Trendy rozwoju układów napędowych pojazdów szynowych; Czy silniki o zapłonie samoczynnym powinny przejść do lamusa?

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz, multi dr h.c.
dr inż. Maciej Andrzejewski

Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych
merkisz@ptnss.pl

Stowarzyszenie Ekspertów i Menedżerów Transportu Szynowego
m.andrzejewski@seim-tsz.pl





BENZYNA



1877 1888 2006 2009 2012 2015 2018 2021

Transport szynowy i drogowy



Linie kolejowe na Świecie

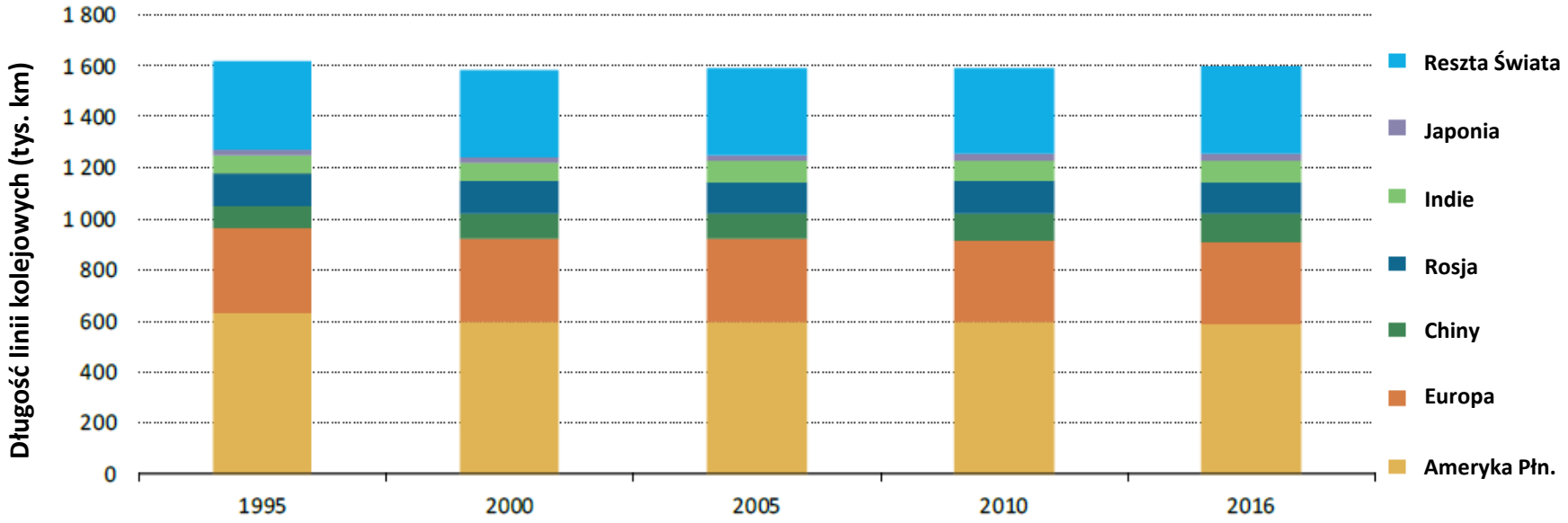
Łączna długość linii kolejowych na Świecie

ok. 1.6 mln km

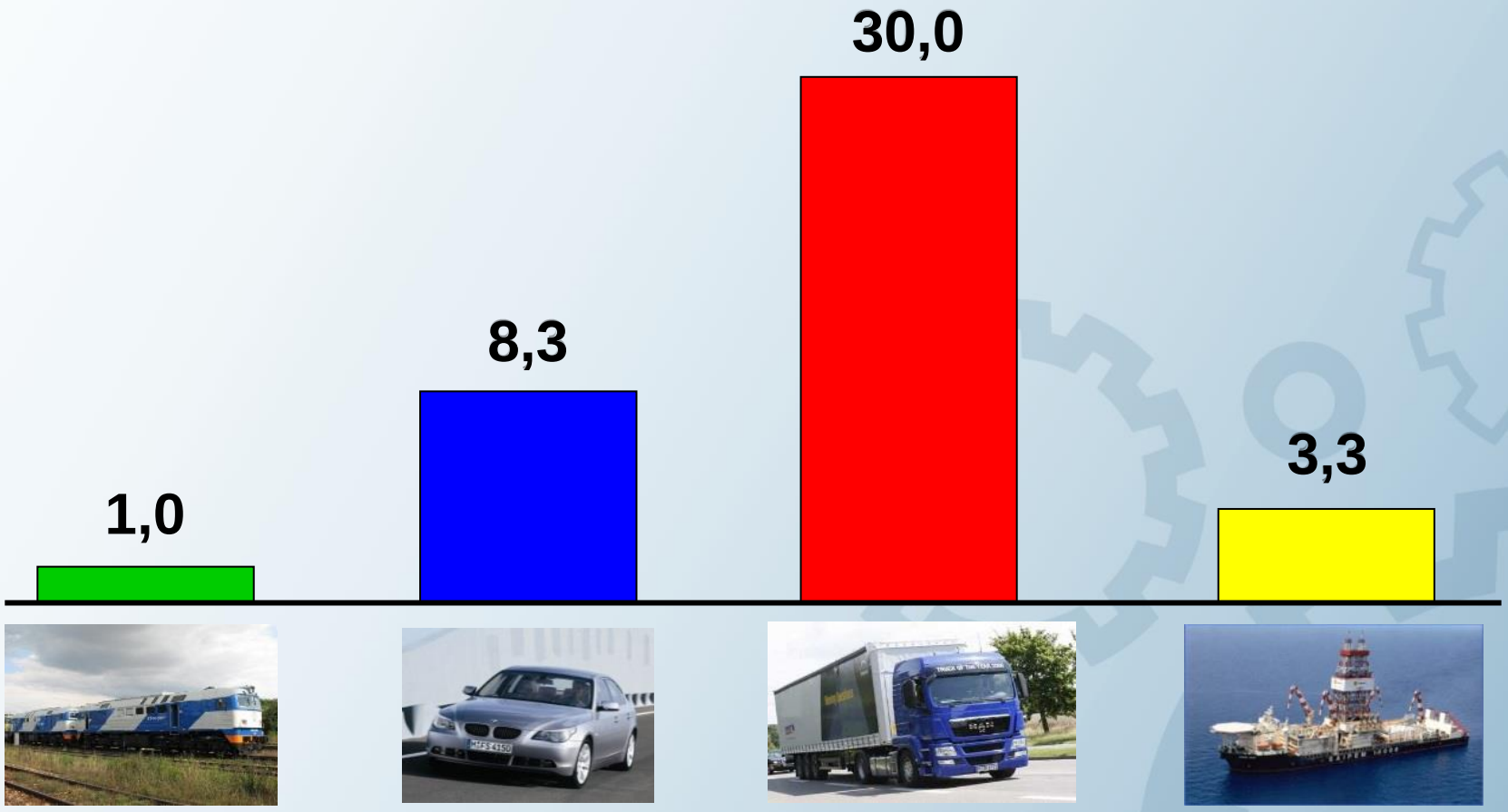


Linie niezelektryfikowane

ok. 70 %



Względny wpływ transportu na środowisko



Transport kolejowy jest najbardziej przyjazny dla środowiska

Średnia emisja dwutlenku węgla w Europie

Dane w gramach na pasażerokilometr



1

17 g CO_2



~2×

30 g CO_2



~5×

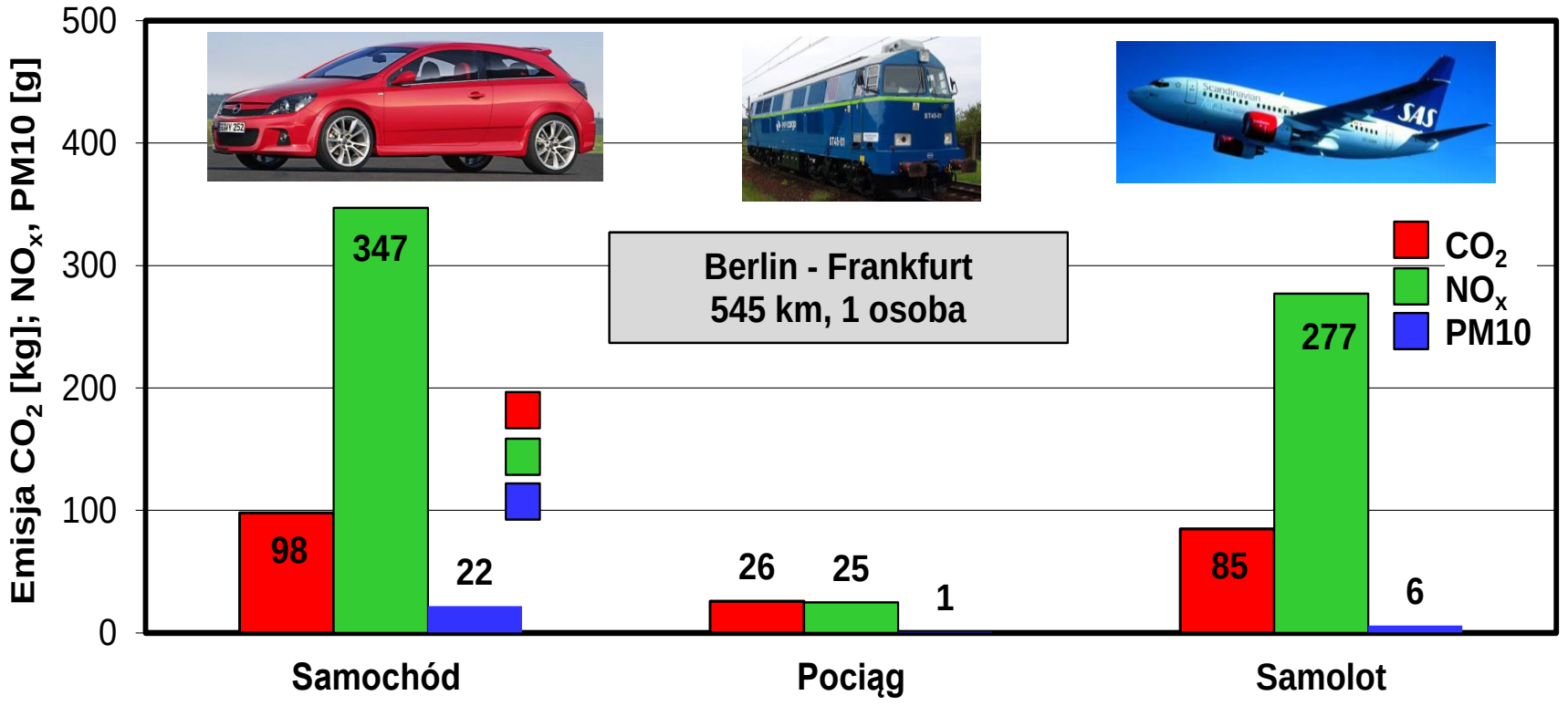
90 g CO_2



~9×

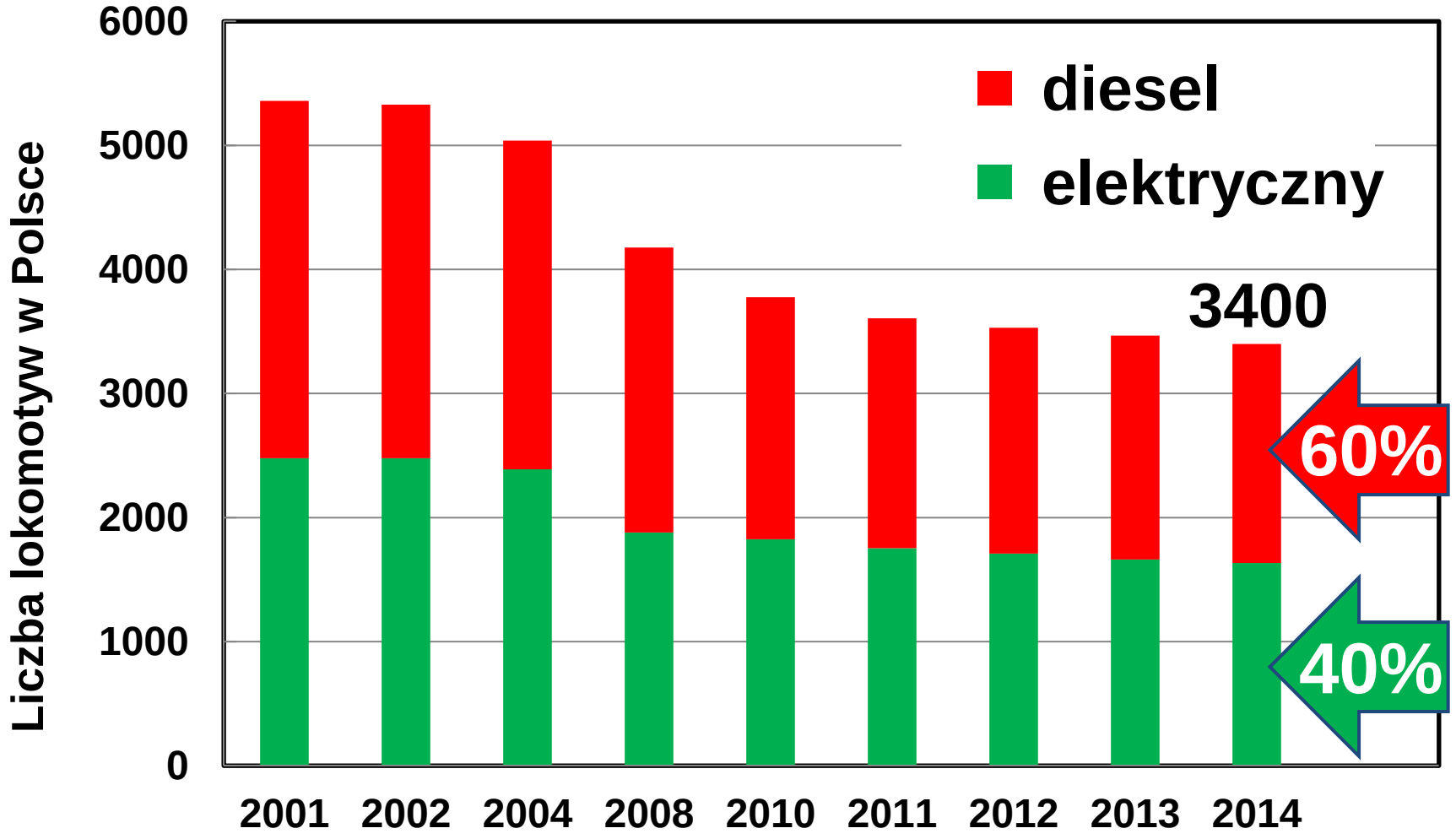
153 g CO_2

Emisja spalin z wybranych środków transportu



Najkorzystniejszy pod względem emisji zanieczyszczeń pozostaje transport szynowy ($^1/_3$ CO_2, $^1/_{10}$ NO_x i PM)

