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w transporcie publicznym.

### 3.1.3. Rozwiązanie S.2: Internetowy rynek używanych zasobów i platforma kojarzenia partnerów

#### Krótki opis rozwiązania

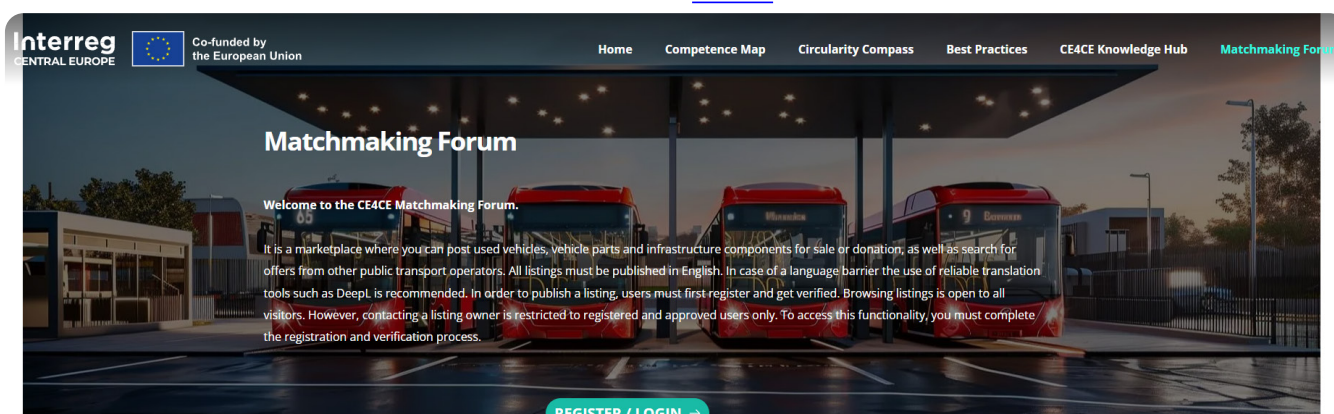
Rozwiązanie wprowadza cyfrową platformę kojarzenia partnerów, która umożliwi interesariuszom transportu publicznego wymianę informacji o używanych pojazdach, częściach zamiennych i komponentach infrastruktury oraz wspiera ich ponowne użycie i remanufacturing.

Rozwiązanie, opracowane jako funkcjonalny moduł Platformy wiedzy CE4CE, uzupełnia jej rolę w zakresie wiedzy i rozwoju kompetencji poprzez zapewnienie

praktycznego narzędzia do identyfikowania i realizacji cyrkularnych przypadków użycia. Odpowiada na brak ustrukturyzowanych mechanizmów wymiany w sektorze, w którym możliwości ponownego użycia są często pomijane z powodu ograniczonej widoczności i rozproszonej komunikacji.

Forum kojarzenia partnerów jest publicznie dostępne pod adresem:

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



Rysunek 8: Interfejs użytkownika Forum kojarzenia partnerów CE4CE - strona startowa.

#### Cele rozwiązania

Głównym celem rozwiązania jest umożliwienie uporządkowanej wymiany używanych zasobów w sektorze transportu publicznego oraz zwiększenie widoczności komponentów odpowiednich do ponownego użycia.

Poprzez usprawnienie przepływu informacji i wspieranie połączeń między operatorami, organizatorami i dostawcami platforma przyczynia się do praktyk ponownego użycia i remanufacturingu, ogranicza przedwczesne wycofywanie aktywów i wzmacnia współpracę w sektorze.

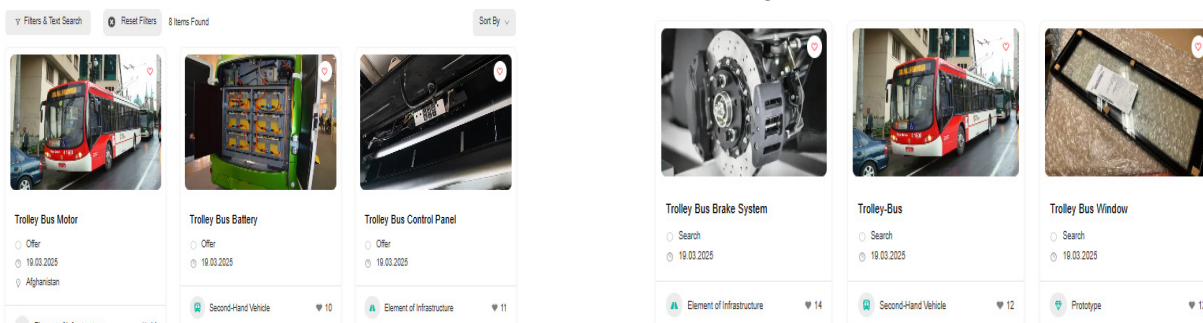
#### Podstawowa koncepcja rozwiązania

Rozwiązanie opiera się na cyfrowym forum kojarzenia partnerów, które łączy podaż i popyt na używane

zasoby transportu publicznego. Jego działanie przebiega według prostego procesu:

1. organizacje publikują oferty lub zapotrzebowanie dotyczące pojazdów, komponentów lub elementów infrastruktury
2. użytkownicy wyszukują i filtrują ogłoszenia według odpowiednich kryteriów
3. zainteresowane strony nawiązują kontakt za pośrednictwem platformy

Platforma działa jako narzędzie wymiany informacji i kojarzenia partnerów, a nie jako system transakcyjny. Ograniczając luki informacyjne i zwiększając przejrzystość, tworzy warunki do rozszerzania praktyk ponownego użycia i remanufacturingu w sektorze.



Rysunek 9: Przykład ogłoszeń w Forum kojarzenia partnerów CE4CE dotyczących używanych pojazdów, komponentów i elementów infrastruktury.

### Podsumowanie rozwiązania

Forum kojarzenia partnerów stanowi praktyczne narzędzie umożliwiające wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez ułatwianie ponownego użycia i wydłużanie cyklu życia aktywów transportu publicznego. Jego skuteczność rośnie wraz z szerszym udziałem użytkowników, ponieważ większa liczba

uczestników poprawia widoczność i możliwości dopasowania.

Dzięki dalszemu angażowaniu interesariuszy i dalszemu rozwojowi funkcjonalności platforma ma potencjał, aby stać się ważnym mechanizmem wspierającym cyrkularne łańcuchy wartości w transporcie publicznym.

## 3.2. Działanie A.2: Opracowanie wspólnych rozwiązań cyfrowych wspierających i przyspieszających cyrkularność w transporcie publicznym

Działanie to koncentruje się na wykorzystaniu narzędzi cyfrowych do wspierania cyrkularnego i zasobooszczędnego zarządzania infrastrukturą transportu publicznego i taboru. Analizuje, w jaki sposób monitorowanie oparte na danych i symulacja mogą usprawniać praktyki utrzymaniowe, planowanie infrastruktury i efektywność operacyjną w całym cyklu życia systemu.

W ramach tego działania zrealizowano trzy pilotaże w Lipsku, Bergamo i Gdyni. Pilotaże w Lipsku i Bergamo testują utrzymanie predykcyjne z wykorzystaniem

cyfrowego monitorowania stanu, natomiast pilotaż w Gdyni wykorzystuje modelowanie cyfrowego bliźniaka i symulację przepływów energii do wspierania planowania zelektryfikowanych korytarzy transportu publicznego.

Wyniki i doświadczenia z tych pilotaży stanowią podstawę do opracowania wspólnego rozwiązania, które zapewnia modułowe narzędzia cyfrowe do utrzymania predykcyjnego i cyrkularnego planowania systemów transportu publicznego, przedstawionego w następnym rozdziale.

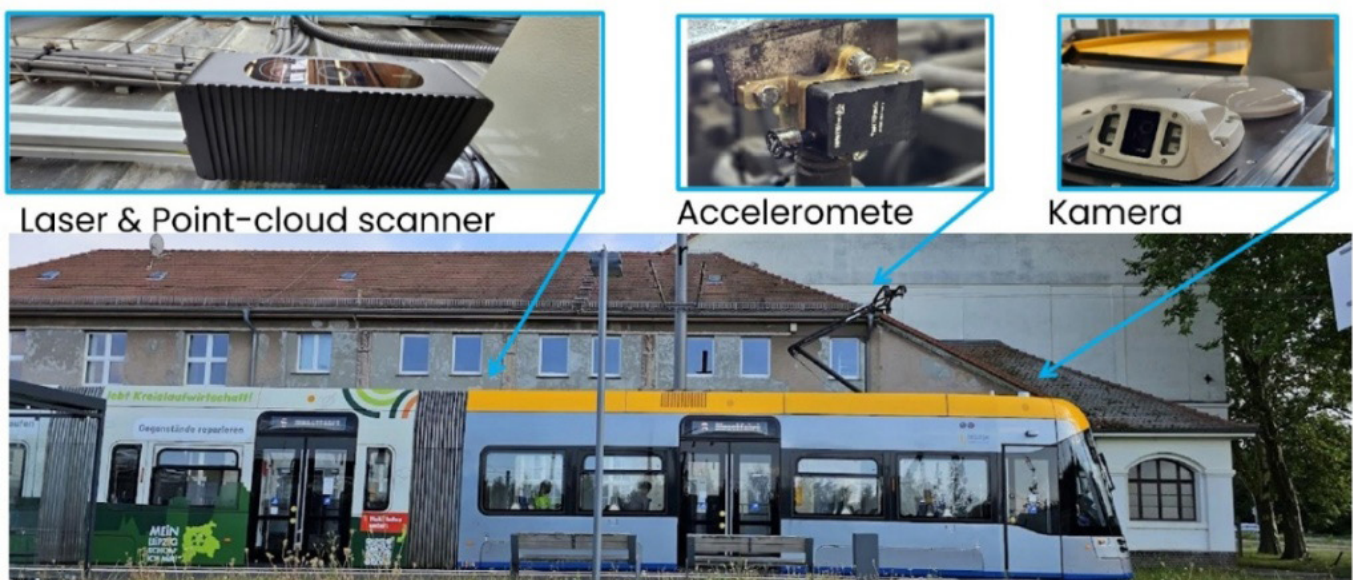
### 3.2.1. Pilotaż P.2: Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcyjnemu (Leipzig, Niemcy)

#### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten koncentruje się na wdrażaniu podejść utrzymania predykcyjnego dla infrastruktury transportu publicznego i taboru z wykorzystaniem cyfrowego monitorowania stanu. Pilotaż, przeprowadzony w Lipsku przez Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB), ma na celu przejście od utrzymania reaktywnego i planowanego w czasie do utrzymania predykcyjnego opartego na danych, aby wydłużyć okres użytkowania aktywów, ograniczyć

nieplanowane awarie i zmniejszyć liczbę zasobochłonnych interwencji.

Trzy pojazdy tramwajowe zostały wyposażone w czujniki, kamery i systemy laserowe do monitorowania torowiska i sieci trakcyjnej na 14-kilometrowym odcinku linii 1 podczas regularnej eksploatacji. Zebrane dane są analizowane w celu wykrywania wczesnych oznak zużycia i umożliwienia ukierunkowanych działań utrzymaniowych; analizowano również monitorowanie zużycia energii.