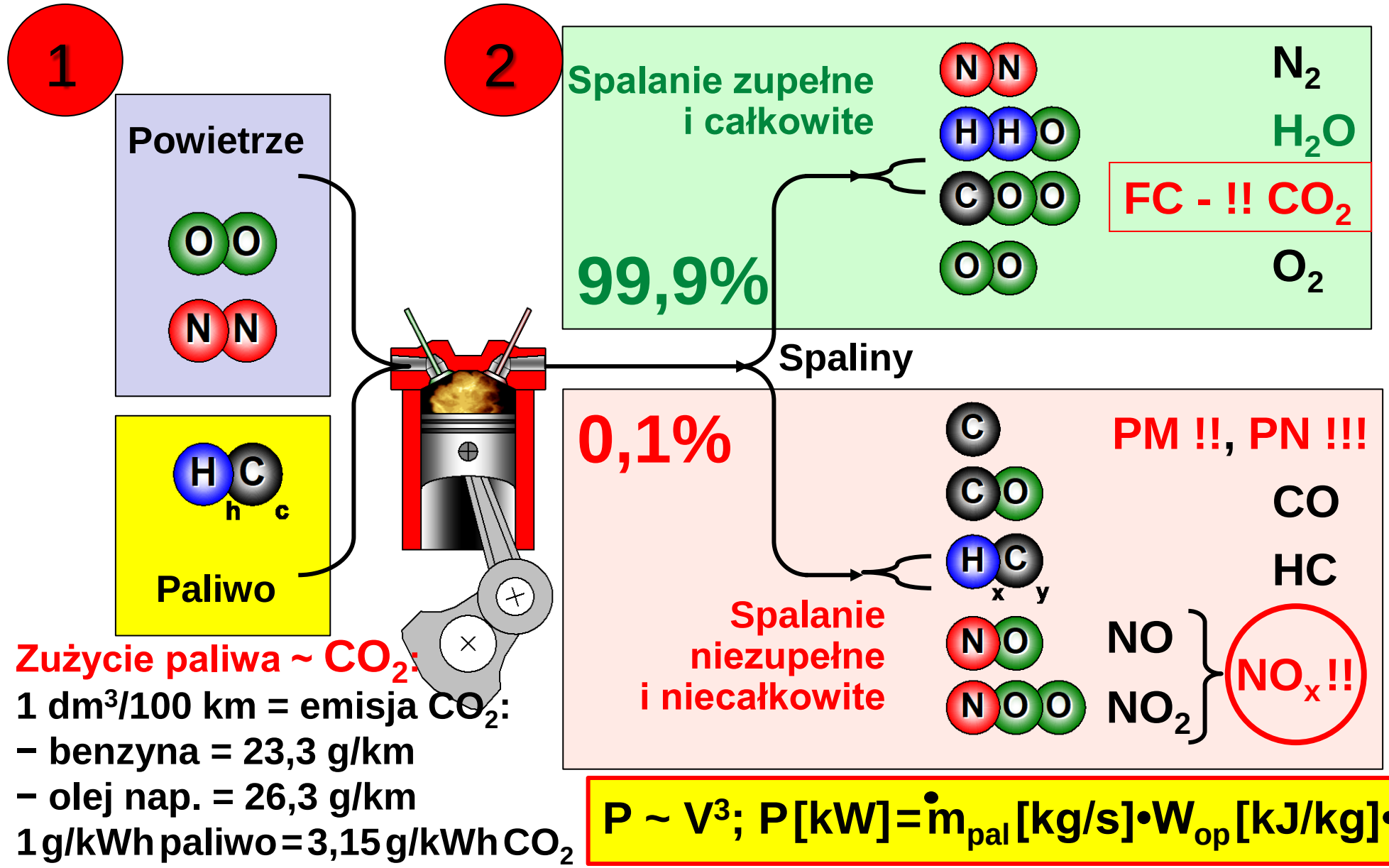
Liczba lokomotyw w Polsce



Ponad 60% z nich to lokomotywy z silnikami ZS

Przyszłość mobilności – pełna wyzwań:

Rozwój: 1 – zużycie paliwa, 2 – emisja spalin



$$P \sim V^3;\ P[kW] = \dot{m}_{pal}[kg/s] \cdot W_{op}[kJ/kg] \cdot \eta_o$$

Well to Wheel – od wydobycia do koła (+20%)



Well to tank

Well

Szczelinowanie

Wiercenie

Produkcja

Magazynowanie

Rafineria

Terminale
Magazynowanie



Elektrownie

Statki

Kolej

Samochody ciężarowe

Samochody osobowe

Tank to wheel

Wheel

Możliwości zmniejszenia emisji dwutlenku węgla

Zmniejszenie emisji CO_2 → zmniejszenie oporów

$$F_{całk} = \underbrace{F_{toczenia} + F_{bezwł} + F_{wzniesienia}}_{\text{masy}} + \underbrace{F_{aerodynamika}}_{\text{prędkości, } c_x}$$

zależne od:

$$P_e = F_{całk} \cdot V \quad \rightarrow P_e \sim V^3$$

Zmniejszenie emisji CO_2 przez:

- Zmniejszenie oporów toczenia
- Zmniejszenie masy pojazdów
- Zmiany aerodynamiczne

Emisja według norm i testów RDE

Zastosowanie

RDE PEMS

Rodzaj badań

Brak możliwości wyk. badań po pewnym przebiegu

LDV dmc < 3500 kg

Limity

Sam. osobowe LDV



ham. podwoziowa



masa / droga [g/km]

Ciężarówki, autobusy (HDV) Pojazdy pozadrogowe (NRMM)





ham. silnikowa



masa / praca [g/kWh]

Rozwój testów emisji lokomotyw

1

Tylko silnikowe



2

Testy stacjonarne

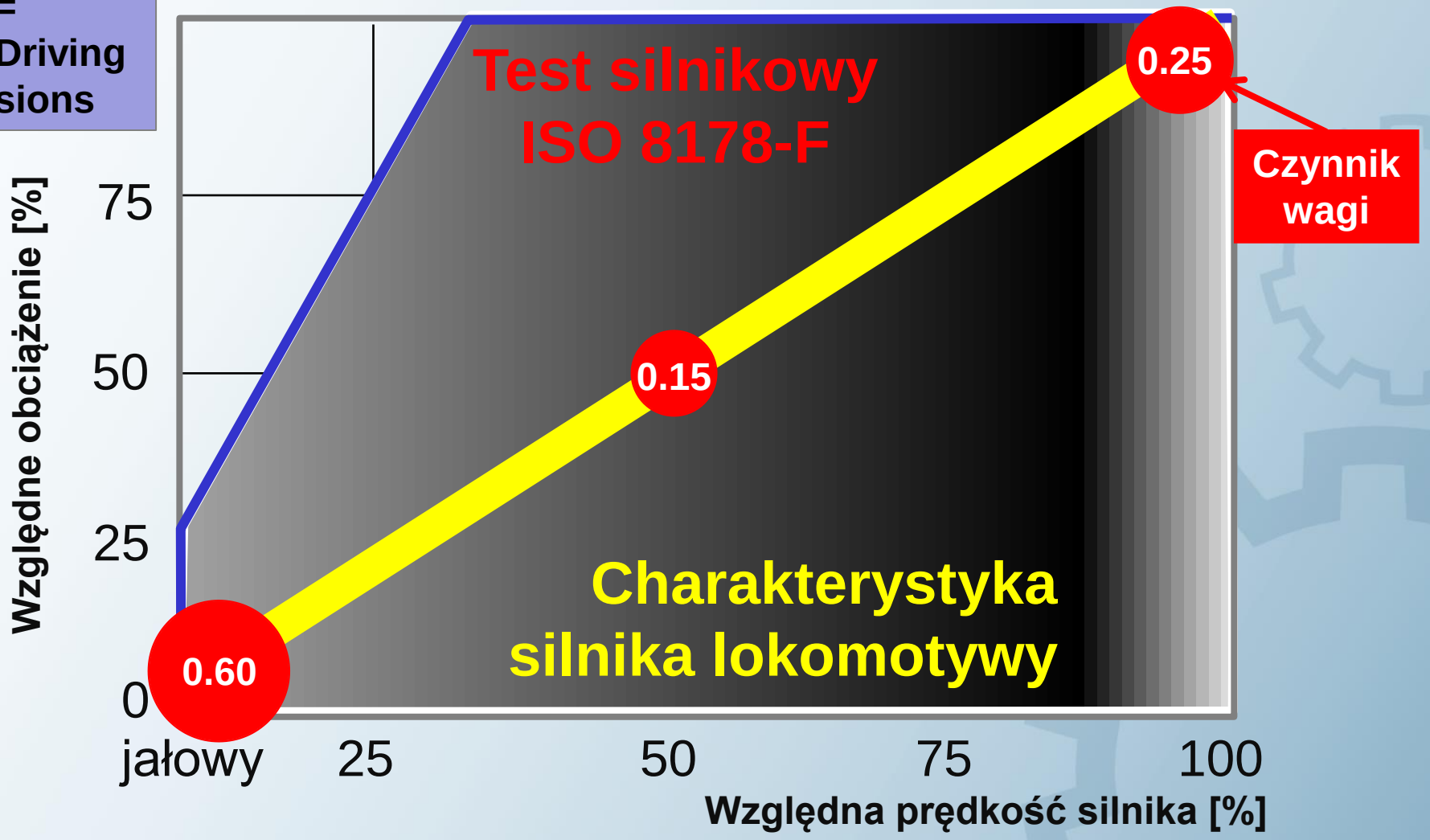


3 RDE (PEMS)



Parametry silnika w testach emisji

RDE = Real Driving Emissions



Nacisk na RDE! (PEMS)

$FC_{real} > FC_{stand}$

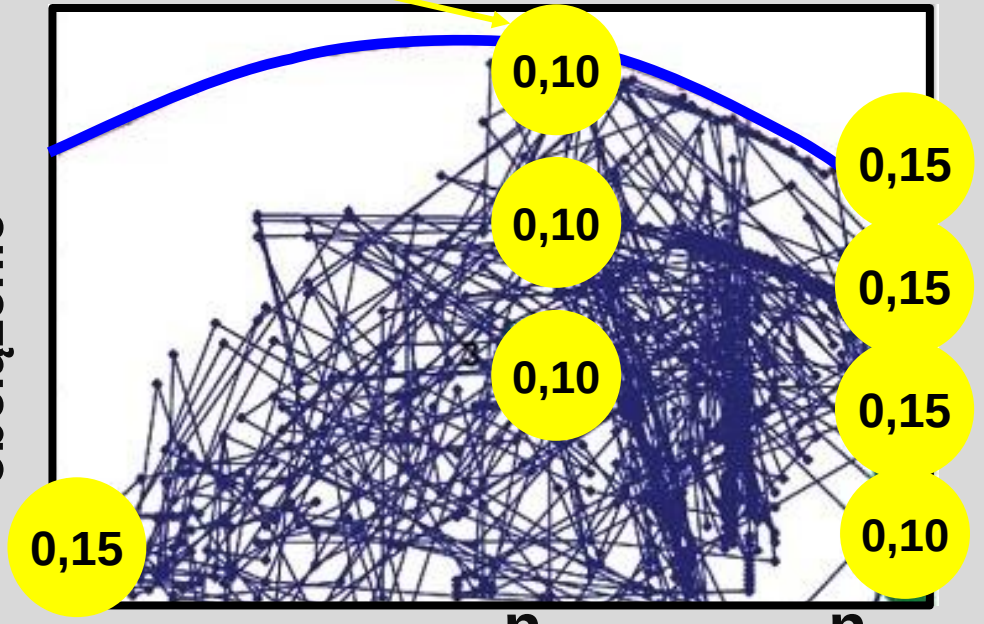
Ewolucja testów dla maszyn pozadrogowych

Badanie tylko silnika (silnik na hamownii dynamicznej)



Współczynnik wagi

1. **Non-Road Stationary Cycle (NRSC)**
2. **Non-Road Transient Cycle (NRTC)**



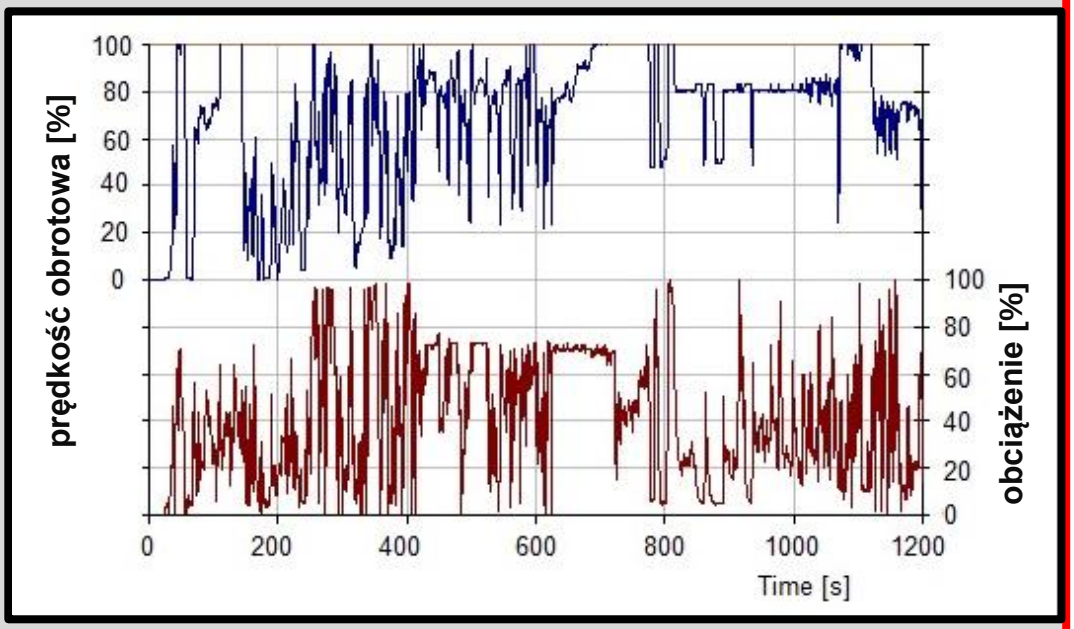
Ewolucja testów dla maszyn pozadrogowych

Badanie tylko silnika

(silnik na hamownii dynamicznej)



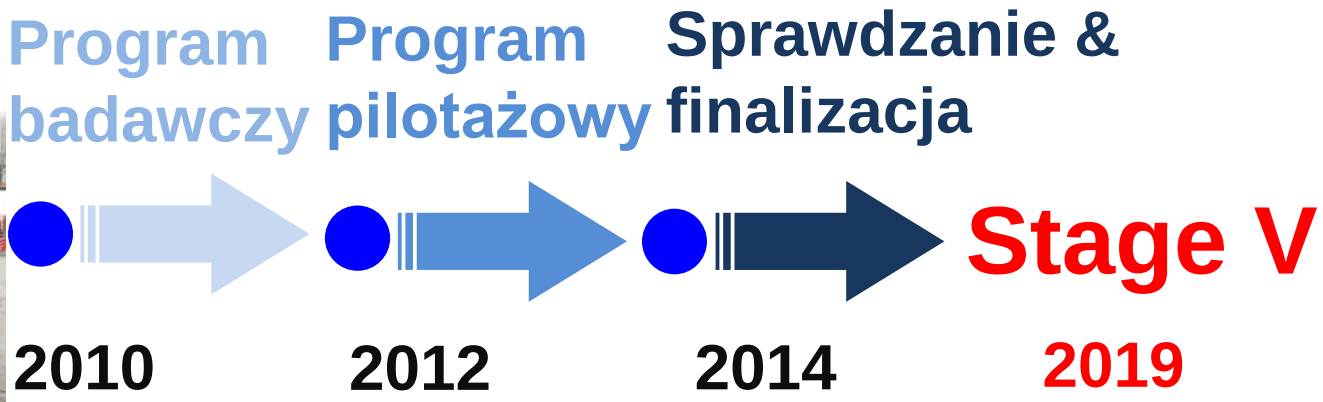
1. **Non-Road Stationary Cycle (NRSC)**
2. **Non-Road Transient Cycle (NRTC)**



Ewolucja testów dla maszyn pozadrogowych

Stage V – Stress on RDE! (PEMS)

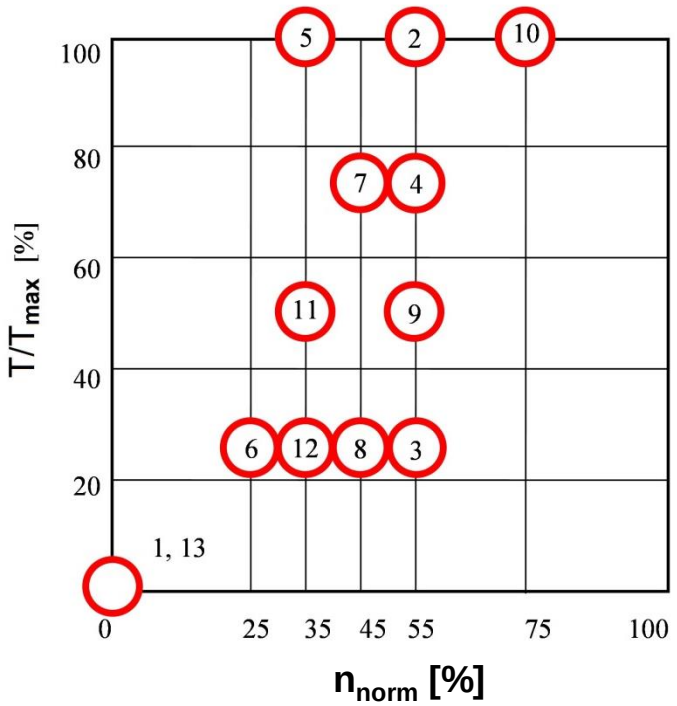




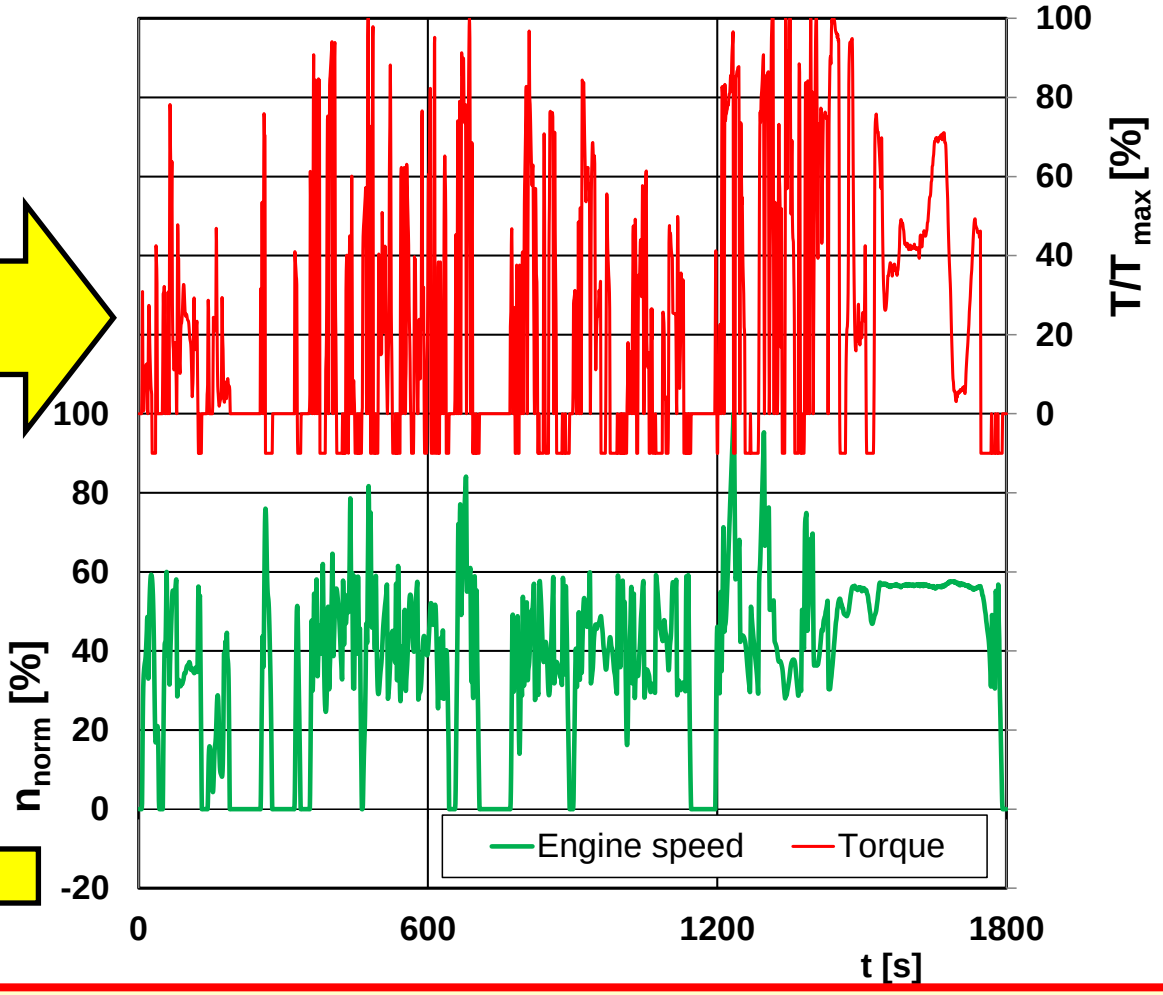
Stage V: RDE (PEMS) dla Silniki dla maszyn pozadrogowych

WHTC Worldwide Heavy Duty Transient Cycle

WHSC – Stationary cycle



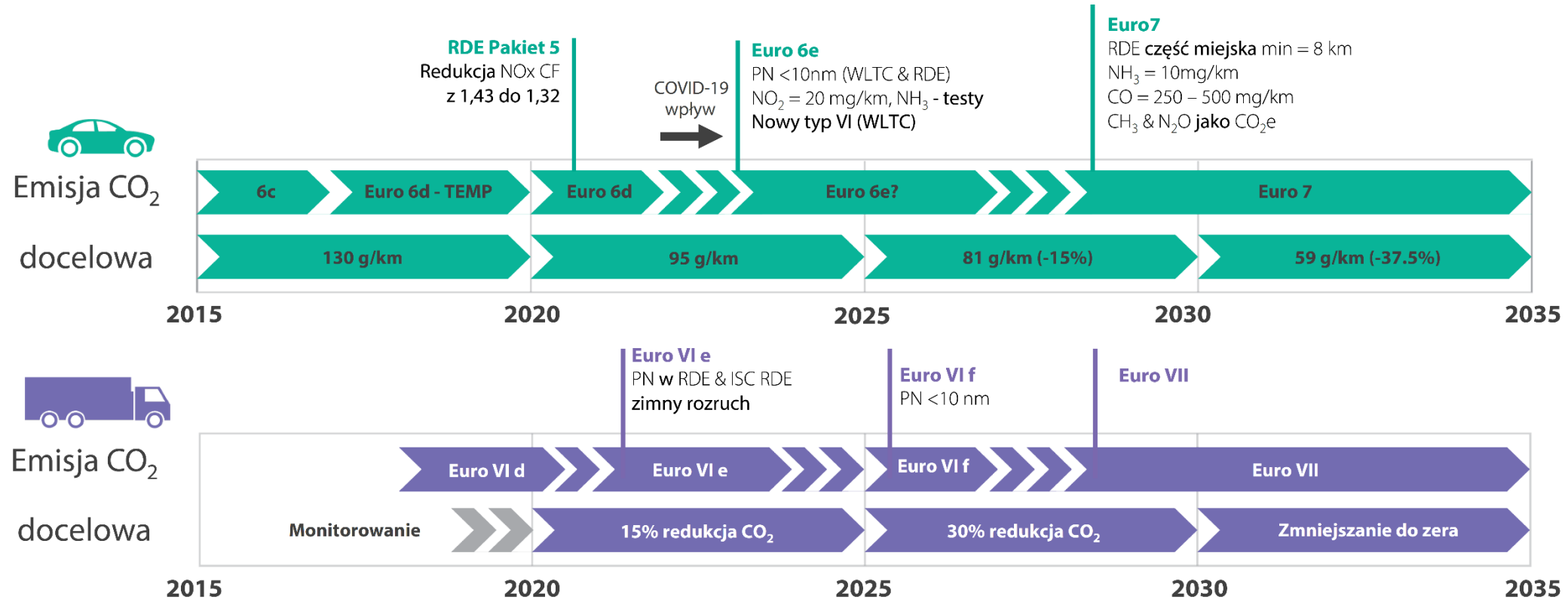
WHTC – Transient cycle



RDE ← base

WHTC jest bardziej podobny do RDE niż WHSC:
silnik: zmienna prędkość obrotowa i przyspieszenie oraz moment obrotowy

Projekt Normy Euro 7/ Euro VII (data???, CO_2!!!)



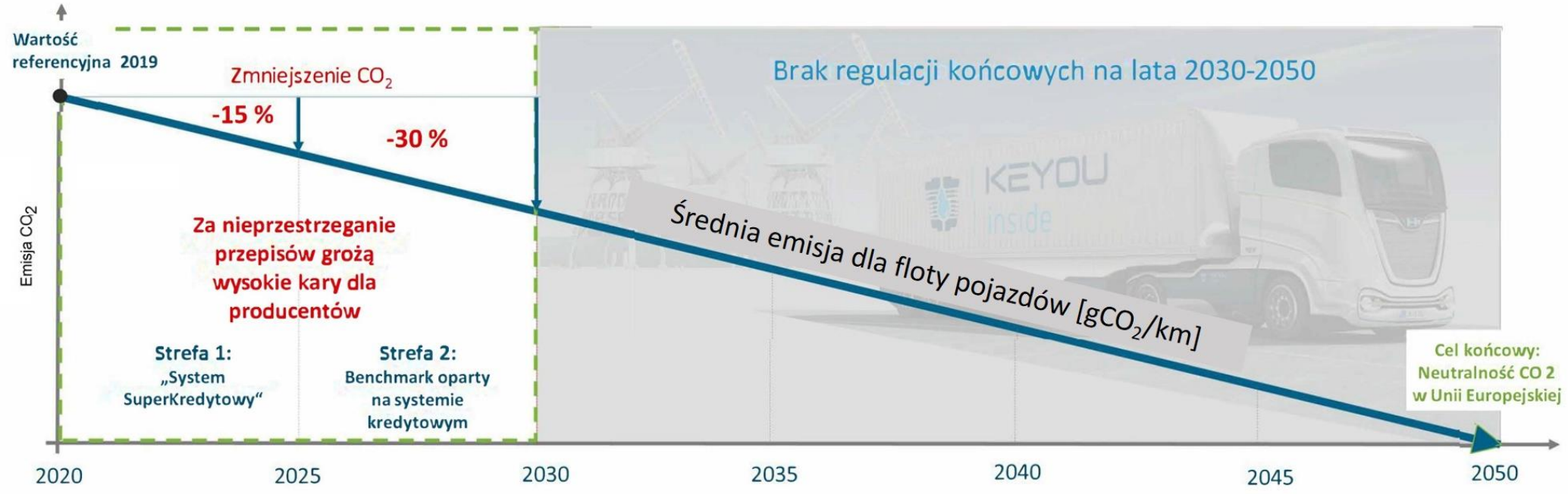
Propozycje zmian przepisów dla Euro 7/VII:

CO, THC, NMHC, NO_x, PM – obniżenie > 50%;

nowe związki limitowane: NO_2, N_2O, CH_4, NH_3, aldehydy (CH_2O),

a już od Euro 6/VI: PN, test RDE

HDV –
redukcja CO_2 w UE



Sposób osiągnięcia emisji dwutlenku węgla dla HDV w Unii Europejskiej dla (Dyrektywa EU 1242/2019)

Ewolucja systemów napędowych

dzisiaj jutro

! Wodór i ogniwa paliwowe

Pojazdy hybrydowe i elektryczne

Paliwa alternatywne

Optymalizacja silników spalinowych





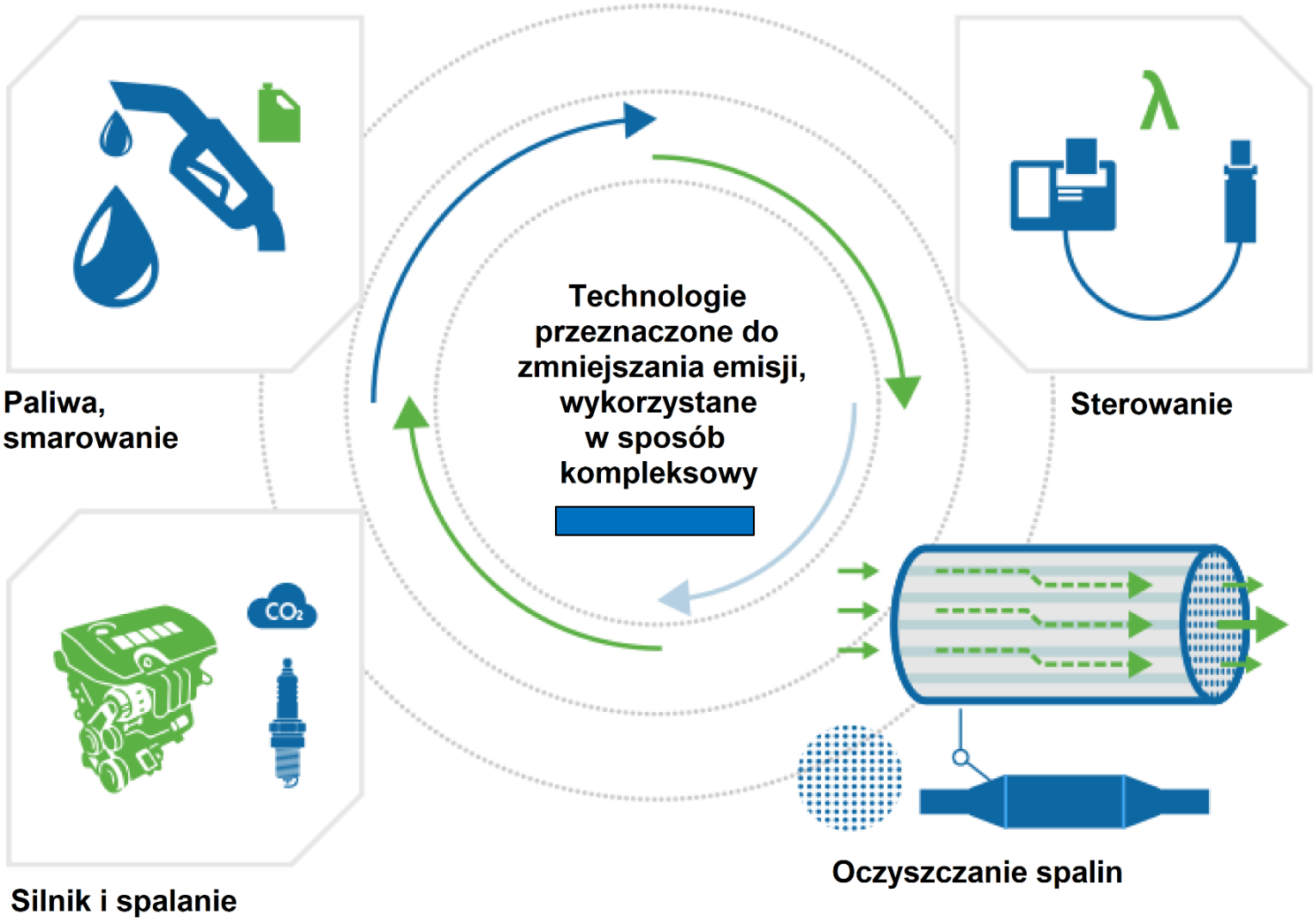





Elektryfikacja

48 V mild HEV ~ +20 – 30 kW

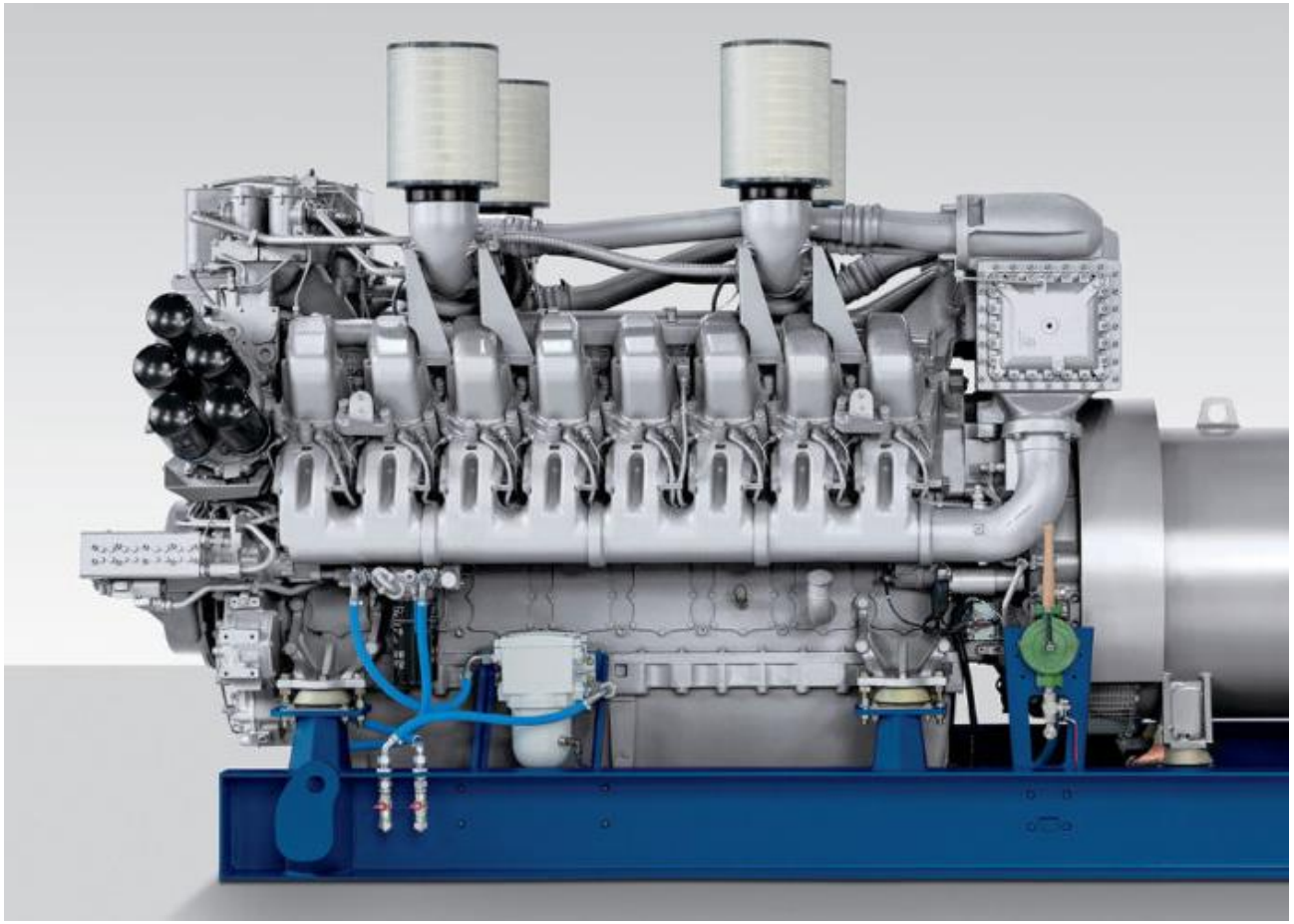
Technologie zmniejszające emisję spalin



Technologie i polityka dla spełnienia celu: Zero-Impact Combustion Engines

Nowe silniki „clean diesel”: koniec ???