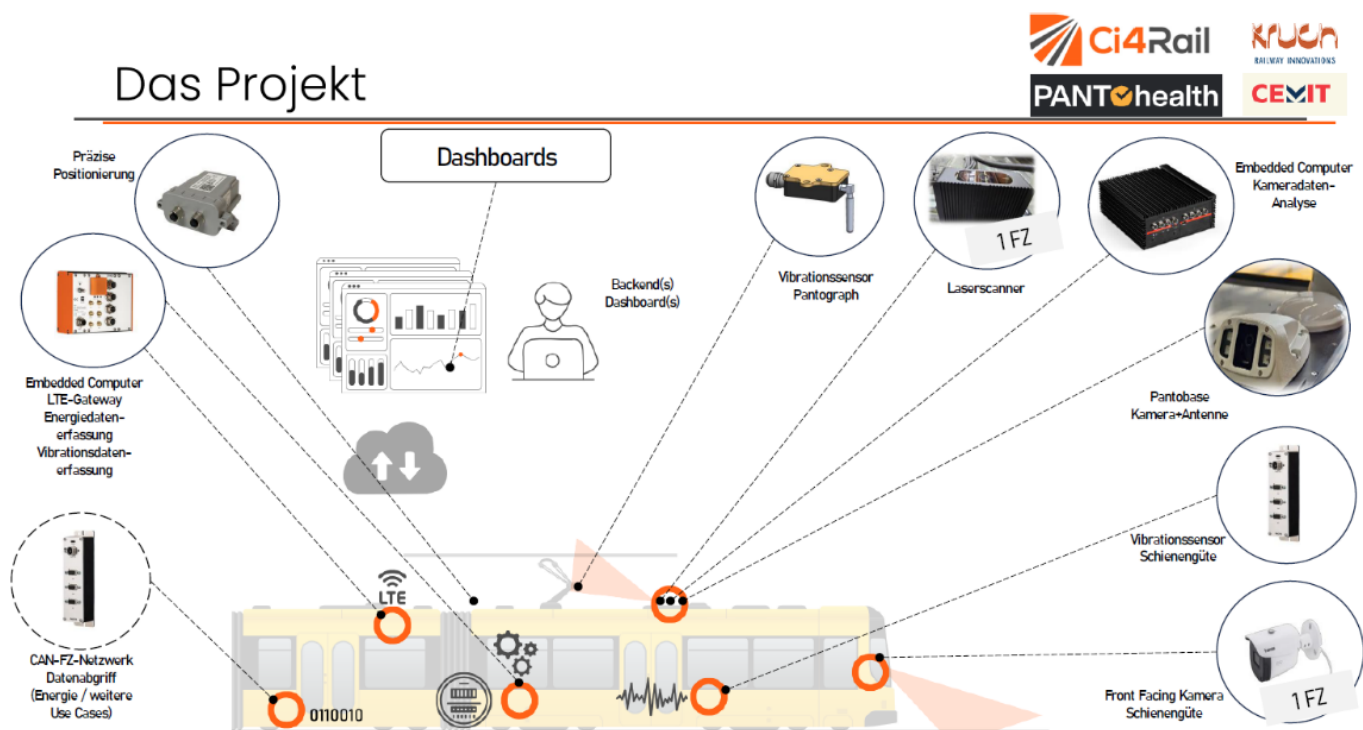


Rysunek 10: Część zainstalowanego systemu monitorowania drgań w tramwajach (PantoHealth).

## Wymagane zasoby

Realizacja wymagała systemów czujnikowych, infrastruktury przetwarzania danych i oprogramowania analitycznego, a także koordynacji między operatorem, dostawcami technologii i partnerami

projektu. Dodatkowe działania obejmowały szkolenie personelu, włączenie do przepływów pracy oraz zgodność ze standardami kolejowymi i procedurami certyfikacji dla zastosowań w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.



Rysunek 11: Przegląd architektury monitorowania utrzymania predykcyjnego wdrożonej w pilotażu Lipsk.

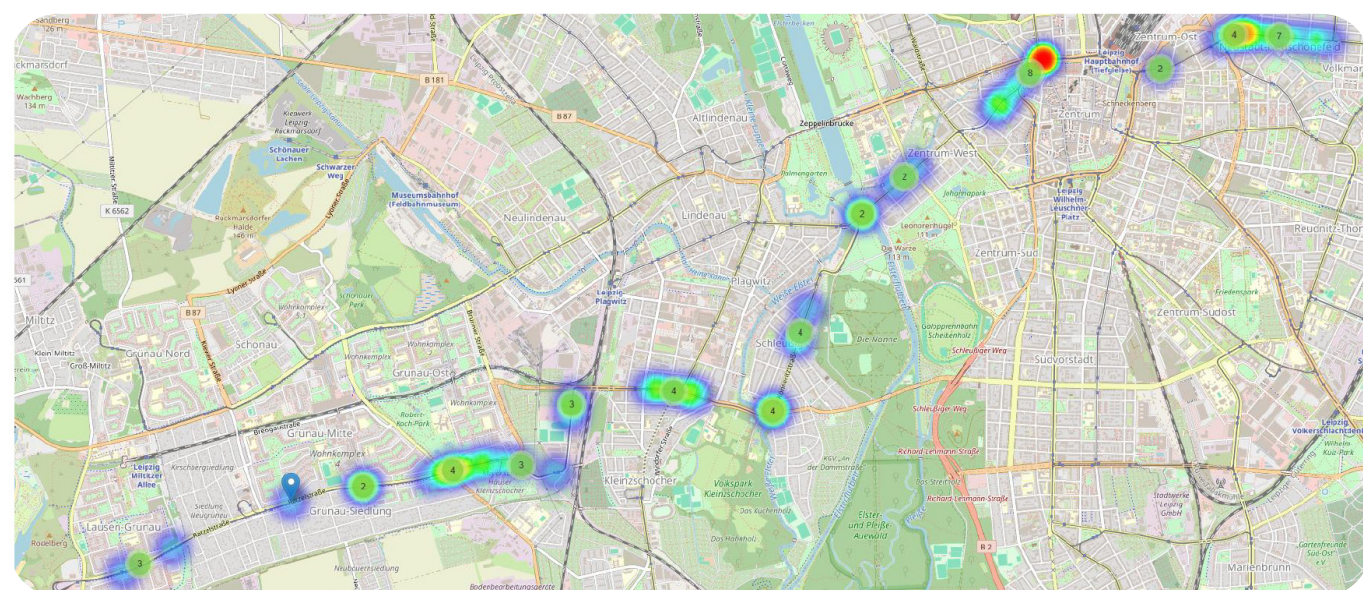
## Dowody sukcesu

Pilotaż potwierdził, że ciągłe monitorowanie oparte na pojazdach jest wykonalne i skuteczne w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych (czerwiec 2024 - luty 2025), ponieważ umożliwia wczesne wykrywanie usterek infrastruktury.

Zidentyfikowano osiem krytycznych punktów sieci trakcyjnej, w tym dwa dostosowane izolatory sekcyjne,

oraz osiem obszarów usterek toru, w tym trzy wcześniej niewykryte pęknięte szyny; skontrolowano dziesięć lokalizacji i przeprowadzono działania korygujące.

Wyniki doprowadziły do aktualizacji planów utrzymania na odcinkach o przyspieszonym pogarszaniu stanu oraz do poprawy niezawodności danych dzięki integracji bezpośredniego interfejsu CAN-BUS do monitorowania energii.



Rysunek 12: Mapa ciepła obszarów usterek toru.

## Zidentyfikowane wyzwania

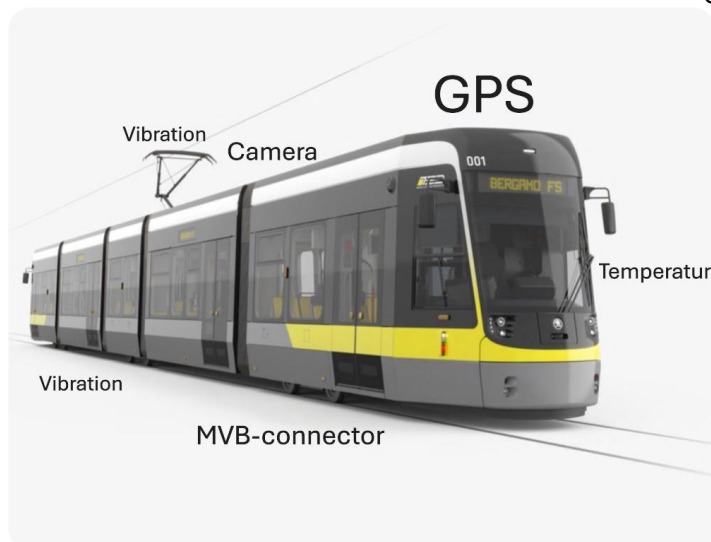
Podczas realizacji pojawiło się kilka wyzwań. Obejmowały one integrację nowych systemów czujnikowych z istniejącymi pojazdami, zapewnienie jakości i niezawodności danych oraz radzenie sobie z ograniczeniami istniejących systemów pomiaru energii. W szczególności niedokładne dane ze starszych liczników energii wymagały identyfikacji alternatywnych źródeł danych i integracji dodatkowych interfejsów w celu bezpośredniego dostępu do danych o energii pojazdu.

Wyzwania operacyjne związane z instalacją podczas bieżącej eksploatacji, koordynacją między wieloma dostawcami usług i koniecznością spełnienia rygorystycznych wymogów certyfikacji kolejowej zostały rozwiązane poprzez stopniowe wdrażanie, ścisłą koordynację i iteracyjne testowanie.

### 3.2.2. Pilotaż P.2: Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcijnemu (Bergamo, Włochy)

#### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten koncentruje się na utrzymaniu predykcijnym infrastruktury tramwajowej i taboru z wykorzystaniem cyfrowego monitorowania stanu i narzędzi symulacyjnych. Pilotaż, przeprowadzony przez Azienda Trasporti Bergamo (ATB) we współpracy z KRUCH Railway Innovations, ma na celu poprawę niezawodności infrastruktury i optymalizację zużycia energii w sieci.



Rysunek 13: System czujnikowy monitoringu i cyfrowe narzędzie symulacyjne zastosowane w pilotażu utrzymania predykcijnego w Bergamo.

#### Wymagane zasoby

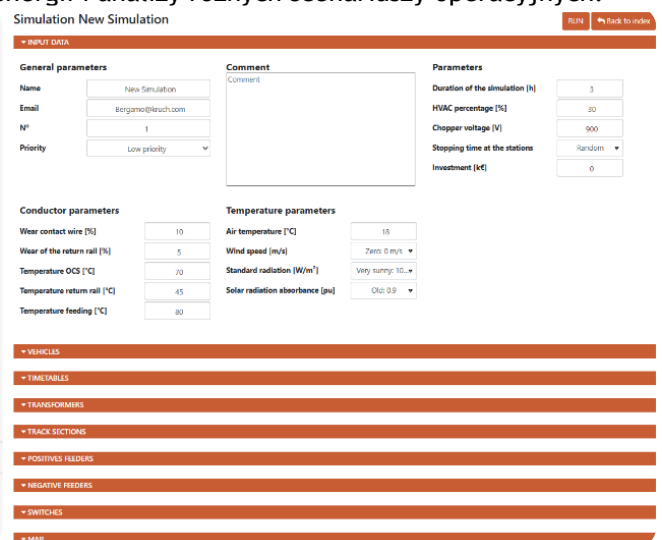
Realizacja wymagała modułowych systemów czujnikowych, pokładowych jednostek obliczeniowych, infrastruktury komunikacyjnej i narzędzi do analizy danych. Ponadto opracowano środowisko symulacyjne oparte na MATLAB i SIMULINK/SimPowerSystems do

## Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż wykazuje duży potencjał transferowy dzięki modułowemu podejściu i wykorzystaniu pojazdów jako platform monitoringu, co umożliwia skalowalne wdrażanie bez konieczności stosowania dedykowanego sprzętu inspekcyjnego.

Kluczowe doświadczenia obejmują znaczenie jakości danych, stopniowego wdrażania i integracji analityki z procesami utrzymania. Podejście wspiera zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiając wczesną interwencję, wydłużanie okresu użytkowania aktywów i poprawę efektywnego wykorzystania zasobów.

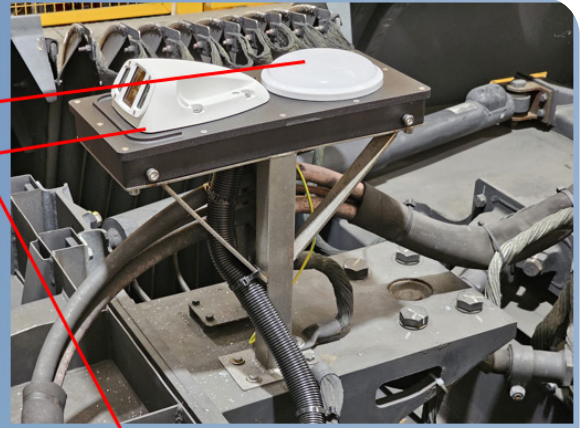
Pojazd tramwajowy w codziennej eksploatacji został wyposażony w modułowy system czujnikowy, obejmujący moduły GNSS, akcelerometry, kamery, interfejsy CAN-bus i pokładowe urządzenia brzegowe. System umożliwia ciągłe monitorowanie interakcji między pantografem a siecią trakcyjną oraz gromadzenie danych w czasie rzeczywistym. Równolegle opracowano cyfrowego bliźniaka systemu zasilania tramwajowego do symulacji przepływów energii i analizy różnych scenariuszy operacyjnych.



modelowania sieci tramwajowej i jej elektroenergetycznego systemu zasilania. Pilotaż wymagał również koordynacji między ATB, KRUCH i innymi interesariuszami, w tym kalibracji systemu, szkolenia personelu oraz integracji z procesami utrzymania i zarządzania aktywami.

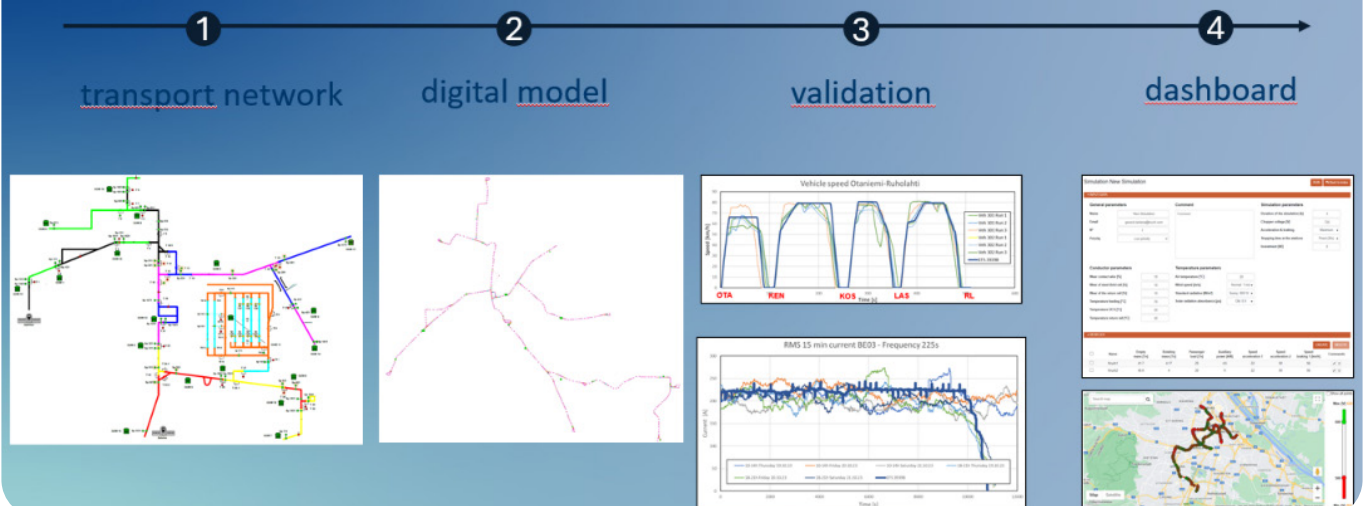
KRUCH «On November 5, we installed the sensors and on-board computer on the tram and its pantograph:

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



Rysunek 14: System czujnikowy zainstalowany na pantografie tramwaju do monitorowania interakcji między pojazdem a siecią trakcyjną.

## DEVELOPING A DIGITAL TWIN: Energy Flow Simulation



Rysunek 15: Modelowanie cyfrowego bliźniaka i symulacja przepływów energii do analizy scenariuszy operacyjnych i energetycznych w sieci tramwajowej Bergamo.

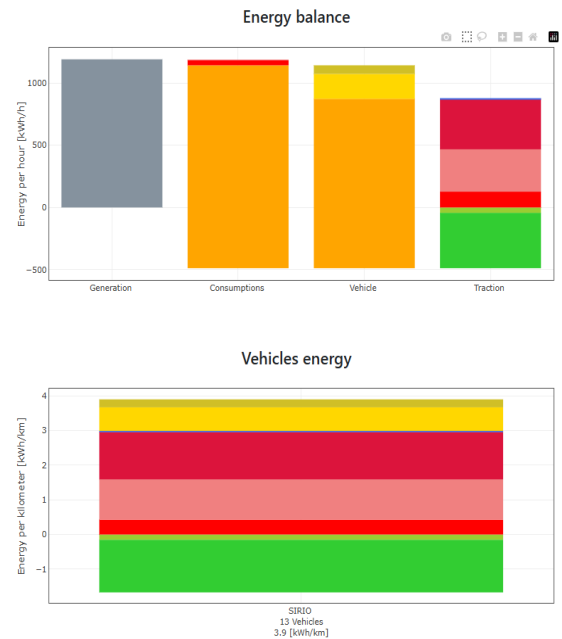
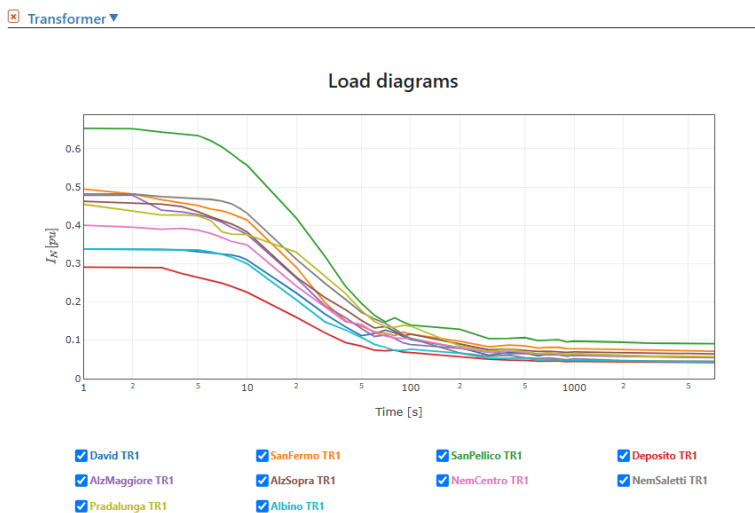
## Dowody sukcesu

Pilotaż potwierdził, że połączenie monitorowania w czasie rzeczywistym i symulacji wspiera utrzymanie predykcyjne i optymalizację energii. System monitoringu został zainstalowany w tramwaju nr 004, kursującym na linii T1, i umożliwia ciągłe gromadzenie danych co 1-3 sekundy, w tym parametrów położenia, prędkości i zużycia energii.

System wykrył nieprawidłowe interakcje między pantografem a siecią trakcyjną oraz zidentyfikował

lokalizacje o zwiększonym ryzyku zużycia. Równolegle opracowano cyfrowego bliźniaka sieci tramwajowej, wykorzystanego do symulacji wielu scenariuszy operacyjnych, analizy zużycia energii, potencjału rekuperacji i działania systemu.

Pilotaż ogólnie wykazał, że integracja danych monitoringowych z narzędziami symulacyjnymi poprawia podejmowanie decyzji i wspiera bardziej efektywne zarządzanie infrastrukturą i energią.



Rysunek 16: Wyniki symulacji przepływów energii do analizy obciążeń transformatorów i optymalizacji zużycia energii w systemie tramwajowym Bergamo.

## Zidentyfikowane wyzwania

Wyzwania obejmowały integrację systemów czujnikowych z istniejącymi pojazdami oraz zapewnienie niezawodnego przesyłu danych w środowisku miejskim. W celu poprawy dokładności czujników i stabilności komunikacji konieczne były korekty kalibracji i konfiguracji.

Dodatkową złożoność wniosła integracja danych monitoringowych z rzeczywistego środowiska z modelami symulacyjnymi, co wymagało ciągłej walidacji i koordynacji między partnerami projektu.

## Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż wykazuje duży potencjał transferowy, szczególnie dla małych i średnich systemów tramwajowych. Modułowa konstrukcja monitoringu oraz rozdzielenie zbierania danych, analizy i symulacji umożliwiają elastyczne zastosowanie w różnych sieciach.

Kluczowe doświadczenia obejmują znaczenie wstępnego testowania systemów modułowych, łączenia monitoringu z symulacją oraz zapewnienia ścisłej współpracy między operatorami a dostawcami technologii. Podejście wspiera zasady gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez wydłużanie okresu użytkowania aktywów i poprawę efektywnego wykorzystania zasobów na poziomie systemowym.

### 3.2.3. Rozwiązanie S.3: Moduły utrzymania predykcyjnego infrastruktury i taboru

#### Krótki opis rozwiązania

Rozwiązanie to zapewnia modułowe ramy utrzymania predykcyjnego infrastruktury transportu publicznego i taboru na podstawie ciągłego monitorowania stanu realizowanego za pomocą pojazdów. Opiera się na wdrożeniach pilotażowych w Lipsku i Bergamo i łączy monitoring infrastruktury, analizę danych energetycznych oraz symulację w jedno przenoszalne

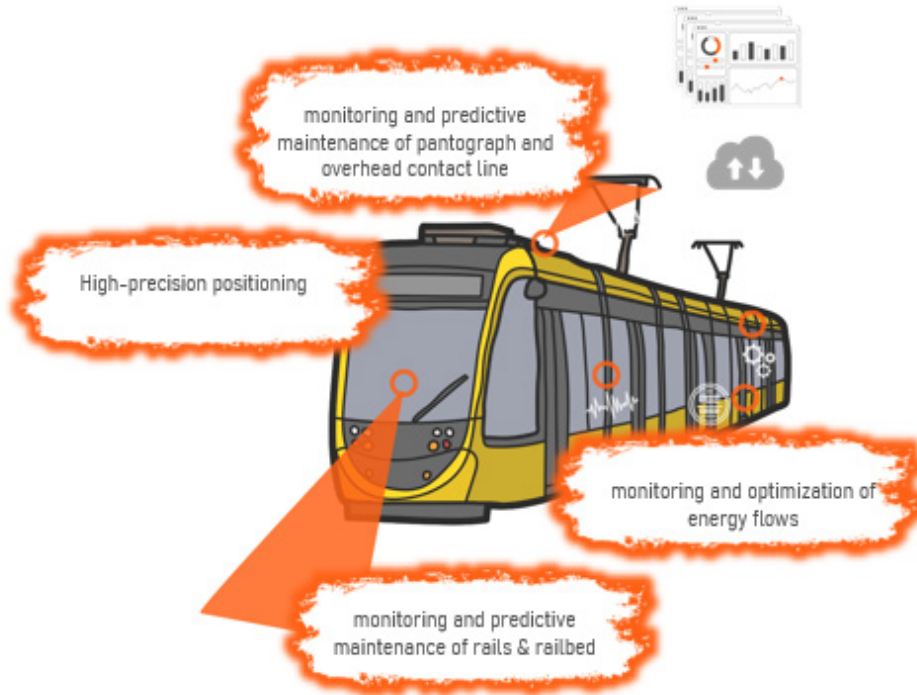
podejście.

Rozwiązanie wspiera przejście od utrzymania reaktywnego i planowanego w czasie do zarządzania aktywami opartego na danych, co umożliwia wcześniejsze wykrywanie usterek, bardziej ukierunkowane interwencje i większą niezawodność operacyjną.

## Cele rozwiązania

Celem rozwiązania jest umożliwienie ciągłego monitorowania stanu infrastruktury i pojazdów, wykrywania usterek na wczesnym etapie oraz wspierania terminowych działań utrzymaniowych.

Poprzez poprawę dostępności danych i procesów decyzyjnych rozwiązanie przyczynia się do wydłużania okresu użytkowania aktywów, ograniczania napraw materiałochłonnych oraz zwiększania ogólnej efektywności wykorzystania zasobów.