Cele dla systemów napędowych



- Spełnienie Norm emisji: EUVId/e-temp (RDE) !
- Obniżenie zużycia paliwa !
- Poprawa dynamiki
- Wzrost mocy i momentu
- Koncepcja rozwiązania modularnego
- Optymalizacja parametrów akustycznych

Źródło: Steinparzer;
Vienna Motor Symposium 2018

Kierunki rozwoju silników ZS

DIESEL (ZS)

Dzisiaj

Jutro



Common Rail
~180-300 MPa

Stalowe tłoki

Turbocharging

EGR

DOC + DPF + SCR

Zaawansowany „aftertreatment” system

Strategie operacyjne

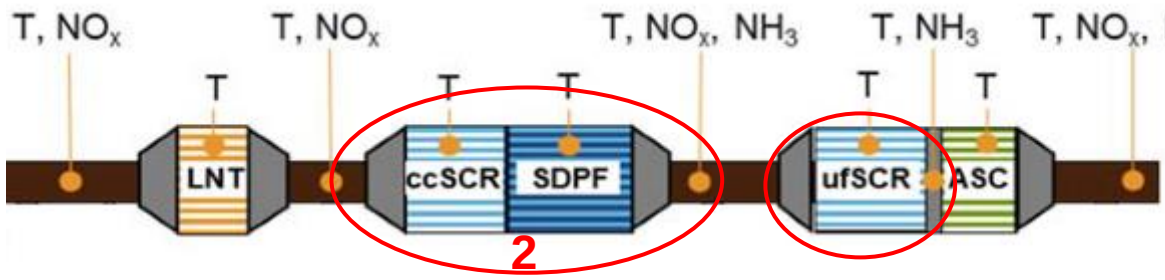
Zarządzanie ciepłem

Wodór

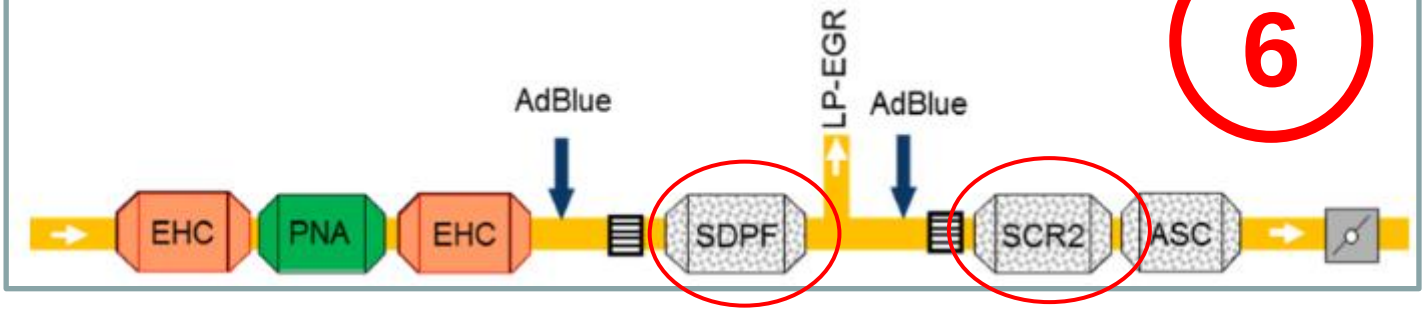
!!! 48 V mild HEV ~ +20–30 kW

Układy oczyszczania spalin w przyszłości

Układ do pojazdów klasy PC

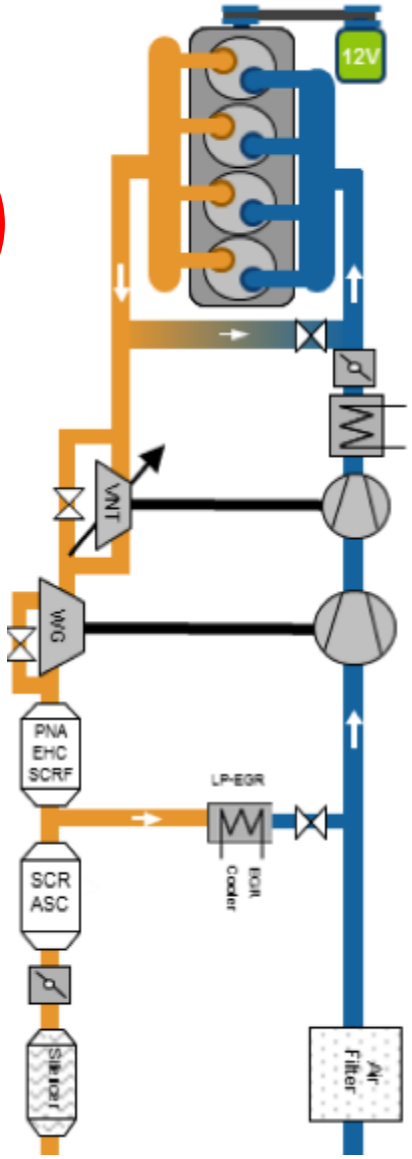


Układ do maszyn pozadrogowych (NRMM)



LNT – reaktor zasobnikowy NO_x
ccSCR – SCR zabudowany blisko wylotu spalin
ufSCR – SCR zabudowany pod podłogą
SDPF – SCR naniesiony na DPF
ASC – reaktor amoniaku
PNA – pasywny absorber NO_x
EHC – elektrycznie podgrzewany reaktor katalityczny

SCR



Alternatywne napędy

Alternatywne Technologie Napędów

Technologie Zeroemisyjne dla Spełnienia Przepisów UE

BEV



FC-EV



H_2-ICE







Katastrofa sterowca Hindenburg;

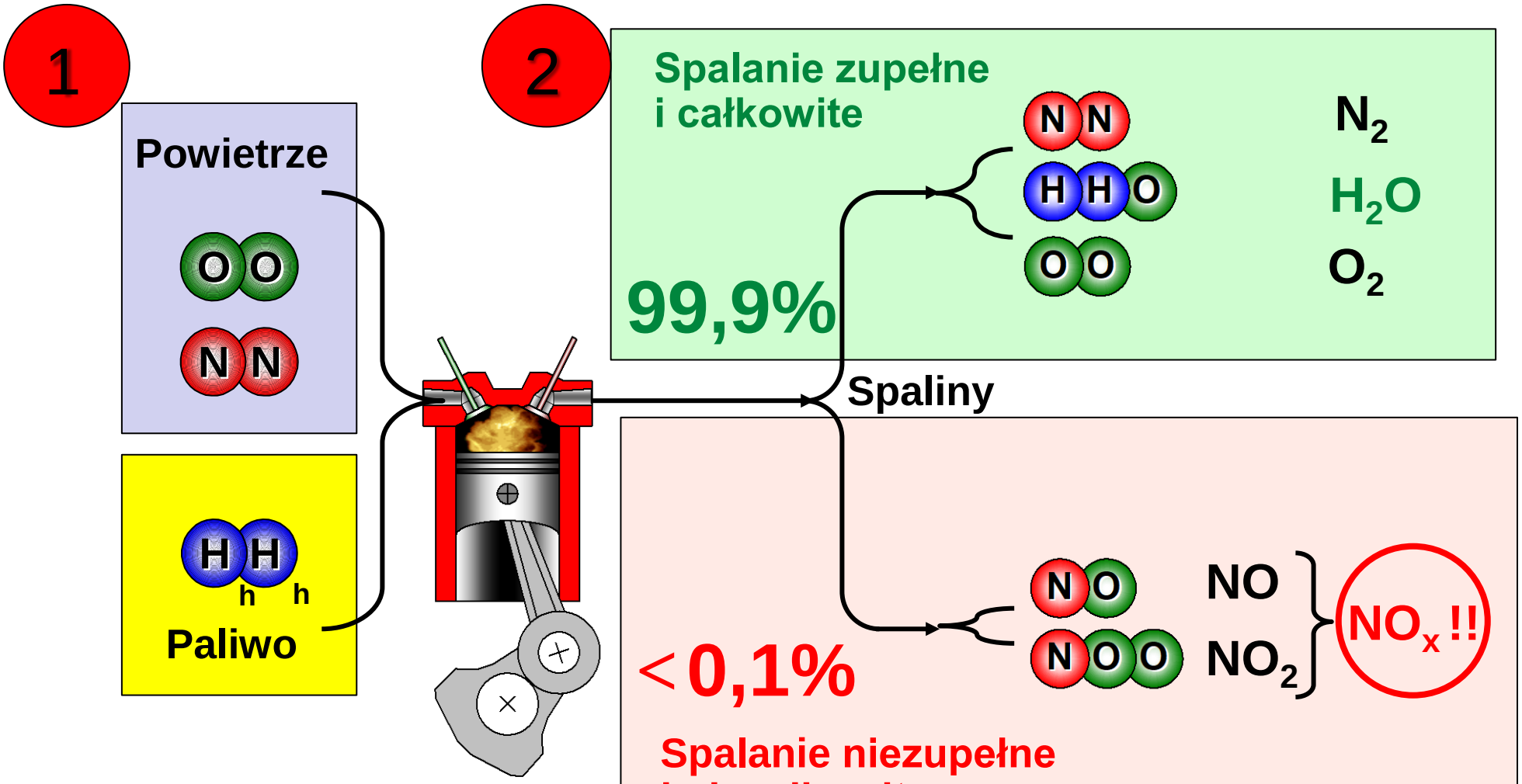
Spłonął doszczętnie w czasie < 40 s;

Długość = 245 m; średnica = 41 m;

Pojemność H_2 = 200 000 m^3

Przyszłość mobilności – pełna wyzwań (zasilanie H_2):

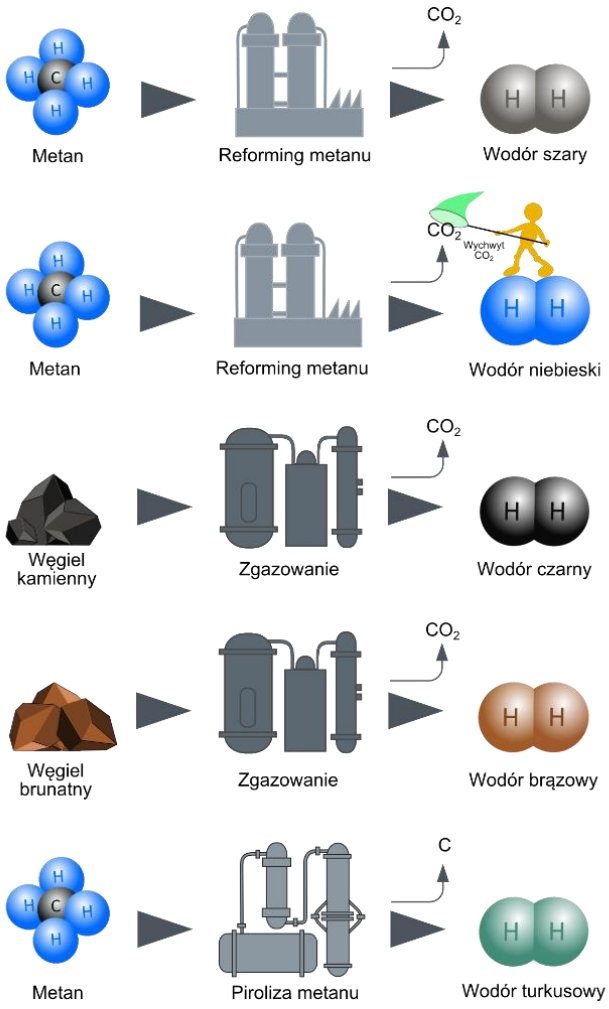
Rozwój: 1 – zużycie paliwa, 2 – emisja spalin

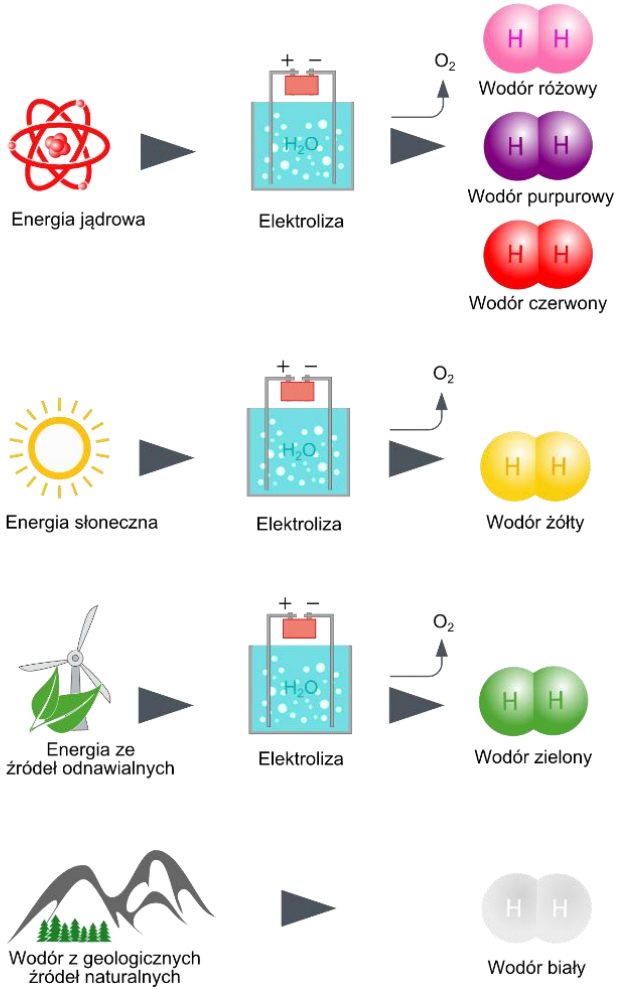


Emisja ~ CO_2 = 0

$$P \sim V^3;\ P\ [kW] = \dot{m}_{pal}\ [kg/s] \cdot W_{op}\ [kJ/kg] \cdot \eta_o$$