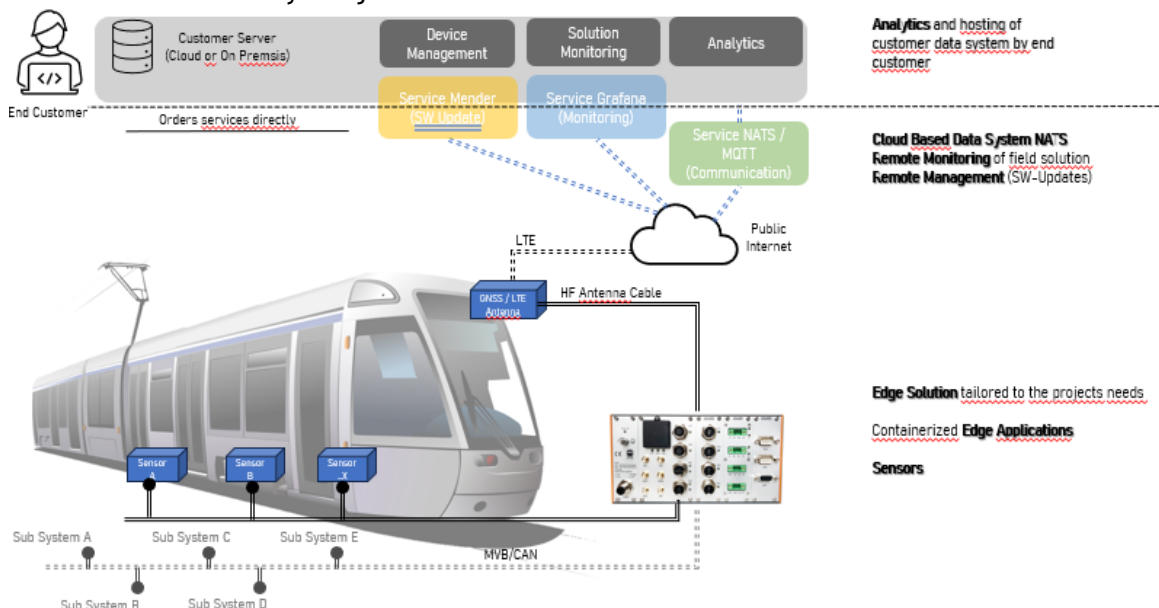
Rysunek 17: Zakres zastosowania utrzymania predykcyjnego w systemach transportu publicznego.

## Podstawowa koncepcja rozwiązania

Rozwiązanie opiera się na modułowym łańcuchu monitorowania, który włącza gromadzenie danych, ich przetwarzanie i wsparcie decyzji do istniejących przepływów pracy w utrzymaniu. Czujniki i systemy monitoringu zainstalowane na pojazdach gromadzą dane podczas regularnej eksploatacji, które są następnie przetwarzane i analizowane w celu wykrywania anomalii oraz identyfikacji wzorców

degradacji.

Wyniki są georeferencyjnie integrowane z systemami zarządzania aktywami i wizualizowane za pośrednictwem pulpitów, co wspiera priorytetyzację działań utrzymaniowych. System działa jako ciągła pętla łącząca wykrywanie, walidację i interwencje, umożliwiając utrzymanie predykcyjne oparte na stanie.



Rysunek 18: Kompleksowa architektura systemu utrzymania predykcyjnego - od pozyskiwania danych po analitykę i monitoring.

## Wnioski z realizacji

Realizacja pokazała, że jakość danych, stabilne strumienie danych i integracja systemów są kluczowe dla uzyskania użytecznych rezultatów. Automatyczne wykrywanie wymaga walidacji poprzez inspekcje terenowe, a modułowa architektura umożliwia elastyczne wdrażanie w różnych systemach.

Ważna jest również gotowość organizacyjna, ponieważ utrzymanie predykcje wprowadza nowe przepływy pracy i role, a jego wartość rośnie, gdy zostaje zintegrowane z istniejącymi procesami zarządzania aktywami i planowania.

## Potencjał transferowy

Rozwiązanie wykazuje duży potencjał transferowy dla operatorów zarządzających infrastrukturą torową i

taborem. Modułowe podejście umożliwia stopniową realizację i dostosowanie do różnych sieci, typów pojazdów i środowisk organizacyjnych.

Umożliwiając wczesną interwencję i zarządzanie aktywami ukierunkowane na cykl życia, rozwiązanie wspiera zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, w szczególności wydłużanie okresu użytkowania aktywów i poprawę efektywnego wykorzystania zasobów.

Rozwiązanie przede wszystkim przyczynia się do fazy **EXTEND - utrzymanie i naprawy** - ponieważ umożliwia wczesną interwencję i wydłuża okres użytkowania aktywów.

## 3.2.4. Pilotaż P.4: Symulacja zelektryfikowanych korytarzy transportu publicznego i przepływów energii (Gdynia, Polska)

### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten koncentruje się na wykorzystaniu cyfrowych narzędzi modelowania i symulacji do wspierania cyrkularnego i zasobooszczędnego planowania elektryfikacji w systemach transportu publicznego. W Gdyni został zrealizowany przez operatora transportu publicznego PKA Gdynia we współpracy z Uniwersytetem Gdańskim (UG) i partnerem technologicznym Kruch Railway Innovations, a jego celem jest umożliwienie podejmowania decyzji opartych na danych dotyczących

inwestycji infrastrukturalnych, technologii pojazdów i strategii operacyjnych.

Za pomocą narzędzia Symulacja przepływów energii (EFS) opracowano cyfrowego bliźniaka Korytarza Zachodniego. Model uwzględnia dane operacyjne, takie jak charakterystyki taboru, częstotliwości kursowania i zużycie energii, co umożliwia symulację różnych scenariuszy elektryfikacji, w tym autobusów bateryjnych, trolejbusów z ładowaniem podczas jazdy (IMC) oraz konfiguracji hybrydowych.



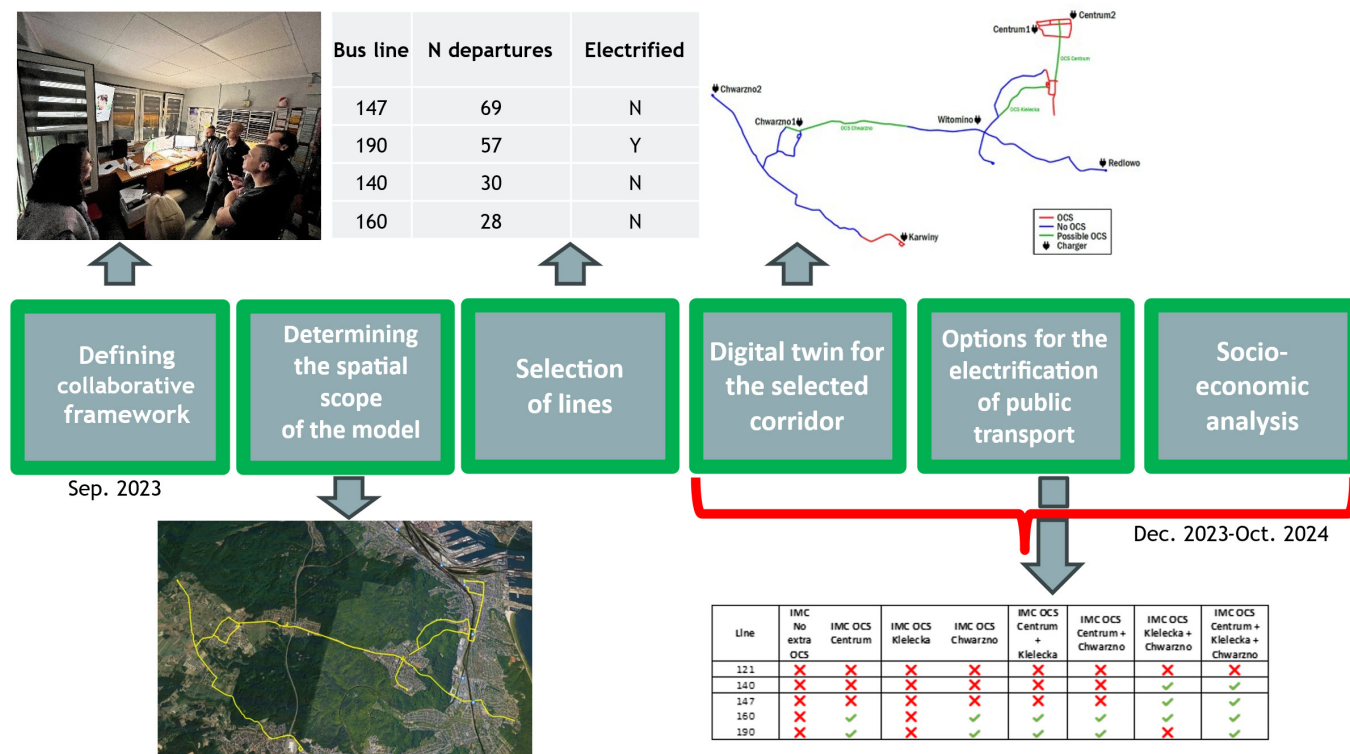
Rysunek 19: Układ przestrzenny Korytarza Zachodniego w Gdyni.

## Wymagane zasoby

Pilotaż wymagał narzędzi modelowania, danych operacyjnych oraz ścisłej współpracy między operatorami transportu, badaczami i dostawcami technologii. Kluczowe zasoby obejmowały środowisko symulacyjne EFS oraz szczegółowe dane wejściowe, takie jak rozkłady jazdy pojazdów, parametry zużycia

energii i warunki ruchu.

Koordinacja instytucjonalna miała zasadnicze znaczenie dla zapewnienia realistycznych założeń modelowych i walidacji wyników, w tym zaangażowania operatora, władz miejskich i interesariuszy infrastrukturalnych.



Rysunek 20: Proces opracowania modelu Symulacji przepływów energii (EFS) dla cyfrowego bliźniaka Gdyni.

## Dowody sukcesu

Pilotaż pokazał, że symulacja cyfrowa może skutecznie wspierać planowanie elektryfikacji i optymalizację infrastruktury. Cyfrowy bliźniak korytarza został z powodzeniem opracowany i zwalidowany z wykorzystaniem rzeczywistych danych operacyjnych linii autobusowej 190.

Zasymulowano ponad 110 scenariuszy elektryfikacji, porównując autobusy bateryjne, trolejbusy IMC i

podejścia hybrydowe. Analiza wykazała, że eksploatacja IMC wymaga ukierunkowanej rozbudowy infrastruktury, podczas gdy niektóre linie, takie jak linia 190, mogą funkcjonować bez dodatkowej infrastruktury napowietrznej.

Wyniki pokazały również, że eksploatacja autobusów bateryjnych może wymagać większej liczby pojazdów w porównaniu z rozwiązaniami IMC, oraz potwierdziły, że warunki ruchu mają istotny wpływ na zużycie energii, zapotrzebowanie na pojazdy i koszty systemu.

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

Rysunek 21: Przykład wyników symulacji porównujących różne scenariusze elektryfikacji i pokazujących bilans energetyczny pojazdu oraz wykonalność stanu naładowania po 10 godzinach eksploatacji.

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

Rysunek 22: Porównanie scenariuszy elektryfikacji pokazujące wykonalność operacyjną różnych technologii pojazdów i konfiguracji infrastruktury.

## Zidentyfikowane wyzwania

Wyzwania były związane głównie z integracją danych i modelowaniem. Dane operacyjne z różnych źródeł (ruch, eksploatacja i energia) musiały zostać zharmonizowane, co początkowo spowolniło proces modelowania.

Dodatkowa złożoność pojawiła się przy modelowaniu degradacji baterii i wydajności w cyklu życia oraz przy dokładnym odwzorowaniu warunków ruchu, co wymagało iteracyjnej kalibracji modelu i uwzględnienia takich elementów jak sygnalizacja świetlna.

Wyzwania te rozwiązano poprzez iteracyjne doskonalenie modelu i walidację z wykorzystaniem danych z rzeczywistego środowiska.

## Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż wykazuje duży potencjał transferowy dla miast planujących elektryfikację systemów transportu publicznego. Podejście cyfrowego bliźniaka umożliwia porównanie wielu scenariuszy przed podjęciem decyzji inwestycyjnych dotyczących infrastruktury oraz wspiera bardziej efektywne i świadome podejmowanie decyzji.

Modułowa struktura podejścia umożliwia dostosowanie do różnych kontekstów miejskich, pod warunkiem dostępności wystarczających danych operacyjnych. Podejście wspiera cyrkularne planowanie poprzez optymalizację wykorzystania zasobów, ograniczenie niepotrzebnych inwestycji i poprawę efektywności systemu.

## 3.2.5. Rozwiązanie S.4: Narzędzie do cyrkularnego planowania biznesowego zelektryfikowanego taboru i infrastruktury transportu publicznego

### Krótki opis rozwiązania

Rozwiązanie to zapewnia ustrukturyzowane narzędzie planistyczne wspierające operatorów i organizatorów transportu publicznego w projektowaniu i porównywaniu scenariuszy elektryfikacji z wykorzystaniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Opiera się na pilotażu w Gdyni, gdzie modelowanie cyfrowego bliźniaka i symulacje przepływów energii wykorzystano do oceny różnych strategii elektryfikacji. Rozwiązanie przenosi te doświadczenia do przenoszalnych ram opartych na KPI, które łączą cele cyrkularne z praktycznym planowaniem i decyzjami inwestycyjnymi.

### Cele rozwiązania

Celem rozwiązania jest wspieranie planowania zelektryfikowanych systemów transportu publicznego opartego na dowodach oraz poprawa spójności oceny scenariuszy. Przekładając cele gospodarki o obiegu zamkniętym na mierzalne wskaźniki, umożliwia porównywanie opcji elektryfikacji, zwiększa przejrzystość założeń i wspiera integrację planowania taboru, infrastruktury i energii.

### Podstawowa koncepcja rozwiązania

Rozwiązanie opiera się na przepływie pracy planistycznej sterowanym KPI, wspieranym przez ustrukturyzowany proces wyboru i konfiguracji. Umożliwia użytkownikom określenie odpowiednich wskaźników, zdefiniowanie celów i porównanie różnych scenariuszy elektryfikacji z wykorzystaniem spójnych ram.

Podejście traktuje tabor, infrastrukturę i systemy energetyczne jako zintegrowany obszar planowania oraz łączy parametry techniczne, zużycie energii i wyniki cyrkularności w celu wspierania świadomego podejmowania decyzji.

W praktyce narzędzie wspiera uporządkowany przepływ pracy:

**wybór** → **konfiguracja** → **analiza scenariuszy** → **porównanie** → **wsparcie decyzji**

Rozwiązanie traktuje tabor, infrastrukturę i systemy energetyczne jako jednolity obszar planowania, w którym energia działa jako systemowy kręgosłup wpływający na wydajność, koszty i wyniki cyrkularności.

### Wnioski z realizacji

Realizacja pokazała, że dostępność i jakość danych mają kluczowe znaczenie i często wymagają łączenia wielu źródeł. Dla spójnego stosowania niezbędne są standaryzowane definicje KPI oraz jasne zarządzanie, obejmujące własność danych i procedury aktualizacji.

Zalecane jest podejście stopniowe, rozpoczynające się od podstawowego zestawu KPI i rozszerzające się z czasem, przy jednoczesnym zapewnieniu zgodności z istniejącymi procesami planowania i raportowania.

### Potencjał transferowy

Rozwiązanie wykazuje duży potencjał transferowy dla operatorów transportu publicznego planujących elektryfikację taboru. Może być stosowane w różnych

typach systemów i dostosowywane do warunków lokalnych, w tym miks energetycznego, ograniczeń infrastrukturalnych i wymagań operacyjnych.

Wspierając spójne porównywanie scenariuszy i planowanie ukierunkowane na cykl życia, rozwiązanie przyczynia się do bardziej efektywnego wykorzystania

zasobów i świadomych decyzji inwestycyjnych.

Rozwiązanie przede wszystkim przyczynia się do fazy **AVOID - planowanie wyprzedzające i optymalizacja systemu** - ponieważ umożliwia bardziej świadome i spójne podejmowanie decyzji.

### 3.3. Działanie A.3: Opracowanie rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego

Działanie to koncentruje się na wydłużaniu cyklu życia komponentów infrastruktury transportu publicznego i aktywów energetycznych poprzez podejścia ponownego użycia i zmiany przeznaczenia. Odnosi zasady gospodarki o obiegu zamkniętym do poziomu infrastruktury, analizując, w jaki sposób istniejące komponenty i materiały mogą pozostać w użyciu także po zakończeniu ich pierwotnego kontekstu operacyjnego.

W ramach tego działania przeprowadzono dwa pilotaże. W Segedynie pilotaż badał wykonalność ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych w celu wydłużenia okresu użytkowania krytycznych komponentów infrastruktury i ograniczenia odpadów materiałowych. W Mariborze

pilotaż analizował zmianę przeznaczenia baterii trakcyjnych z drugiego życia na stacjonarny magazyn energii wspierający infrastrukturę ładowania autobusów elektrycznych.

Łącznie pilotaże te pokazują praktyczne podejścia do zachowania wartości wbudowanej w infrastrukturę transportu publicznego i powiązane aktywa, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia zasobów i wspieraniu bardziej cyrkularnych praktyk zarządzania aktywami. Doświadczenia zebrane podczas tych pilotaży stanowią podstawę do opracowania przenoszalnych rozwiązań przedstawionych w kolejnych rozdziałach.

#### 3.3.1. Pilotaż P.5: Ponowne użycie zwrotnic trolejbusowych (Szeged, Węgry)

##### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten koncentruje się na praktycznym zastosowaniu zasad gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez ponowne użycie komponentów infrastruktury trolejbusowej. Pilotaż, przeprowadzony przez SZKT (przedsiębiorstwo transportowe w Segedynie), pokazuje, w jaki sposób komponenty, które nie są już optymalne do intensywnej eksploatacji, można ponownie wykorzystać w częściach

systemu o mniejszym obciążeniu operacyjnym.

W ramach pilotażu cztery szybkie napowietrzne zwrotnice z sieci operacyjnej, pierwotnie zainstalowane w latach 2005-2014, zostały zastąpione nowym wyposażeniem, a następnie ponownie wykorzystane w zajezdni. Podejście to wydłużyło okres użytkowania istniejących komponentów oraz poprawiło niezawodność infrastruktury sieciowej i zajezdniowej.



Rysunek 23: Napowietrzna zwrotnica trolejbusowa używana w sieci w Segedynie.

## Wymagane zasoby

Pilotaż wymagał stosunkowo ograniczonych zasobów technicznych, ponieważ prace obejmowały głównie wymianę i relokację istniejących komponentów infrastruktury w obrębie systemu trolejbusowego. Realizacja opierała się na wewnętrznych zasobach

SZKT, w tym zespołach utrzymania infrastruktury, służbach ruchu i jednostkach logistycznych. Niezbędna była koordynacja związana z zarządzaniem pracami instalacyjnymi i tymczasowymi zmianami w eksploatacji, a także współpraca z lokalnymi władzami przy krótkotrwałych ingerencjach drogowych.



Rysunek 24: Instalacja zwrotnicy trolejbusowej przez zespół utrzymania SZKT.

## Dowody sukcesu

Pilotaż skutecznie wykazał, że ponowne użycie komponentów infrastruktury może poprawiać niezawodność, a jednocześnie ograniczać potrzeby inwestycyjne. W głównej sieci zainstalowano cztery nowe zwrotnice, a cztery ponownie wykorzystane zwrotnice zamontowano w zajezdni, poprawiając funkcjonowanie infrastruktury w ośmiu lokalizacjach.

Wymiana ograniczyła awarie na odcinkach o wysokiej częstotliwości ruchu i wyeliminowała problemy z przestarzałymi zwrotnicami zajezdniowymi, jednocześnie zapobiegając niepotrzebnemu zamawianiu dodatkowego wyposażenia i zmniejszając ilość odpadów materiałowych.

Pilotaż z powodzeniem pokazał, że cyrkularne ponowne użycie komponentów infrastruktury może poprawić niezawodność operacyjną, a jednocześnie ograniczyć potrzeby inwestycyjne. Kluczowe wyniki osiągnięte podczas realizacji obejmują:

## Zidentyfikowane wyzwania

Wyzwania dotyczyły głównie koordynacji i integracji z istniejącym systemem infrastrukturalnym. Różnice w elementach wsporczych, takich jak słupy i fundamenty, wymagały dostosowań podczas instalacji. Dodatkowe wysiłki były potrzebne do organizacji tymczasowych zmian w ruchu i zapewnienia bezpiecznej integracji ponownie użytych komponentów z systemem.

## Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż pokazuje proste i przenoszalne podejście cyrkularne, możliwe do zastosowania w wielu systemach transportu publicznego. Komponenty infrastruktury usuwane z odcinków sieci o wysokiej intensywności można często ponownie wykorzystać w środowiskach o niższym obciążeniu, takich jak zajezdnie.

Dzięki systematycznej identyfikacji takich możliwości operatorzy mogą wydłużać okres użytkowania aktywów, ograniczać koszty inwestycyjne i zmniejszać odpady materiałowe, wspierając w ten sposób bardziej efektywne i cyrkularne zarządzanie infrastrukturą.

### 3.3.2. Rozwiązanie S.5: Określenie kryteriów wdrażania ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych

#### Krótki opis rozwiązania

Rozwiązanie to zapewnia przenoszalne ramy dla cyrkularnego ponownego użycia napowietrznych zwrotnic trolejbusowych w systemach transportu publicznego. Opiera się na doświadczeniach z pilotażu w Segedynie i przekłada podejście praktyczne na zestaw kryteriów wdrożeniowych, z których mogą korzystać inni operatorzy.

Rozwiązanie wprowadza kaskadowy model ponownego użycia, w którym komponenty infrastruktury usuwane z odcinków sieci o wysokiej intensywności są ponownie wykorzystywane w lokalizacjach o mniejszym obciążeniu operacyjnym, takich jak zajezdnie. Podejście to wydłuża okres użytkowania aktywów, ogranicza odpady i poprawia efektywność kosztową odnowy infrastruktury.

#### Cele rozwiązania

Celem rozwiązania jest wspieranie operatorów transportu publicznego we wdrażaniu praktyk cyrkularnego zarządzania infrastrukturą.

Koncentruje się ono na wydłużaniu operacyjnego okresu użytkowania komponentów infrastruktury, ograniczaniu zużycia materiałów, poprawie efektywności inwestycyjnej oraz utrzymaniu niezawodności i bezpieczeństwa dzięki ustrukturyzowanym podejściom do ponownego użycia.

#### Podstawowa koncepcja rozwiązania

Rozwiązanie opiera się na dopasowywaniu komponentów infrastruktury do różnych poziomów intensywności operacyjnej w sieci. Komponenty usunięte z odcinków sieci o dużej częstotliwości mogą już nie spełniać rygorystycznych wymagań niezawodności, ale nadal mogą skutecznie działać w środowiskach o niższym obciążeniu,

takich jak zajezdnie. Prowadzi to do dwustopniowego podejścia infrastrukturalnego, które rozróżnia obszary intensywnej eksploatacji i mniej intensywne środowiska serwisowe. Poprzez dopasowanie stanu komponentów do wymagań operacyjnych operatorzy mogą wydłużać okres użytkowania aktywów przy zachowaniu efektywności systemu.

#### Wnioski z realizacji

Realizacja pokazuje, że skuteczne ponowne użycie zależy od odpowiedniej oceny stanu i kompatybilności z istniejącymi elementami infrastruktury, takimi jak słupy, okablowanie i fundamenty. Podczas instalacji niezbędna jest skuteczna koordynacja między utrzymaniem a eksploatacją, a dla upowszechnienia podejścia kluczowe są systematyczna identyfikacja i monitorowanie komponentów nadających się do ponownego użycia.