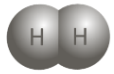
Kolory wodoru





- **szary** ➤ metan
- **czarny** ➤ węgiel kamienny
- **brązowym** ➤ węgiel brunatny
- **niebieskim** ➤ metan przy zastosowaniu wychwytu CO_2
- **różowy**, **purpurowy** i **czerwony** ➤ elektroliza wody (energia jądrowa)
- **żółty** ➤ elektroliza wody (energia słoneczna
- **turkusowy** ➤ piroliza metanu (czysty wodór oraz węgiel w fazie stałej)
- **zielony** ➤ elektroliza (odnawialne źródła energii
- biały – geologiczne źródła naturalne

Produkcja i zużycie wodoru



Wodór szary

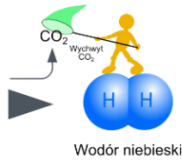






1 kg → 13,3 kg CO_2

η < 60%



Wodór niebieski





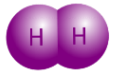


1 kg → 1,7 kg CO_2

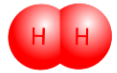
η < 50%



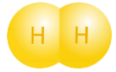
Wodór różowy



Wodór purpurowy

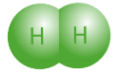


Wodór czerwony

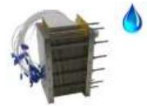


Wodór żółty

4% z elektrolizy



Wodór zielony

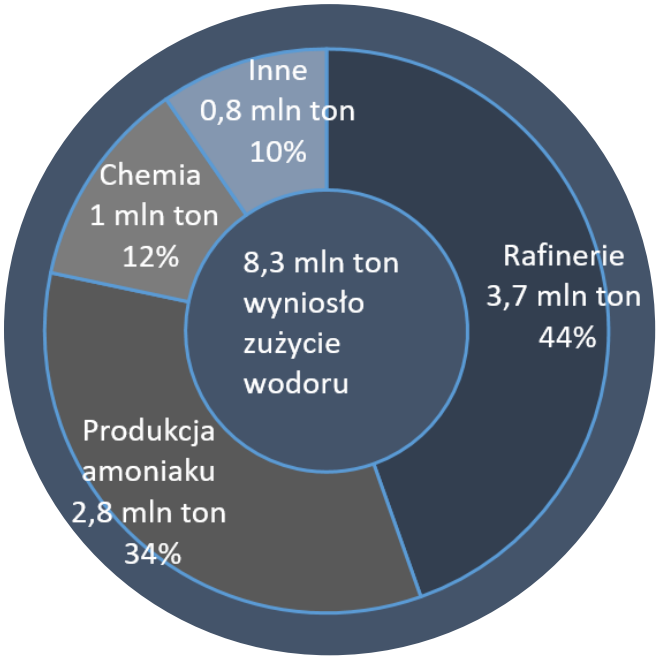


1 kg → 0,5 kg CO_2

η < 60-80%

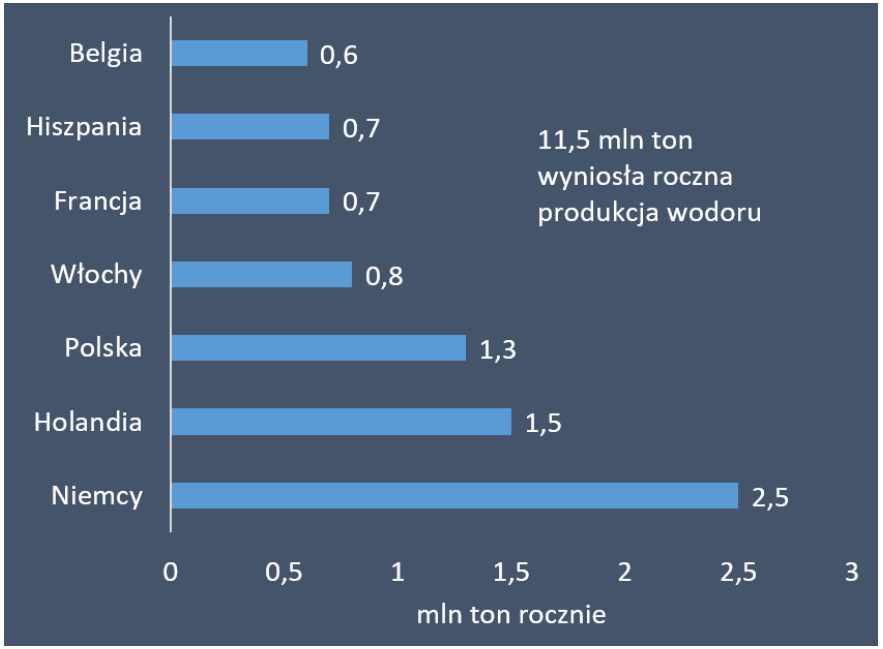
1 kg → 9 dm³ wody + 50 kWh

Zużycie wodoru wg sektorów UE



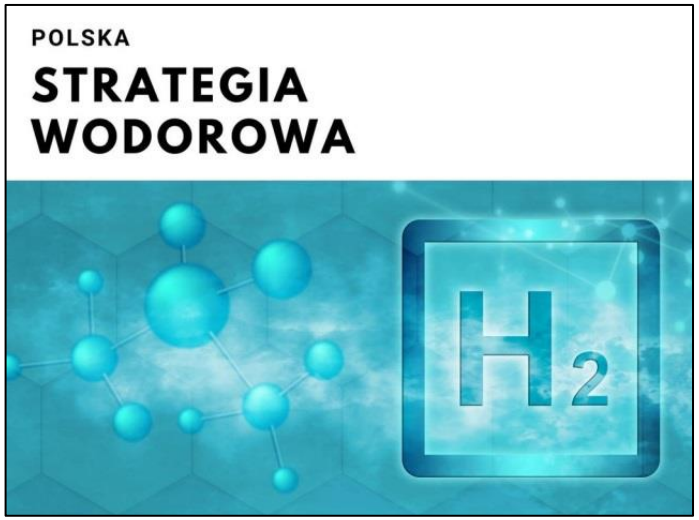
2018 r.

Główni producenci



Polska klasyfikacja wodoru

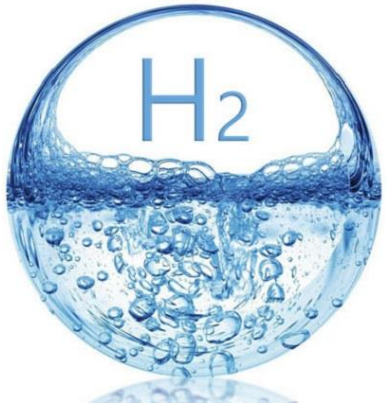
Pojęcia:

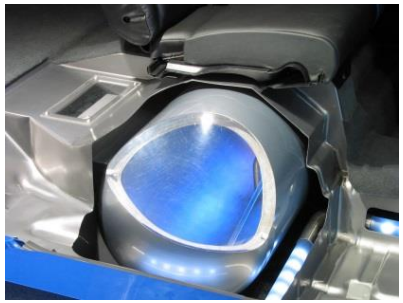


- **Wodór konwencjonalny**
  - Paliwa kopalne, produkcja w PL: 1 mln ton (5 miejsce w EU)
  - Najtańszy, najbardziej emisyjny
- **Wodór niskoemisyjny**
  - Źródła odnawialne lub nieodnawialne z niskim śladem emisyjnym (< 5,8 kg CO_2/kg H_2)
  - Wodór odpadowy – klasyfikowany jako niskoemisyjny (emisja wynika z innych procesów)
- **Wodór odnawialny**
  - Elektroliza wody z OZE (< 1 kg CO_2/kg H_2)
  - Obecnie: brak instalacji + niski poziom komercjalizacji

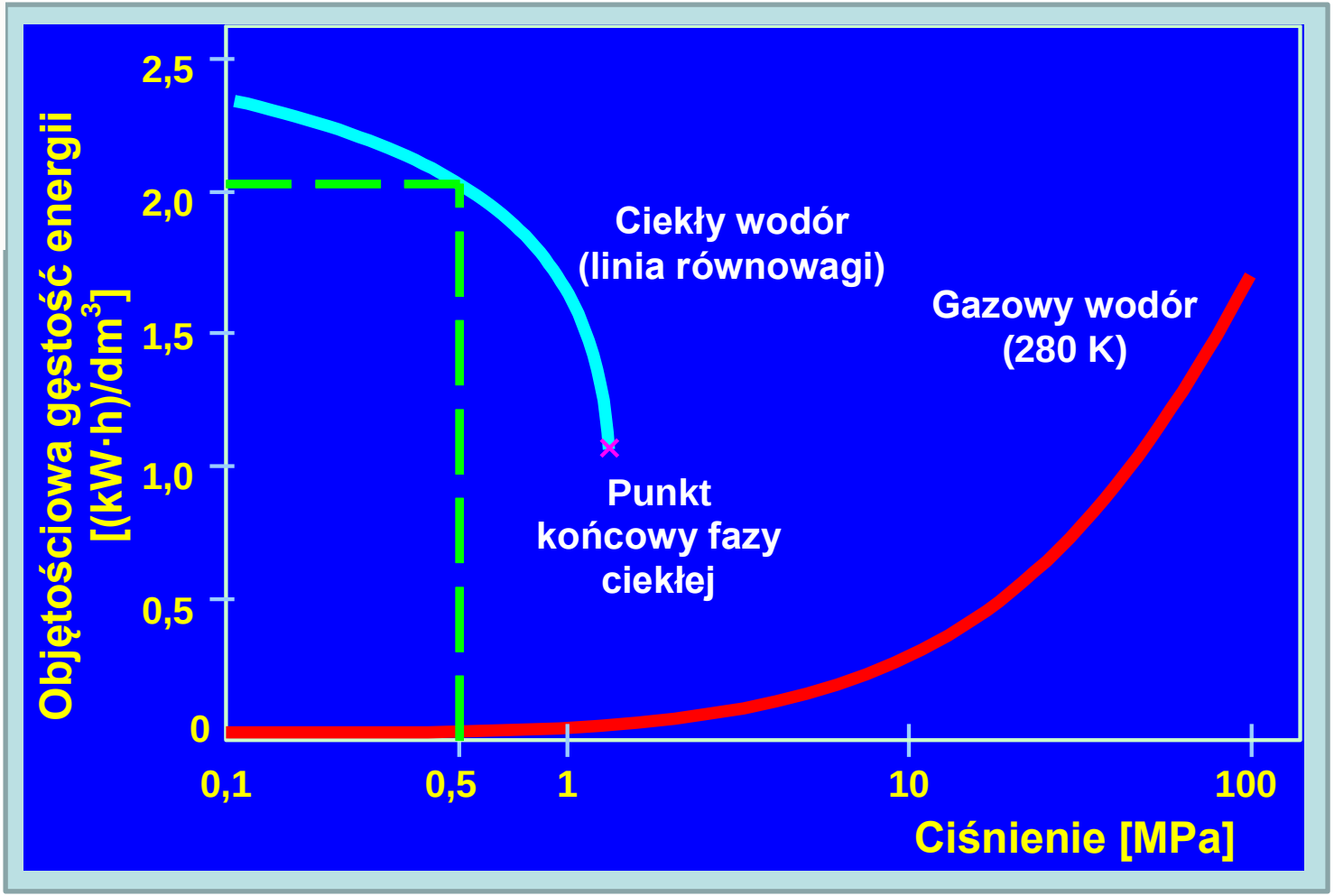
https://biznesalert.pl/polska-strategia-wodorowa-2030-nowa-klasyfikacja-walka-srodki-unijne-energetyka-innowacje-wodor/