#### Potencjał transferowy

Rozwiązanie wykazuje duży potencjał transferowy dla operatorów zarządzających infrastrukturą trolejbusową lub tramwajową. Podobne warunki występują w wielu systemach, w których infrastruktura w sieciach i zajezdniach funkcjonuje przy różnych poziomach intensywności.

Włączając intensywność operacyjną do zarządzania aktywami, operatorzy mogą systematycznie identyfikować możliwości ponownego użycia, ograniczać koszty i wydłużać cykl życia infrastruktury, wspierając tym samym zasady gospodarki o obiegu zamkniętym.

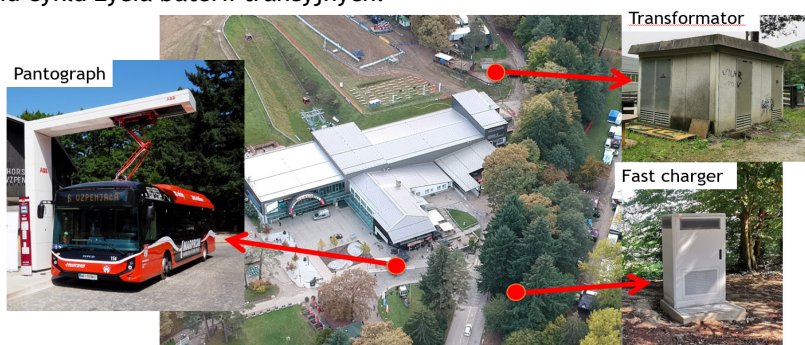
Rozwiązanie to przyczynia się zatem do fazy **EXTEND - ponowne użycie** - w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym w zarządzaniu infrastrukturą transportu publicznego.

### 3.3.3. Pilotaż P.6: Wykorzystanie baterii trakcyjnych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu energii do szybkiego ładowania z energii odnawialnej (Maribor, Słowenia)

#### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten bada wykorzystanie baterii litowo-jonowych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu energii wspierającego infrastrukturę ładowania autobusów elektrycznych. Został zrealizowany przez miasto Maribor przy wsparciu Uniwersytetu w Mariborze i koncentruje się na poprawie efektywności energetycznej przy jednoczesnym wydłużeniu cyklu życia baterii trakcyjnych.

Na końcowym przystanku Vzpenjača szybka ładowarka 150 kW obsługuje elektryczną linię autobusową G6 kursującą na trasie o długości 7,7 km z częstymi krótkimi ładowaniami. Aby zoptymalizować wykorzystanie energii, do infrastruktury ładowania włączono baterijny magazyn energii (BESS) oparty na bateriach z drugiego życia, działający jako bufor między siecią, odnawialnymi źródłami energii i zapotrzebowaniem na ładowanie.



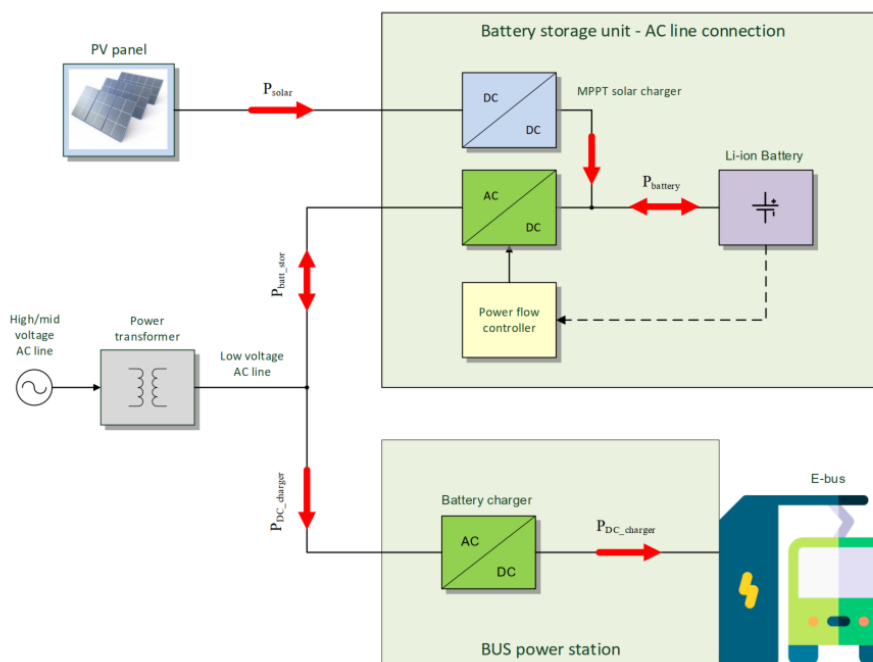
Rysunek 25: Istniejąca infrastruktura ładowania na stacji Vzpenjača.

## Wymagane zasoby

Pilotaż wymagał integracji magazynu energii z baterii z drugiego życia o pojemności 136 kWh wraz z hybrydowym przekształtnikiem 80 kW i połączeniem z istniejącą szybką ładowarką prądu stałego 150 kW. System obejmował również komponenty nadzoru i sterowania oraz niewielką instalację fotowoltaiczną. BESS jest podłączony w **równoległej konfiguracji**

hybrydowej, która podczas ładowania autobusu umożliwia jednocześnie zasilanie z sieci i magazynu.

Realizacja wymagała koordynacji między władzami miejskimi, partnerami badawczymi i dostawcami technicznymi oraz zgodności z wymogami bezpieczeństwa i regulacjami dotyczącymi systemów bateryjnych.



Rysunek 26: Schemat techniczny równoległej konfiguracji integracji BESS. Źródło: Uniwersytet w Mariborze.

## Dowody sukcesu

Pilotaż potwierdził techniczną wykonalność integracji baterii z drugiego życia z infrastrukturą ładowania. System wspiera roczne zapotrzebowanie na ładowanie wynoszące około 145 000 kWh, przy dziennym zużyciu około 400 kWh i szczytach do 650 kWh, a pojedyncze ładowania trwają około 5 minut przy transferze energii rzędu 8-14 kWh.

BESS umożliwił ograniczenie obciążenia szczytowego o około 25 kW i zademonstrował hybrydowe działanie między siecią a magazynem. Integracja produkcji fotowoltaicznej dodatkowo zwiększyła elastyczność energetyczną i zmniejszyła zależność od sieci.

Pilotaż ogólnie wykazał, że magazyn energii oparty na bateriach z drugiego życia może poprawić zarządzanie energią i wydłużyć cykle życia baterii w systemach transportu publicznego.



- Solar Panel (10 pcs. Array)**  
350W Monocrystalline
- $V_{mp}$ : 36,11V
  - $I_{mp}$ : 9,69A
  - $V_{oc}$ : 44,05V
  - $I_{sc}$ : 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

Rysunek 27: Kluczowe komponenty systemu BESS: panele PV, przekształtnik i pakiet baterii z drugiego życia.

## Zidentyfikowane wyzwania

Wyzwania obejmowały ograniczoną standaryzację integracji baterii z drugiego życia, kompatybilność między modułami bateryjnymi i systemami przekształtnikowymi oraz zapewnienie stabilności termicznej i bezpieczeństwa pożarowego.

Dodatkowe kwestie związane z pozyskaniem odpowiednich baterii, wymogami regulacyjnymi i ograniczonym doświadczeniem rynkowym zostały rozwiązane dzięki starannemu projektowi systemu i współpracy z wyspecjalizowanymi ekspertami.

### 3.3.4. Rozwiązanie S.6: Przenoszalne modele biznesowe wykorzystania baterii trakcyjnych z drugiego życia

#### Krótki opis rozwiązania

Rozwiązanie to zapewnia przenoszalne ramy wykorzystania baterii trakcyjnych z drugiego życia jako stacjonarnego magazynu energii w infrastrukturze ładowania transportu publicznego. Opiera się na pilotażu w Mariborze i przekłada jego doświadczenia techniczne i operacyjne na modele biznesowe oraz warunki wdrożeniowe możliwe do zastosowania w innych środowiskach.

Rozwiązanie wspiera zasady gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez wydłużanie cykli życia baterii przed recyklingiem, a jednocześnie poprawia zarządzanie energią, ogranicza szczytowe zapotrzebowanie na energię elektryczną i wspiera integrację odnawialnych źródeł energii.

#### Cele rozwiązania

Celem rozwiązania jest wspieranie operatorów i organizatorów transportu publicznego we wdrażaniu magazynów energii opartych na bateriach z drugiego życia jako elementu zelektryfikowanej infrastruktury transportowej.

## Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż wykazuje duży potencjał transferowy dla miast rozwijających infrastrukturę autobusów elektrycznych. Magazyny energii oparte na bateriach z drugiego życia mogą wspierać zarządzanie obciążeniami szczytowymi, poprawiać elastyczność energetyczną i umożliwić lepszą integrację odnawialnych źródeł energii.

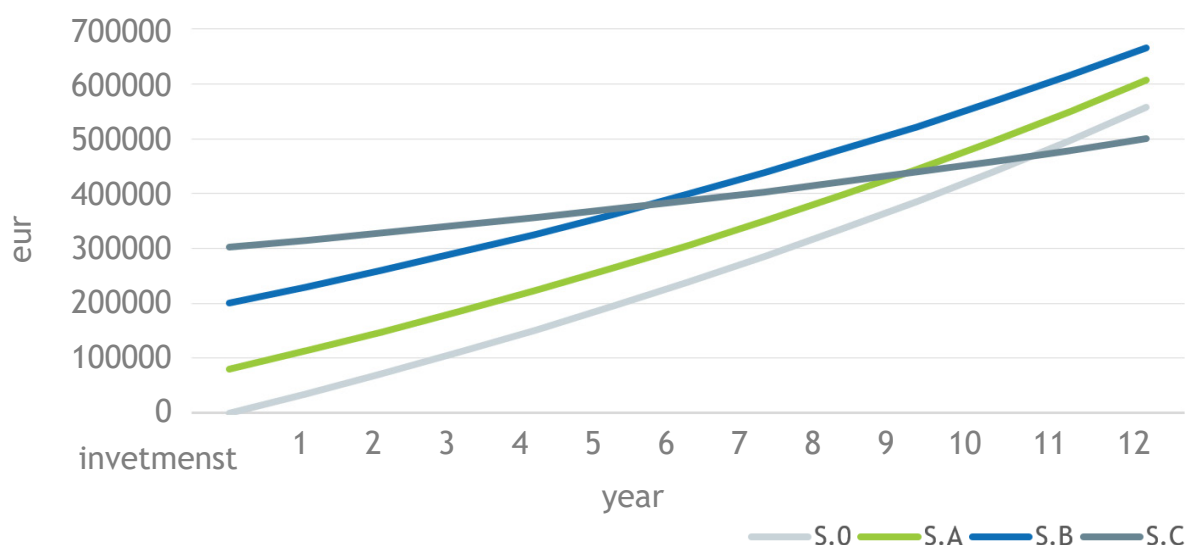
Modułowy charakter rozwiązań BESS umożliwia dostosowanie do różnych kontekstów i wspiera zasady gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez wydłużanie cykli życia baterii i poprawę efektywnego wykorzystania zasobów.

Koncentruje się ono na wydłużaniu cykli życia baterii, poprawie elastyczności ładowania, ograniczaniu obciążeń szczytowych, wspieraniu integracji odnawialnych źródeł energii i tworzeniu ekonomicznie wykonalnych podejść do wykorzystania baterii z drugiego życia.

#### Podstawowa koncepcja rozwiązania

Rozwiązanie opiera się na integracji magazynów energii z baterii z drugiego życia między siecią elektroenergetyczną, odnawialnymi źródłami energii i zapotrzebowaniem na ładowanie. W tej roli system bateryjny działa jako elastyczny interfejs energetyczny wspierający ograniczanie szczytów, przesuwanie poboru w czasie i wykorzystanie energii odnawialnej.

Jego praktyczne zastosowanie zależy od zgrania trzech wymiarów: integracji technicznej, strategii zarządzania energią oraz warunków ekonomicznych i regulacyjnych. Zamiast jednego sztywnego modelu rozwiązanie zapewnia elastyczne ramy, które można dostosować do lokalnej infrastruktury, profili obciążenia i warunków rynkowych. Samo ograniczanie szczytów zapewnia ograniczone korzyści, natomiast połączenie magazynu z optymalizacją taryfową i integracją energii odnawialnej znacząco poprawia ogólną efektywność.