Parametry skroplonego i sprężonego wodoru

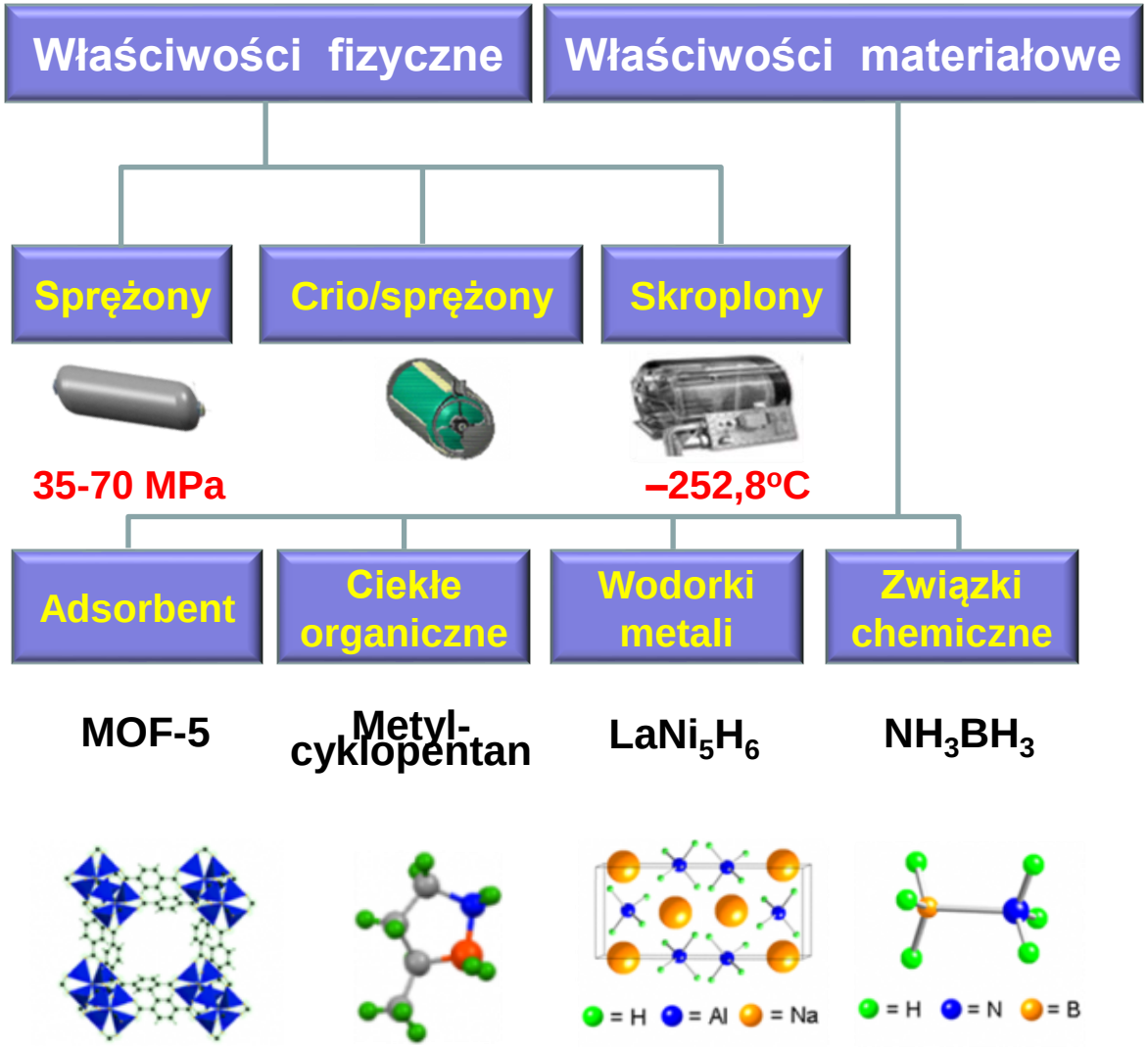


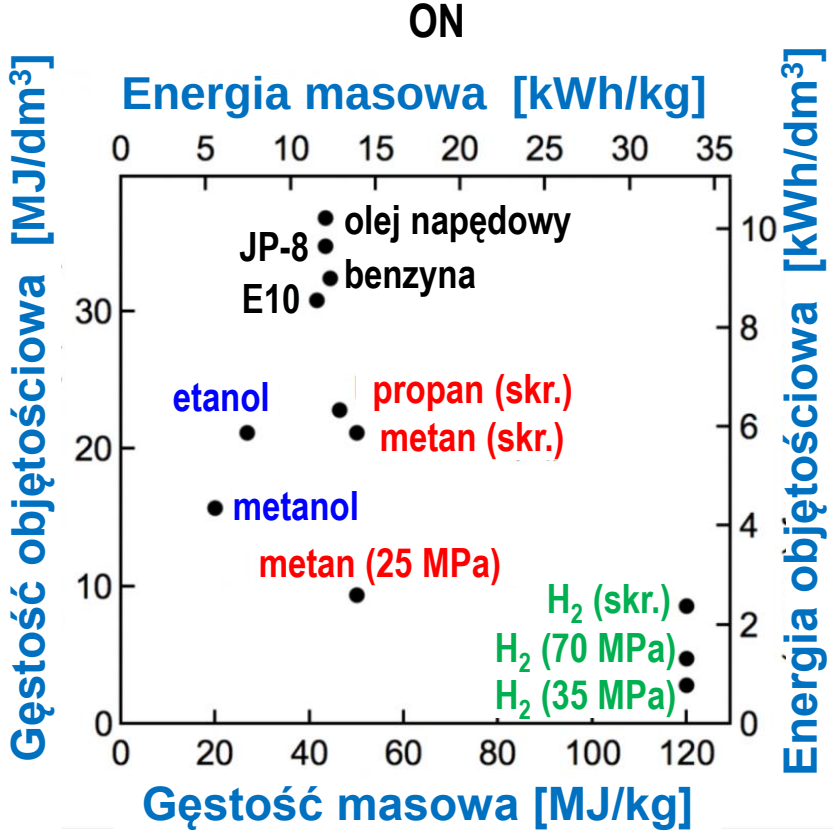






Przechowywanie wodoru



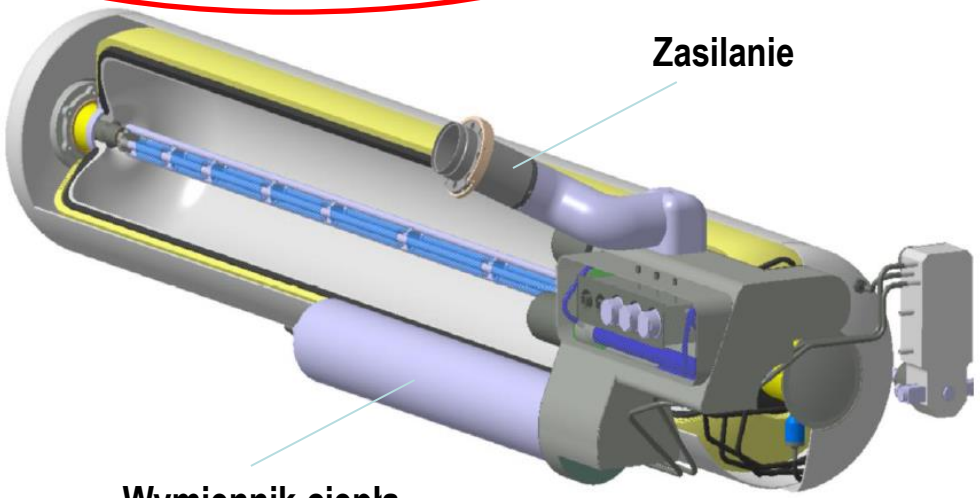


Zbiorniki crio/sprężony wodór

Ciśnienie pracy	≤ 350 bar
Zawór bezp.	≥ 350 bar
Ciśnienie zasilania	CcH_2: 300 bar CGH_2: 320 bar
Czas tankowania	< 5 min
Objętość systemu	~ 235 L
Masa systemu (+ H_2)	~ 145 kg
Przecieki wodoru	<< 3 g/dzień 3-7 g/h (CcH_2) < 1%/rok

Użyteczny zakres pracy: CcH_2: 7,8 kg (260 kWh)
CGH_2: 2,5 kg (83 kWh)

1 kg H_2 → 33,3 kWh



Paliwa jako źródła napędu pojazdów

Paliwo	Skład	E [MJ/kg]	E [MJ/dm^3]	ρ [kg/m^3]	P [bar]	T [°C]
Olej napędowy	C_9-C_{22}	41	34	820-845	otoczenie	otoczenie
Benzyna	C_4-C_{12}	43	32	710-770	otoczenie	otoczenie
GTL	C_9-C_{22}	43	34	775	otoczenie	otoczenie
LPG	Propan, butan	46	25	540	2-8	otoczenie
CNG	Metan	50	9	160-190	200-250	otoczenie
LNG	Metan	50	21	400-500	8	–170/–130
CGH_2	Wodór	120	4,2	28-40	250-700	otoczenie
CcH_2	Wodór	120	9,6	80	280	–220
LH_2	**Wodór**	**120**	**10**	**68**	**4**	**–240**

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

KEYOU – obecny lider dla H_2-ICE
silniki spalinowe zasilane wodorem H_2-ICE – wielką szansą dla napędów

Elektromobilność & Ogniwa Paliwowe (FC)
jako właściwa alternatywna technologia dla wszystkich pojazdów

Przemysł samochodowy - Skoncentrowany na Elektromobilności

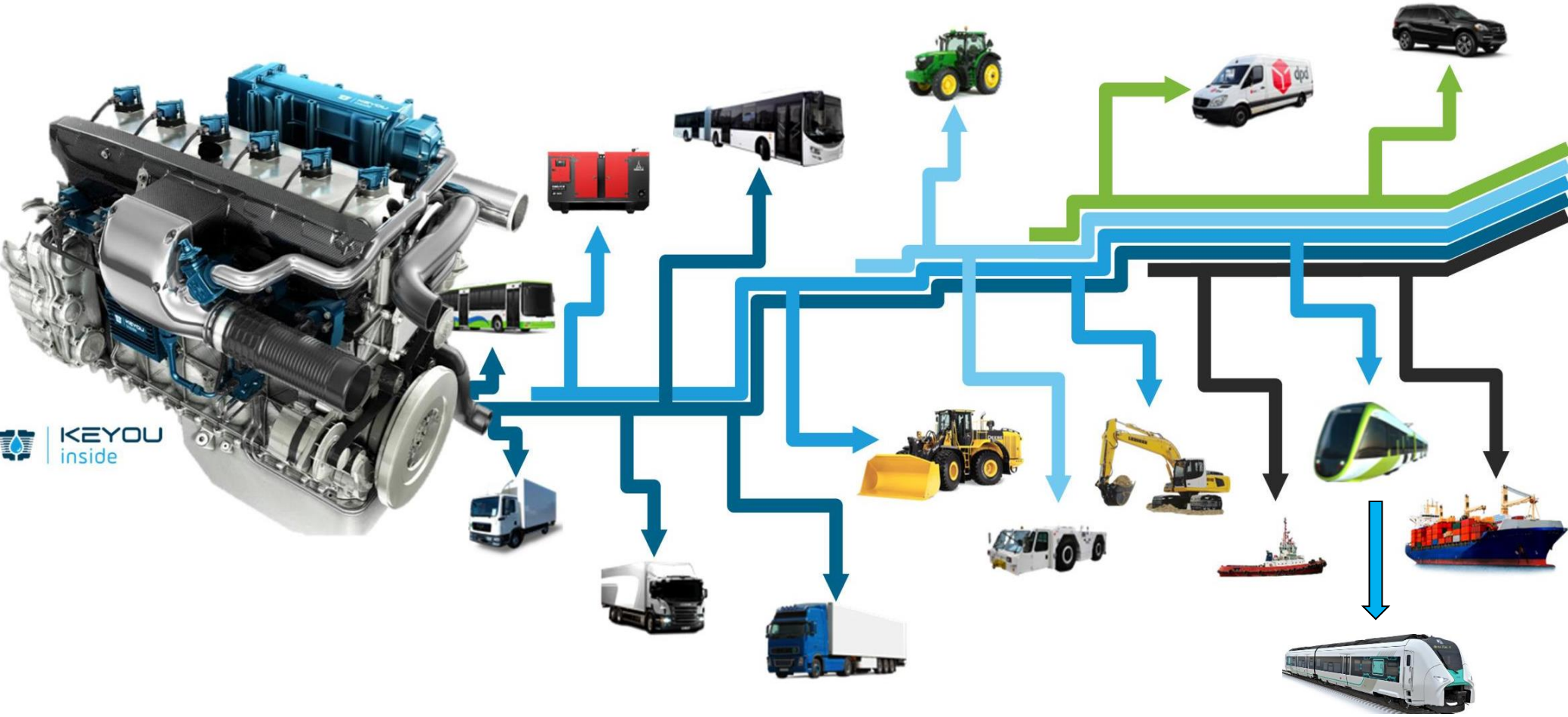
2000 — oś czasu — 2025

KEYOU – Skoncentrowany na silniki spalinowe, zasilane wodorem

BMW Hydrogen 7	MAN Lion's City H_2	Aston Martin Rapide S H_2	KEYOU	DEUTZ TCG 7.8 H_2	Engine & Vehicle Manufacturer	KEYOU inside
						
2000-2011 Produkcja 100 sztuk na cały świat	**2006-2014** Produkcja 14 sztuk Demo do Berlina	**2013** Prototyp na wyścig 24h - Nurburgring	**2015** Fundacja KEYOY	**2017** Koncepcja DEUTZ TCG7.8H_2	**2020** Wielu klientów silniki: 7-14L	**2022** Aplikacje w pojazdach

Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



[g/kWh]	CO_2	NO_x	PM	HC	CO
Diesel	1000	0,46	0,01	0,16	4
H_2 – Diesel	0,08	0,046	0,002	0,01	0,01

* - limity dla Euro VI

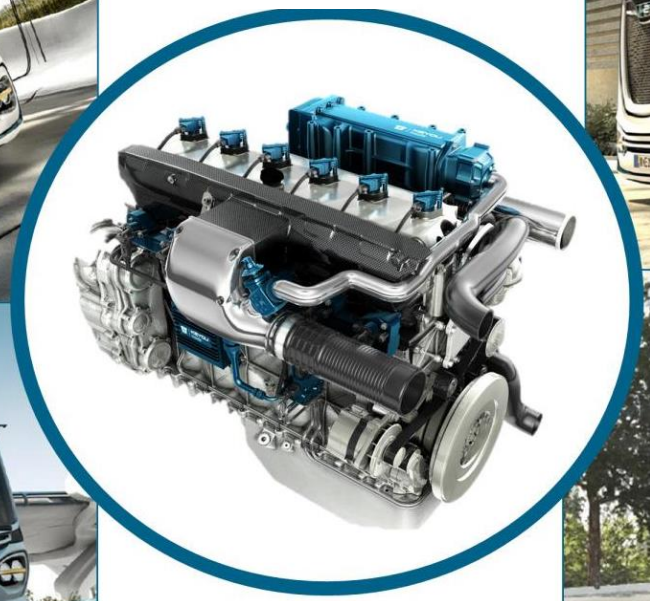
Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

Truck 40 t





Truck 18 t



Coach



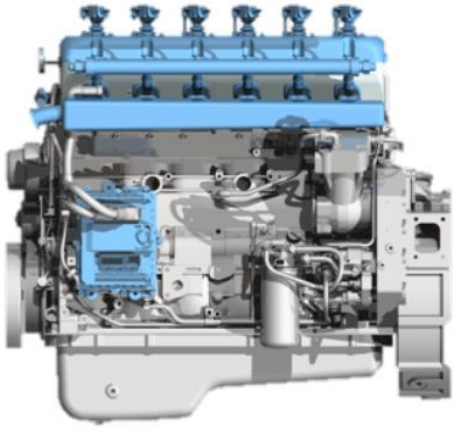
City Bus 12 m Mild Hybrid



Aplikacje w pojazdach

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Wodór ➤ zastosowania transportowe



40 t Truck



Zużycie: 9.9 kg H_2 / 100 km
Zbiornik: 50 - 90 kg H_2 @ 350 bar
Zasięg: 500 - 900 km

18 t Truck



Zużycie: 6.8 kg H_2 / 100 km
Zbiornik: 34 - 55 kg H_2 @ 350 bar
Zasięg: 500 - 800 km

12m Bus



Zużycie: 10.8 kg H_2 / 100 km
Zbiornik: 40 - 55 kg H_2 @ 350 bar
Zasięg: 370 – 500 km

Coach Bus

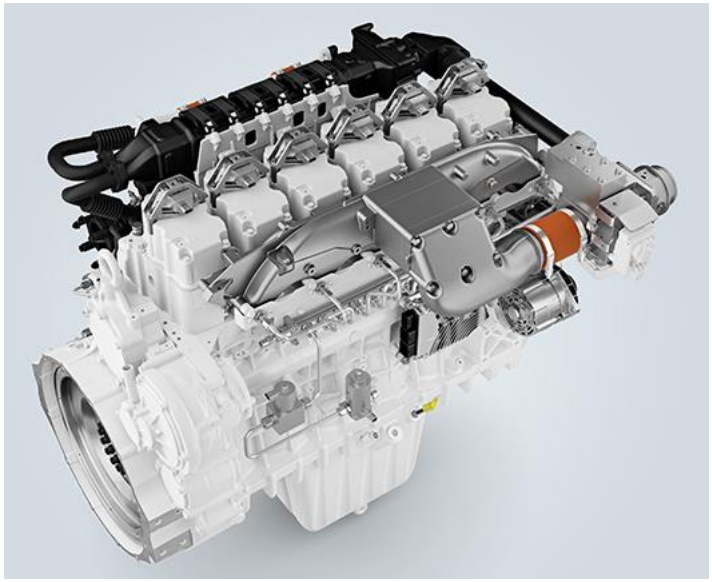


Zużycie: 9.5 kg H_2 / 100 km
Zbiornik: 40 - 55 kg H_2 @ 350 bar
Zasięg: 420 – 570 km

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Aplikacje w silnikach





Cummins X15N:
6R; 15,0 dm^3
z CNG na H2



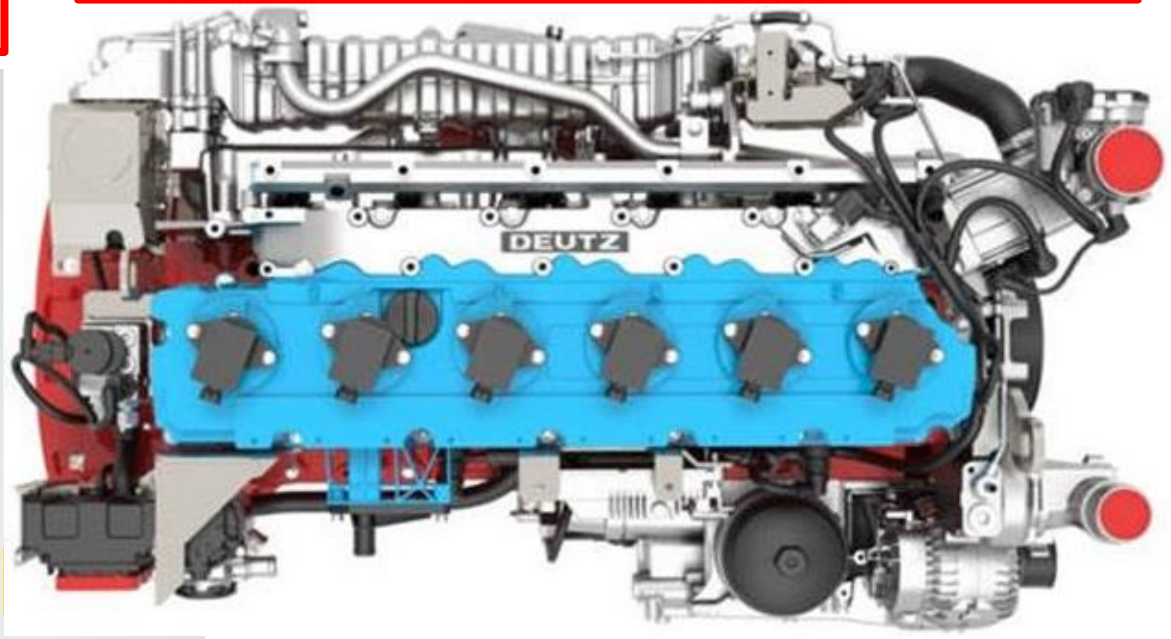
Liebherr 6R H966
H2 – direct injection (DI)
+port fuel injection (PFI)

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Aplikacje w silnikach



Deutz TCG 7.8 H2 + Keyou (produkcja: 2024)



Projekt HyCET
(Hydrogen Combustion Engine Trucks)
Lider Grupa BMW,
Partnerzy Deutz, DHL Freight, Keyou, TotalEnergies Marketing Deutschland i Grupa Volvo

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



Rolls-Royce 12 cylinder Series 4000 L64 engine

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



HPDI H2-ICE – AVL

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Aplikacje w silnikach

Komora wstępna
jet ignition (MJI) active pre-chamber

silniku z ε: 17 na 11







HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

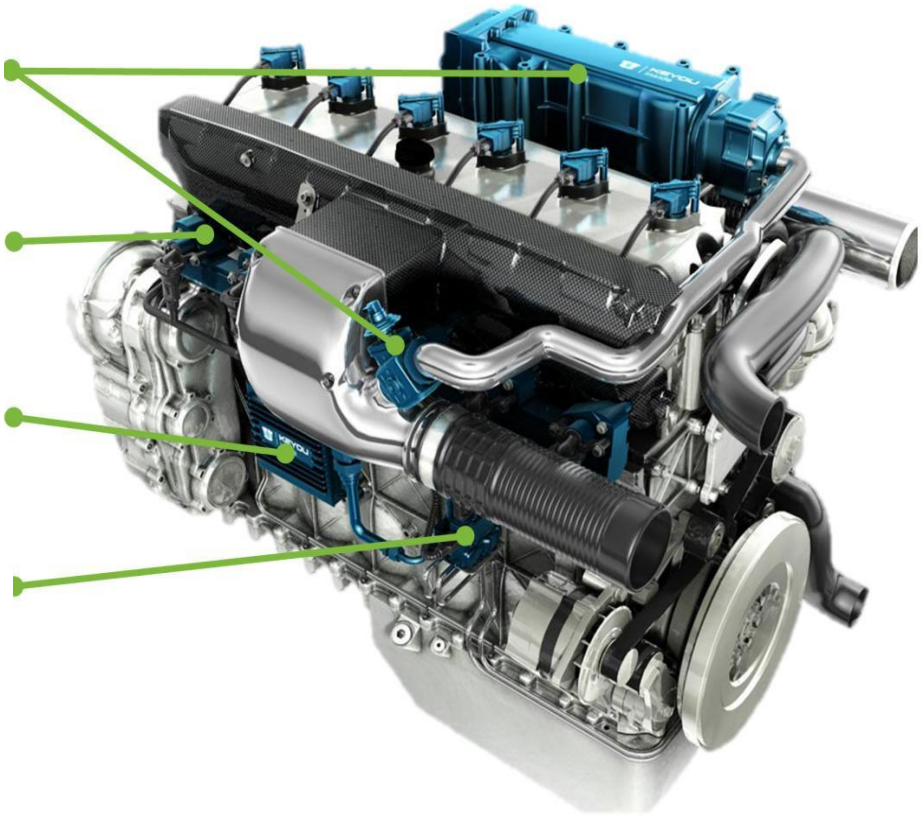
Silniki H2-ICE – wymagają precyzyjnego dostrojenia wszystkich systemów, które zapewniają najlepsze parametry:

SYSTEM EXHAUST GAS RECYRCULATION
Chłodnica i zawór: Duża wydajność chłodnicy i dokładne sterowanie stopniem EGR

SYSTEM WTRYSKOWY
Ciśnienie i wtryskiwacze: optymalizowany proces H_2 wtrysku dla dobrej homogenizacji mieszanki w całym zakresie pracy

SYSTEM ECU: HARDWARE i H_2-SOFTWARE
Strategia mapy silnika: Sterowanie jakością i ilością dawkowania H_2 w całym zakresie pracy wraz ze strategią EGR

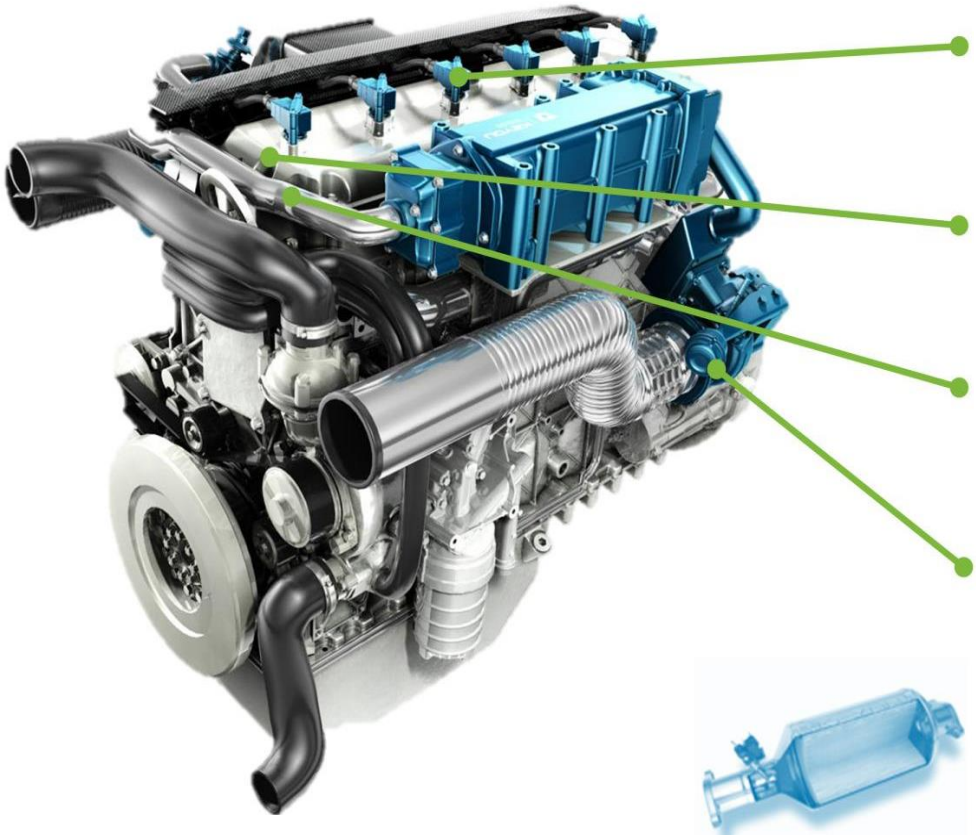
SYSTEM REGULACJI CIŚNIENIA H_2
Elektroniczny regulowany zawór ciśnienia: dokładne i szybkie zmiany sterowania przepływem w całym zakresie pracy



Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Silniki H2-ICE – wymagają precyzyjnego dostrojenia wszystkich systemów, które zapewniają najlepsze parametry:



SYSTEM ZAPŁONOWY
Moduł zapłonowy i świece: napięcie i energia zapłonu dopasowywana do warunków zapłonu

SYSTEM ROZRZĄDU
Zawory i przylgnie zaworowe ze specjalnych materiałów dla max. trwałości, bo H_2 nie ma właściwości smarnych

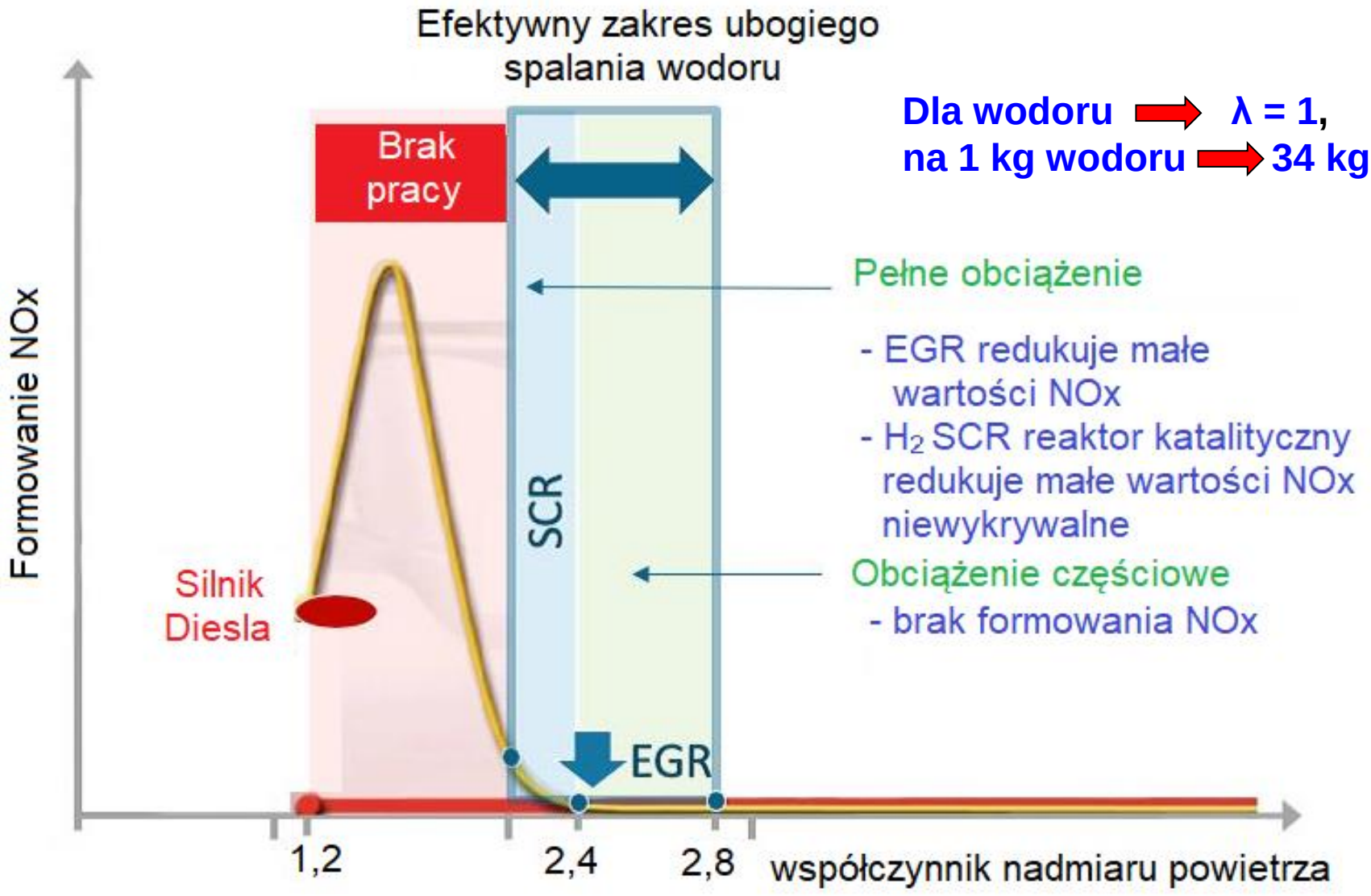
SYSTEM WĘZŁA TŁOKOWEGO
Tłok i pierścienie zapewniające dużą homogenizację mieszanki i uniknięcie nieprawidłowego spalania i niskiego wnikania oleju smarującego

SYSTEM DOŁADOWANIA
Turbosprężarka: specjalne wymagania ze względu na małą entalpię gazów wylotowych dla wysokiego doładowania i dużego momentu obrotowego;
+ E-doładowanie

SYSTEM OCZYSZCZANIA SPALIN
Prosty (SCR), wydajny, niskokosztowy

Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

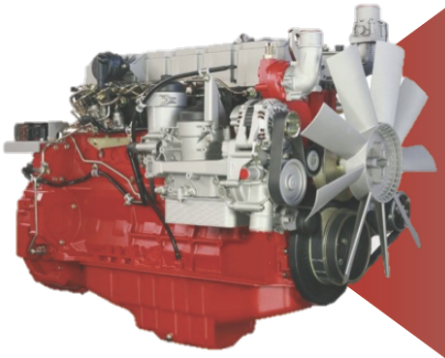
HDV – silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



Dla wodoru ⇒ λ = 1,
na 1 kg wodoru ⇒ 34 kg powietrza

Źródło: Korn, 41 Wiener Symposium, 2020

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



CO_2 [g/kWh]	1000
NO_x	0,46
PM	0,01
HC	0,16
CO	4

Nowe komponenty silnika



ECU p-reg. wtrysk zapłon turbo kat.

Adaptacja elementów silnika



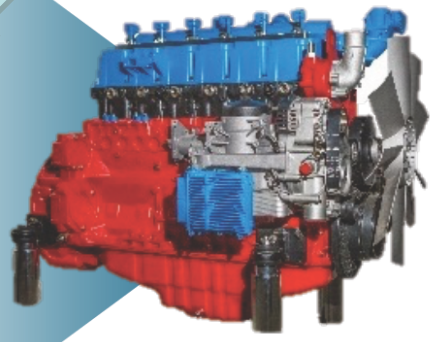
system spalania głowica dolot

Adaptacja oprogramowania

- ✓ nowe funkcjonalności
- ✓ nowe strategie sterowania

Definicja EU dot. *zero emission*: < 1 g CO_2/kWh

CO_2 [g/kWh]	0,08
NO_x	0,046
PM	0,002
HC	0,01
CO	0,01



TCD 7.8 Diesel

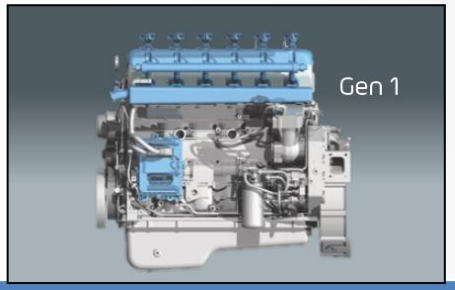
TCG 7.8 H_2

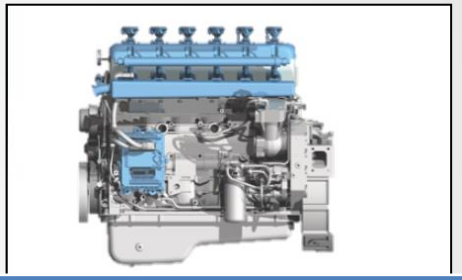
Modyfikacje silnika ZS do „zeroemisyjnego" napędu

Modyfikacje silnika spalinowego (ON ▶ H_2)

HDV – silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)







Silnik	MAN H2676 UH01 (2006)	DEUTZ TCG7.8 PFI	DEUTZ TCG7.8 DI
Liczba cyl.	6	6	6
Vss	12,8 dm^3	7,8 dm^3	7,8 dm^3
Zasilanie	Wolnossący	Turbodoładowany	Turbodoładowany
Ne	**150 kW**	**180 kW**	**210 kW**
Mo	760 Nm	950 Nm	1100 Nm
Mieszanki	Stechiometryczne	Ubogie	Ubogie
System NO_x	Reaktor trójfunkcyjny	EGR + H_2 SCR	EGR + H_2 SCR
Zużycie H_2	**21,6 kg H_2/100 km**	**10,7 kg H_2/100 km**	**9,7 kg H_2/100 km**

Dwukrotny przyrost

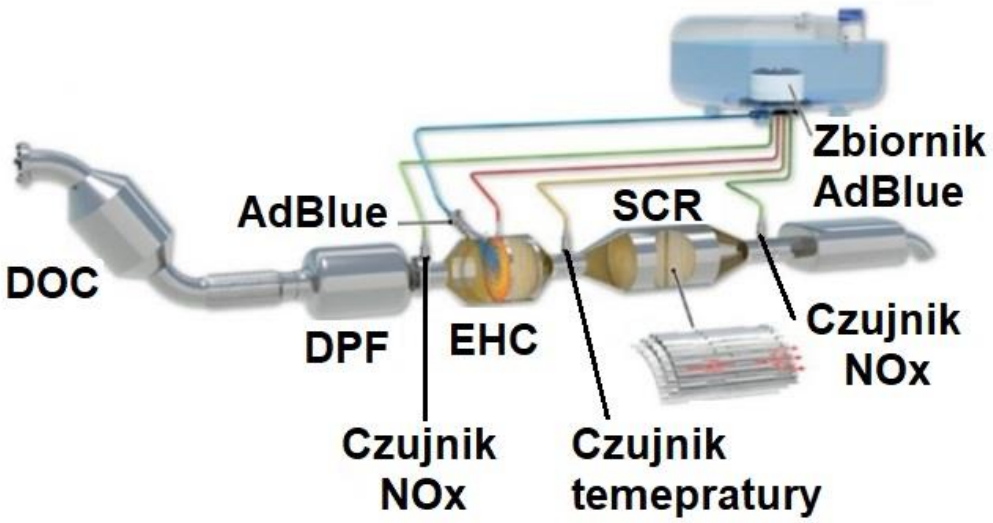
+130% mocy

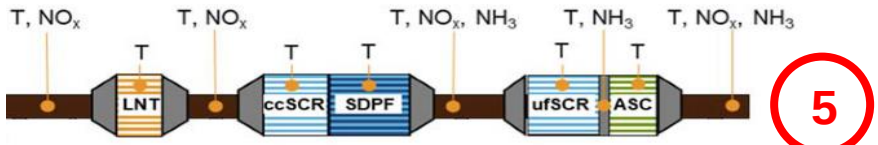
Połowa zużycia

–60%

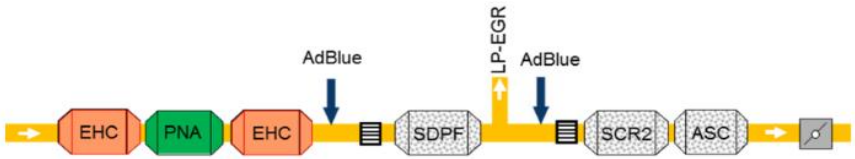
HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