Rysunek 28: Porównanie skumulowanych kosztów energii elektrycznej w różnych scenariuszach zarządzania energią.

- S.0: Stan wyjściowy (bez magazynu): pełna zależność od energii elektrycznej z sieci
- S.1: Ograniczanie szczytów: redukcja krótkotrwałych szczytów mocy przy ograniczonym zwrocie ekonomicznym
- S.2: Optymalizacja taryfowa: przesunięcie zużycia energii do okresów o niższych kosztach, co poprawia efektywność kosztową
- S.3: Integracja źródeł odnawialnych: połączenie magazynu z OZE w celu ograniczenia zależności od sieci i zwiększenia wartości długoterminowej

### Wnioski z realizacji

Realizacja pokazała, że kompatybilność między modułami bateryjnymi, systemami przekształtnikowymi i infrastrukturą ładowania jest kluczowym warunkiem sukcesu, a wymagania bezpieczeństwa i architektura systemu muszą być uwzględniane od samego początku.

Zasadność biznesowa silnie zależy od wielkości systemu, profilu obciążenia, taryf energii elektrycznej i ograniczeń sieci. Samo ograniczanie szczytów w

małej skali daje ograniczony zwrot, natomiast połączenie magazynu z integracją energii odnawialnej znacząco poprawia wartość długoterminową.

### Potencjał transferowy

Rozwiązanie wykazuje duży potencjał transferowy dla systemów transportu publicznego będących w procesie elektryfikacji. Wiele miast mierzy się z podobnymi wyzwaniami związanymi z potrzebami ładowania, ograniczeniami sieci i przyszłym zarządzaniem bateriami.

Magazyn energii oparty na bateriach z drugiego życia oferuje praktyczny sposób jednoczesnego adresowania tych kwestii i może być wykorzystywany na stacjach ładowania okazjonalnego, w zajezdniach lub węzłach mobilności. W ten sposób rozwiązanie wspiera zarówno cele gospodarki o obiegu zamkniętym, jak i bardziej elastyczne zarządzanie energią w systemach transportu publicznego.

Rozwiązanie przede wszystkim przyczynia się do fazy **EXTEND - zmiana przeznaczenia** - w hierarchii gospodarki o obiegu zamkniętym, ponieważ umożliwia kaskadowe wykorzystanie baterii trakcyjnych przed ich ostatecznym recyklingiem.

## 3.4. Działanie A.4: Wspieranie wdrażania rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze

Działanie to koncentruje się na wydłużeniu okresu użytkowania komponentów taboru poprzez odnowę, remanufacturing i lepszą wymianę informacji w sektorze transportu publicznego.

Pilotaż zrealizowany w Segedynie pokazuje przeprojektowanie i remanufacturing przestarzałej jednostki sterującej drzwiami tramwajowymi, co umożliwia dalszą eksploatację starzejących się tramwajów Tatra. Poprzez zastąpienie krytycznego komponentu elektronicznego, który nie jest już

dostępny na rynku, pilotaż ilustruje, w jaki sposób ukierunkowane przeprojektowanie komponentu może zachować wartość operacyjną istniejącego taboru.

Doświadczenia zebrane podczas pilotażu są powiązane z opracowaniem cyfrowej platformy dla używanych zasobów i kojarzenia partnerów, która wspiera wymianę informacji i współpracę między podmiotami transportu publicznego, ułatwiając ponowne użycie i remanufacturing komponentów pojazdów.

### 3.4.1. Pilotaż P.7: Remanufacturing i przeprojektowanie jednostek sterujących tramwaju w celu umożliwienia ponownego użycia komponentów (Szeged, Węgry)

#### Krótki opis pilotażu

Pilotaż ten koncentruje się na wydłużeniu operacyjnego okresu użytkowania pojazdów tramwajowych poprzez przeprojektowanie i remanufacturing krytycznego komponentu elektronicznego. Pilotaż, zrealizowany przez SZKT (przedsiębiorstwo transportowe w Segedynie), odpowiada na problem przestarzałych jednostek sterujących drzwiami stosowanych w taborze tramwajowym Tatra T6A2 i KT4D-ME, które nie są już dostępne na rynku części zamiennych.

Aby ograniczyć to ryzyko, opracowano nową, parametryzowaną i wspieraną diagnostycznie jednostkę sterującą z wykorzystaniem nowoczesnych komponentów. Jednostkę zaprojektowano jako kompatybilną z oboma typami tramwajów i przystosowaną do integracji z istniejącymi systemami drzwiowymi, co umożliwia dalszą eksploatację starzejących się pojazdów bez konieczności ich przedwczesnej wymiany.



Rysunek 29: Pojazdy tramwajowe Tatra (typy KT4D i T6A2) w eksploatacji w Segedynie.

### Wymagane zasoby

Realizacja wymagała analizy technicznej istniejących systemów, opracowania nowego sprzętu i oprogramowania diagnostycznego oraz stworzenia kontrolowanego środowiska testowego.

Dodatkowe działania obejmowały certyfikację przez akredytowany organ, uzyskanie zgody regulacyjnej na eksploatację oraz wyprodukowanie początkowej partii jednostek zamiennych przy ścisłej współpracy między zespołami wewnętrznymi i partnerami zewnętrznymi.



Rysunek 30: Kontrolowane środowisko testowe do funkcjonalnego badania nowo opracowanej jednostki sterującej drzwiami.

### Dowody sukcesu

Pilotaż z powodzeniem opracował i wdrożył zamienną jednostkę sterującą kompatybilną z dwoma typami tramwajów. Łącznie w 28 pojazdach zidentyfikowano 99 oryginalnych jednostek jako komponenty krytyczne, a początkową serię 40 nowych jednostek wyprodukowano i zainstalowano.

Rozwiązanie wyeliminowało problem przestarzałych części zamiennych dla kluczowego komponentu, zapewniło dalszą eksploatację taboru oraz wprowadziło funkcje diagnostyczne wspierające lepsze utrzymanie i wykrywanie usterek.



Rysunek 31: Nowo wykonana jednostka sterująca drzwiami zainstalowana w pojeździe tramwajowym.

### Zidentyfikowane wyzwania

Głównym wyzwaniem był proces zatwierdzania nowo opracowanego elektronicznego komponentu krytycznego dla bezpieczeństwa, ponieważ procedury regulacyjne nie były jasno określone i wymagały szerokiej koordynacji z organami certyfikującymi. Dodatkową złożoność stanowiło zapewnienie kompatybilności z różnymi systemami tramwajowymi oraz zdefiniowanie specyfikacji technicznych odpowiednich do długoterminowej eksploatacji.

### Możliwości uczenia się i transferu

Pilotaż pokazuje przenoszalne podejście do rozwiązywania problemu przestarzałych części zamiennych w starzejącym się taborze. Wiele miast eksploatuje podobne floty tramwajowe i stoi przed porównywalnymi wyzwaniami.

Metodologię - identyfikację komponentów krytycznych, przeprojektowanie części zamiennych i uzyskanie certyfikacji - mogą powtórzyć również inni operatorzy, wspierając w ten sposób cyrkularne strategie utrzymania i wydłużając okres użytkowania pojazdów.

Podejście to przede wszystkim przyczynia się do wymiaru **EXTEND** w ramach AETE, zwłaszcza poprzez odnowę i remanufacturing komponentów taboru.

## 4. Zdobyte doświadczenia

W pilotażach CE4CE pojawiło się kilka kluczowych tematów, które odzwierciedlają, jak rozwiązania cyrkularne działają w praktyce w różnych warunkach eksploatacyjnych.

### **Integracja danych i systemów**

Pilotaże utrzymania predykcyjnego pokazały, że skuteczność rozwiązań cyfrowych silnie zależy od jakości danych i integracji systemów. W Lipsku ciągłe monitorowanie oparte na pojazdach umożliwiło wczesne wykrywanie usterek infrastruktury, a jednocześnie ujawniło potrzebę stabilnych strumieni danych i walidacji poprzez inspekcje terenowe. Podobnie podejścia symulacyjne pokazały, że harmonizacja danych z różnych źródeł jest warunkiem wstępnym wiarygodnego modelowania i wspomaganie decyzji.

### **Wydłużanie okresu użytkowania aktywów poprzez ponowne użycie i remanufacturing**

Pilotaże koncentrujące się na ponownym użyciu infrastruktury i komponentów uwydatniły potencjał wydłużania okresu użytkowania aktywów. W Segedynie ponowne użycie zwrotnic trolejbusowych pokazało, że komponenty usunięte z odcinków sieci o wysokiej intensywności można skutecznie wykorzystać ponownie w środowiskach o mniejszym obciążeniu. Podobną zasadę zastosowano przy remanufacturingu jednostek sterujących tramwaju, gdzie przeprojektowanie umożliwiło dalszą eksploatację starszych pojazdów mimo przestarzałości części zamiennych.

### **Integracja systemowa i tworzenie wartości w zastosowaniach energetycznych**

Pilotaże związane z energią pokazały, że wartość rozwiązań cyrkularnych rośnie wraz z integracją systemową. W Mariborze magazyn energii oparty na bateriach z drugiego życia wykazał ograniczone korzyści, gdy był stosowany wyłącznie do ograniczania szczytów, ale znacznie większą wartość, gdy połączono go z integracją energii odnawialnej i elastycznym zarządzaniem energią. Podkreśla to znaczenie traktowania rozwiązań cyrkularnych jako części szerszej optymalizacji systemu, a nie jako samodzielnych interwencji.

### **Gotowość organizacyjna i procesy wdrożeniowe**

We wszystkich pilotażach skuteczna realizacja zależała od koordynacji między wieloma interesariuszami i integracji z istniejącymi strukturami operacyjnymi. Stopniowe podejścia wdrożeniowe, rozpoczynające się od pilotażu i kontynuowane poprzez stopniowe rozszerzanie, okazały się skuteczne w zarządzaniu złożonością techniczną i organizacyjną.

Wnioski te podsumowano w poniższej tabeli.

Obszar	Kluczowe doświadczenia
Technika i dane	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skuteczne rozwiązania zależą od kompatybilności z istniejącą infrastrukturą i systemami, zwłaszcza w środowiskach ze starszymi systemami.</li> <li>• Niezawodne wdrożenie wymaga wysokiej jakości i zharmonizowanych danych wspieranych przez stabilne strumienie danych.</li> <li>• Modułowa architektura systemu umożliwia skalowalne wdrażanie i elastyczną integrację.</li> </ul>
Operacyjne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wdrożenie wymaga koordynacji między funkcjami organizacyjnymi i integracji z istniejącymi przepływami pracy.</li> <li>• Wczesne zaangażowanie interesariuszy znacząco ogranicza ryzyko i ułatwia wdrożenie.</li> <li>• Podejścia stopniowe umożliwiają testowanie, walidację i sukcesywne skalowanie.</li> </ul>
Ekonomiczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rozwiązania cyrkularne zazwyczaj wymagają początkowej inwestycji, ale tworzą wartość w dłuższym horyzoncie czasowym.</li> <li>• Sukces ekonomiczny zależy od skali systemu, poziomu integracji i kontekstu operacyjnego.</li> <li>• Znacząca część wartości powstaje dzięki korzyściom pośrednim, takim jak niezawodność i efektywność.</li> </ul>
Wnioski dotyczące gospodarki o obiegu zamkniętym	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Największy potencjał tkwi w wydłużaniu okresu użytkowania aktywów, ponownym użyciu komponentów i zmianie przeznaczenia aktywów energetycznych.</li> <li>• Strategie cyrkularne często opierają się na logice kaskadowej w różnych kontekstach użytkowania.</li> <li>• Perspektywa cyklu życia jest kluczowa dla uchwycenia pełnej wartości.</li> </ul>
Przenoszalność	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rozwiązania oparte na podejściach modułowych i elastycznych mają największy potencjał transferowy.</li> <li>• Transfer zależy od lokalnych warunków organizacyjnych, technicznych i regulacyjnych.</li> <li>• Wymiana wiedzy i jasna dokumentacja wspierają replikację.</li> </ul>

Tabela 7: Przegląd międzysektorowych doświadczeń.

## 5. Lista kontrolna wdrożenia i kluczowe kwestie

Na podstawie doświadczeń przedstawionych w rozdziale 4 niniejszy rozdział oferuje praktyczne wskazówki dotyczące wdrażania rozwiązań CE4CE w różnych lokalnych warunkach. Przekształca zidentyfikowane wnioski w wykonalne kroki, kluczowe czynniki sukcesu i kwestie ryzyka, które wspierają interesariuszy we wdrażaniu podejść gospodarki o obiegu zamkniętym w systemach transportu publicznego.

Wskazówki są przeznaczone dla operatorów transportu publicznego, organizatorów i innych interesariuszy, którzy chcą dostosować i wdrożyć rozwiązania CE4CE z uwzględnieniem lokalnych warunków technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych.

### 5.1. Kluczowe kwestie dla skutecznego wdrożenia

Wdrażanie rozwiązań CE4CE wymaga uwzględnienia szeregu kluczowych kwestii, które determinują wykonalność, skuteczność i skalowalność. Kwestie te odzwierciedlają praktyczne wymagania zidentyfikowane w działaniach pilotażowych i procesach rozwoju rozwiązań.

Skuteczne wdrożenie zależy od zapewnienia kompatybilności z istniejącą infrastrukturą i systemami, zwłaszcza w środowiskach ze starszymi systemami, oraz od dostępności wiarygodnych i dobrze uporządkowanych danych. Jednocześnie kluczową rolę odgrywa gotowość organizacyjna, w tym koordynacja

między działami, zaangażowanie interesariuszy i zdolność do włączenia nowych podejść do istniejących przepływów pracy.

Wykonalność ekonomiczną należy rozpatrywać z perspektywy cyklu życia, z uwzględnieniem korzyści bezpośrednich i pośrednich, podczas gdy wymagania regulacyjne i procedury zatwierdzające mogą wpływać na harmonogramy wdrożenia i projekt rozwiązań. Ponadto rozwiązania muszą być projektowane z myślą o skalowalności i przenoszalności, co umożliwia ich dostosowanie do różnych środowisk operacyjnych i instytucjonalnych.

### 5.2. Lista kontrolna wdrożenia

Tabela 9 przedstawia uporządkowane podejście krok po kroku wspierające wdrażanie rozwiązań gospodarki o obiegu zamkniętym w systemach transportu publicznego - od oceny wstępnej po skalowanie i integrację ze standardową eksploatacją.

Krok	Obszar koncentracji
<b>Krok 1: Ocena wstępna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zidentyfikuj możliwości gospodarki o obiegu zamkniętym w infrastrukturze, pojazdach i systemach energetycznych</li> <li>• Przeanalizuj istniejące praktyki zarządzania cyklem życia aktywów</li> <li>• Określ priorytetowe obszary działania</li> </ul>
<b>Krok 2: Analiza wykonalności</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oceń wykonalność techniczną wybranych rozwiązań</li> <li>• Oceń dostępność danych i wymagania systemowe</li> <li>• Przeanalizuj wykonalność ekonomiczną i potencjalne korzyści</li> <li>• Zidentyfikuj ograniczenia regulacyjne</li> </ul>
<b>Krok 3: Projekt rozwiązania</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Określ koncepcję techniczną i architekturę systemu</li> <li>• Wybierz odpowiednie technologie i partnerów</li> <li>• Przygotuj plan wdrożenia i harmonogram</li> <li>• Określ wskaźniki sukcesu</li> </ul>
<b>Krok 4: Realizacja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wdroż rozwiązanie w kontrolowanym środowisku pilotażowym</li> <li>• Monitoruj wyniki i gromadź dane</li> <li>• Zaangażuj personel operacyjny i interesariuszy</li> <li>• Dostosuj system na podstawie informacji zwrotnych</li> </ul>
<b>Krok 5: Ocena i optymalizacja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Przeanalizuj wyniki pilotażu i dane o skuteczności</li> <li>• Zidentyfikuj usprawnienia i potencjał optymalizacji</li> <li>• Potwierdź korzyści ekonomiczne i operacyjne</li> </ul>
<b>Krok 6: Skalowanie i transfer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opracuj strategię skalowania w organizacji</li> <li>• Dostosuj rozwiązanie do innych kontekstów lub lokalizacji</li> <li>• Dziel się wiedzą i zdobytymi doświadczeniami</li> <li>• Włącz rozwiązanie do standardowej eksploatacji</li> </ul>

Tabela 9: Krok po kroku - lista kontrolna wdrożenia.

### 5.3. Typowe ryzyka i działania ograniczające

Wdrażanie rozwiązań cyrkularnych w transporcie publicznym wiąże się z typowymi ryzykami dotyczącymi danych, technologii, zdolności organizacyjnych i regulacji.

Kluczowym wyzwaniem jest dostępność i jakość danych, ponieważ niekompletne lub niespójne dane ograniczają skuteczność narzędzi cyfrowych i decyzji opartych na danych. Wymaga to wczesnej oceny dostępności danych, ich walidacji oraz wdrożenia wiarygodnych procesów zarządzania danymi.

Wdrożenie mogą utrudniać także niekompatybilności techniczne z istniejącą infrastrukturą i starszymi systemami. Wyzwania te można ograniczyć dzięki modułowym i elastycznym projektom systemów, które pozwalają na stopniową integrację z istniejącym środowiskiem bez rozległych zmian systemowych.

Wymogi regulacyjne i procedury zatwierdzania mogą wpływać na harmonogram wdrożenia, zwłaszcza przy rozwiązaniach innowacyjnych lub krytycznych dla bezpieczeństwa. Dlatego ważne jest wczesne zaangażowanie organów regulacyjnych, aby doprecyzować wymagania i ograniczyć ryzyko opóźnień. Wdrożenie mogą dodatkowo utrudniać

ograniczone zdolności organizacyjne, w tym niedobór wiedzy eksperckiej lub zasobów. Ryzyka te można ograniczyć przez budowanie kompetencji, ukierunkowane szkolenia oraz zapewnienie zasobów dla wdrożenia i eksploatacji.

Kluczową rolę w skutecznym wdrożeniu odgrywa także zaangażowanie interesariuszy. Ograniczone zaangażowanie lub brak zgodności między interesariuszami może hamować postęp, a stała komunikacja i wczesne zaangażowanie wspierają koordynację, akceptację i skuteczne wdrożenie.

Ryzyka	Działania ograniczające ryzyko
Brak danych lub niska jakość danych	Wczesna ocena i walidacja danych
Niezgodność techniczna	Modułowa architektura systemu
Opóźnienia regulacyjne	Wczesne zaangażowanie regulatorów
Ograniczone zdolności organizacyjne	Budowanie kompetencji i szkolenia
Niski poziom zaangażowania interesariuszy	Stać komunikacja z interesariuszami

### 5.4. Wnioski i perspektywy

Podręcznik CE4CE pokazuje, w jaki sposób zasady gospodarki o obiegu zamkniętym można przełożyć na praktyczne zastosowania w systemach transportu publicznego. Dzięki działaniom pilotażowym realizowanym w różnych środowiskach eksploatacyjnych projekt dostarczył cennych doświadczeń na temat tego, jak zachowywać wartość, ograniczać odpady i poprawiać efektywne wykorzystanie zasobów w infrastrukturze, pojazdach i systemach energetycznych.

Rozwiązania przedstawione w niniejszym podręczniku opierają się na tych doświadczeniach i zapewniają uporządkowane, przenoszalne podejścia, które mogą wspierać organizatorów i operatorów transportu

publicznego we wdrażaniu praktyk cyrkularnych. W połączeniu z międzysektorowymi doświadczeniami oferują strategiczny kierunek i praktyczne wskazówki dotyczące przejścia od liniowego do cyrkularnego zarządzania aktywami.

Lista kontrolna przedstawiona w tym rozdziale oferuje uporządkowane podejście, które można dostosować do różnych kontekstów transportu publicznego i rozwiązań cyrkularnych. Dalsza wymiana wiedzy, współpraca interesariuszy i dalszy rozwój cyrkularnych modeli biznesowych będą kluczowe dla rozszerzania tych podejść i wspierania przejścia do zrównoważonych i cyrkularnych systemów transportu publicznego.

## 6. Źródła

### Produkty projektu CE4CE:

- D.1.1.3 Kompas Cyrkularności transportu publicznego - podsumowanie wyników wraz ze wskazówkami wdrożeniowymi.
- D.1.2.2 Raport z realizacji, testowania, oceny i wzajemnego przeglądu eksperckiego platformy CE4CE dla cyrkularności transportu publicznego.
- D.3.1.1 Raport dotyczący wspólnych wymagań, przygotowania, realizacji i oceny pilotaży: utrzymanie predykcyjne w Lipsku i Bergamo oraz symulacja e-korytarza w Gdyni.
- D.3.1.2 Raport dotyczący rozwoju wspólnych rozwiązań cyfrowych wspierających i przyspieszających cyrkularność w transporcie publicznym.
- D.3.2.1 Raport dotyczący wspólnych wymagań i planu przygotowania, realizacji i oceny pilotaży: ponowne użycie zwrotnic trolejbusowych w Segedynie oraz ponowne użycie używanych baterii w Mariborze.
- D.3.2.2 Raport dotyczący rozwoju rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w infrastrukturze transportu publicznego.
- D.3.3.1 Raport dotyczący wspólnych wymagań i planu przygotowania, realizacji i oceny pilotaży.
- D.3.3.2 Raport wspierający wdrażanie rozwiązań służących zachowaniu wartości i ograniczeniu odpadów w pojazdach i taborze.

### Karty informacyjne dotyczące rezultatów projektu CE4CE:

- O1.1 CE4CE Kompas Cyrkularności transportu publicznego.
- O1.2 CE4CE Platforma wiedzy dla cyrkularności transportu publicznego.
- O3.1 Cyfrowa optymalizacja infrastruktury i pojazdów dzięki utrzymaniu predykcyjnemu.
- O3.2 Moduły utrzymania predykcyjnego infrastruktury i taboru.
- O3.3 Symulacja e-korytarza i przepływów energii do symulacji cyrkularnych scenariuszy rozwoju elektryfikacji.
- O3.4 Narzędzie do cyrkularnego planowania biznesowego zelektryfikowanego taboru i infrastruktury transportu publicznego.
- O3.5 Demonstracja wykonalności ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych.
- O3.6 Określenie kryteriów wdrażania ponownego użycia zwrotnic trolejbusowych.
- O3.7 Analiza wykorzystania używanych baterii do magazynowania energii odnawialnej na potrzeby zasilania szybkiej ładowarki jako przykład strategicznego kierunku ku cyrkularności.
- O3.8 Opracowanie przenoszalnych modeli biznesowych ponownego wykorzystania baterii do magazynowania energii odnawialnej w systemach transportu publicznego.
- O3.9 Projekt jednostek sterujących tramwaju w ramach remanufacturingu tramwajów.
- O3.10 Internetowy rynek używanych części i produktów oraz platforma kojarzenia partnerów i wymiany informacji.



Scan me for the project website

Copyright: Szeged Transport Company

Projekt CE4CE (Infrastruktura transportu publicznego w Europie Środkowej - wspieranie przejścia do gospodarki o obiegu zamkniętym) promuje systemowe myślenie o gospodarce o obiegu zamkniętym wśród podmiotów transportu publicznego z Europy Środkowej, aby ograniczać odpady i tworzyć wartość w nowych cyklach życia infrastruktury i taboru.

Skontaktuj się z nami

Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH / Lipskie przedsiębiorstwo transportu publicznego

Koordynator projektu: Pan Stefan Röhl

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

Strona projektu: <https://www.interreg-central.eu/projects/ce4ce/>

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

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

Platforma wiedzy projektu: <https://circularity4publictransport.eu/>