DIESEL



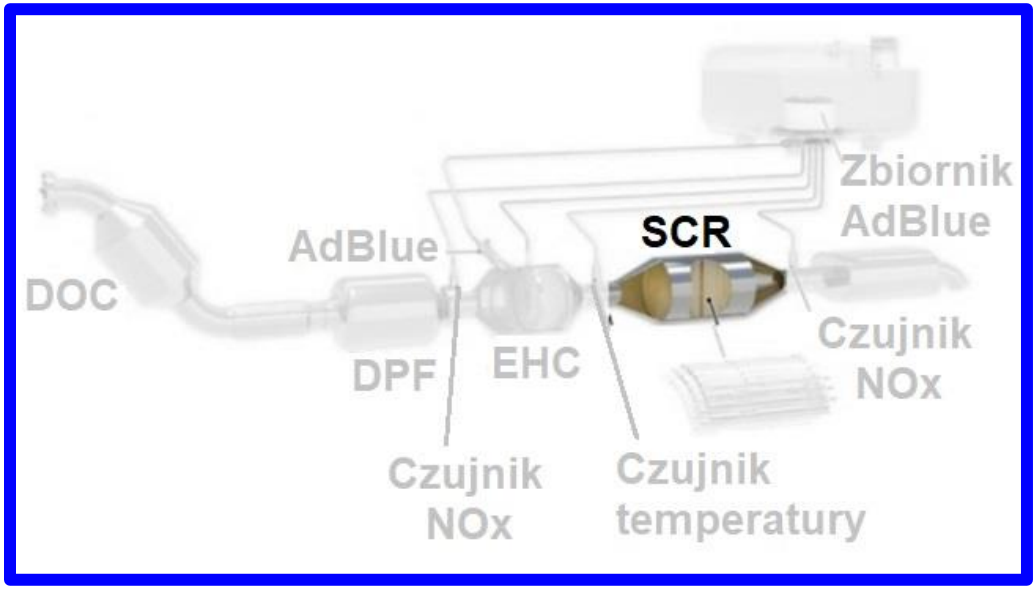


5

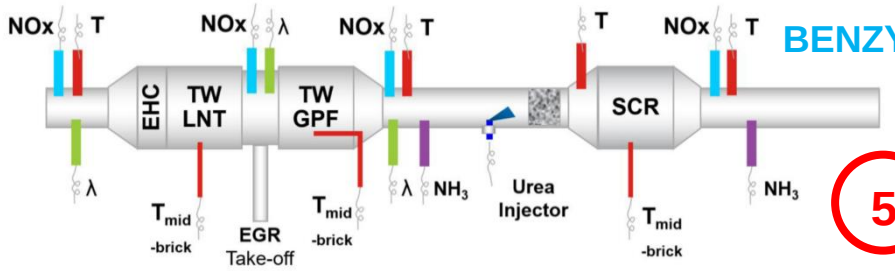


6

H_2 ICE



BENZYNA



5

Porównanie systemu oczyszczania spalin silników: Diesla i H_2-ICE

HDV –
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Hybrydowa wersja silnika H2-ICE – jako kolejny etap rozwoju

System magazynowania energii
(system zbiorników)

Magazynowanie wodoru

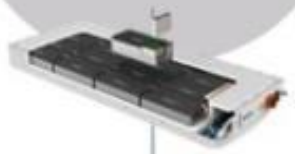


System napędowy
(silnik spalinowy)

Silnik zasilany wodorem (KEYOU)



System akumulatorów



Silnik elektryczny

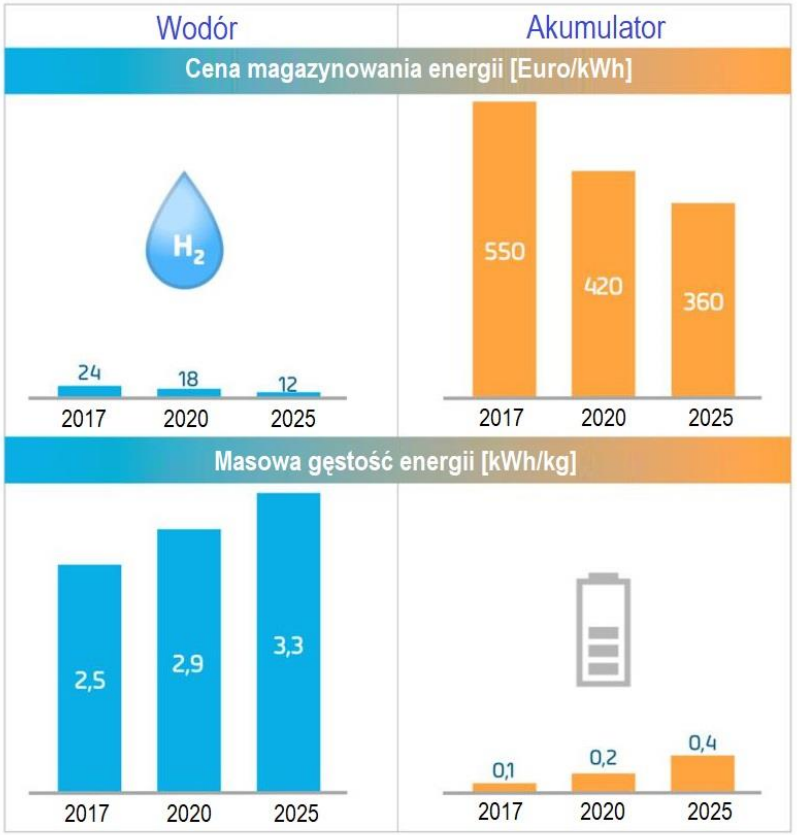




Zalety hybrydyzacji:

- zmniejszenie zużycia paliwa
- duża trwałość
- bardzo mała emisja hałasu
- dobry wynik dla użytkowników

HDV – Porównanie alternatywnych napędów
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)



Magazynowanie energii w wodorze w porównaniu z pojazdami elektrycznymi HDV

H_2 > 20 x większa gęstość energii

H_2 > 20 x mniejszy koszt

Porównanie gromadzenia energii w akumulatorze i w wodorze pod względem kosztów i masowej gęstości energii według KEYOU

HDV – Porównanie alternatywnych napędów

silniki spalinowe zasilane wodorem (H_2-ICE)



Wysokoenergetyczne akumulatory Li-Ion

Zasięg

45 km

Masa całkowita

18 t



0km 200km 400km 600km

Założenie: gęstość energii 100 Wh/kg, efektywność akumulatorów dwa razy większa niż ICE, zużycie energii 88 kWh/100 km

Założenie: ta sama masa układu magazynowania energii ~ 420 kg



Zbiornik wodoru (ciśnienie 350 bar)

Zasięg

450 km !

Masa całkowita

18 t



0km 200km 400km 600km

Założenie: zbiornik 350 bar, 30 kg wodoru, gęstość energii 2530 Wh/kg, zużycie paliwa 6,8 kg wodoru/100 km

Porównanie zasięgu pojazdu elektrycznego i pojazdu z silnikiem spalinowym, zasilanego wodorem, założenie: ta sama masa układu magazynującego energię

HDV – Porównanie alternatywnych napędów
silniki spalinowe, zasilane wodorem (H_2-ICE)

Ogniwo paliwowe		Zasilanie wodorem
	⊕ Zasięg	⊕ 
	⊕ Czas napełniania	⊕
Koszt	⊖	~ ekwiwalent Diesla
Czystość wodoru (99,999%)	⊖	98%
Wydajny system chłodzenia	⊖	Nie
Wprowadzenie na rynek	⊖	Krótki
Serwis	⊖	~ ekwiwalent Diesla

Porównanie właściwości ogniw paliwowych i silnika spalinowego, zasilanego wodorem

HDV – Porównanie alternatywnych napędów

silniki spalinowe (ZS; ZI i H_2-ICE), ogniwa paliwowe (FC)

	ZS	EV	FC	H2
Koszt	✓	✗	✗	–
Zasięg	✓	✗	✓	✓
Ładowność	✓	✗	–	✓
Niezawodność	✓	–	–	✓
Serwis	✓	–	✗	✓
Klimat	✗	–	✓	✓
Zanieczyszczenie	–	✓	✓	✓

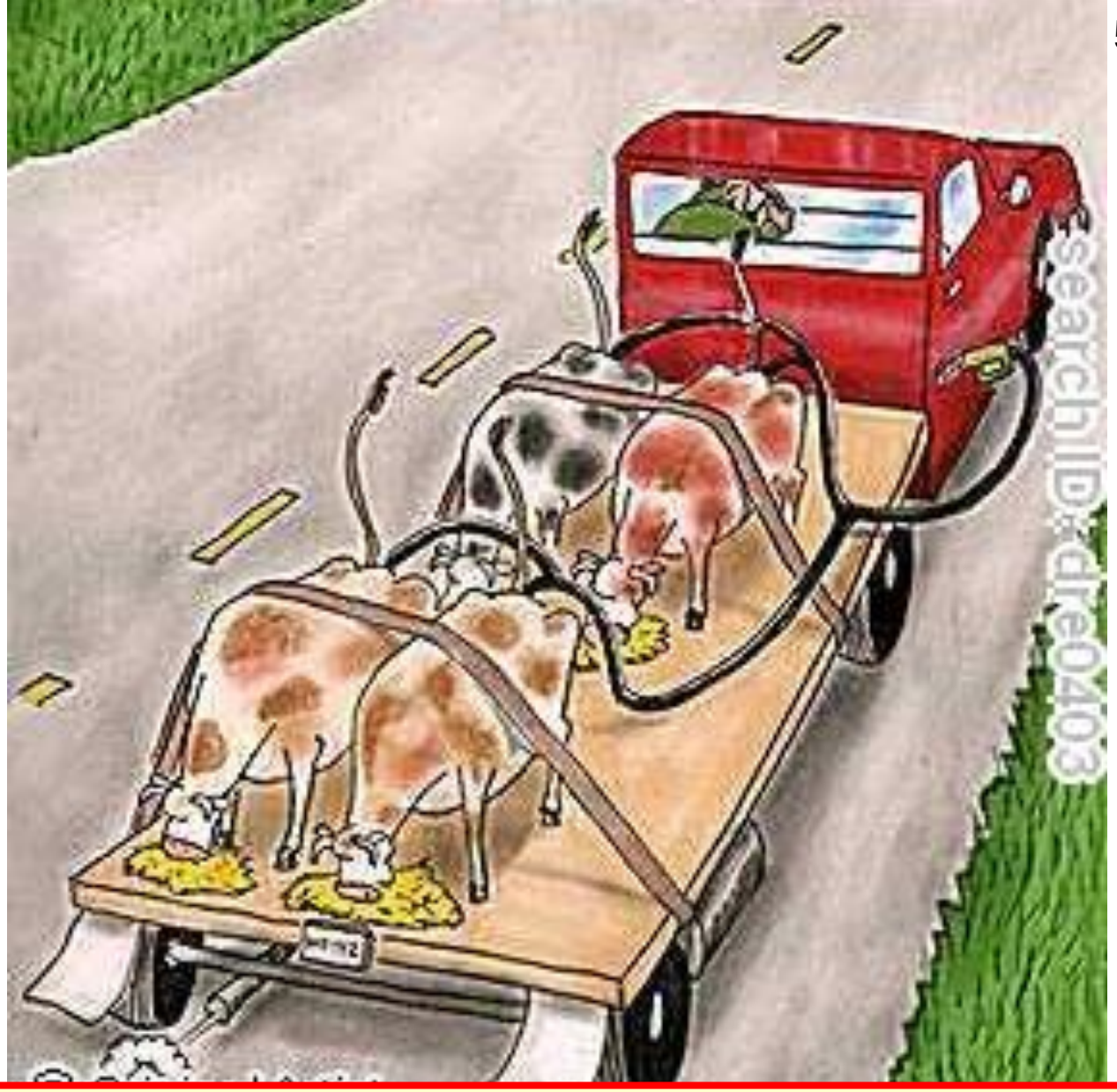
Stopień spełnienia dzisiejszych wymagań dla alternatywnych technologii napędowych: ✗ - słaby; – - średni; ✓ - dobry

W niedalekiej przyszłości 2020–2030

Silniki spalinowe wciąż będą niezbędne – zmieni się tylko rodzaj paliwa:

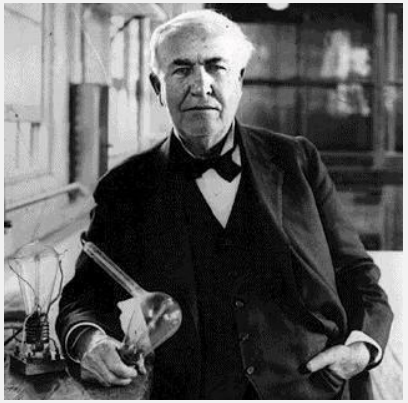
wodór,

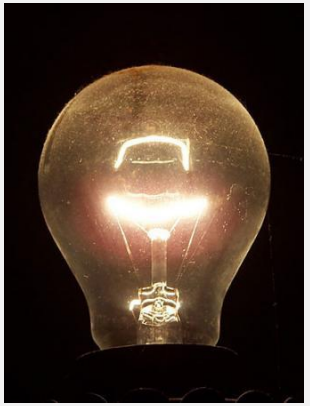
paliwa syntetyczne



Jedna krowa rocznie, oprócz metanu, produkuje tyle CO_2 co samochód osobowy przy średnim rocznym przebiegu

Czy silnik spalinowy podzieli los żarówki żarowej???

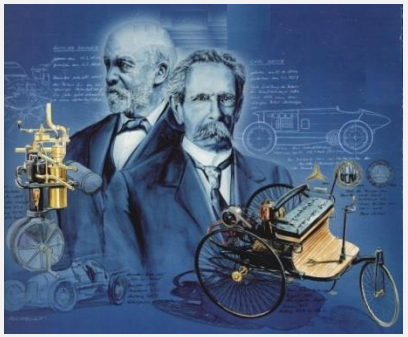


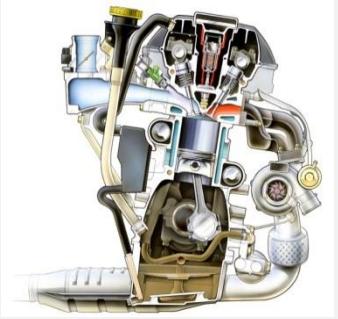


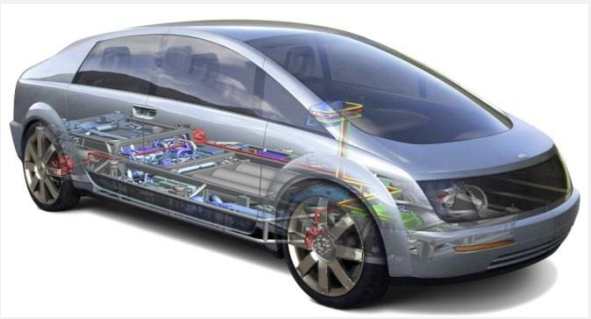




XVIII w.. **XIX w.** **XX w..** **XXI w.**









Silnik H2 Riviera



Silnik H2 Keyou



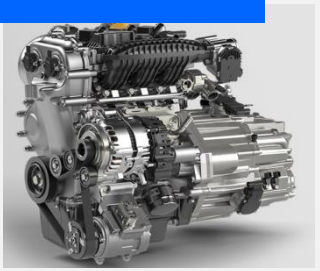
Silnik H2 MAN



Silnik H2 AVL



Silnik H2 FEV



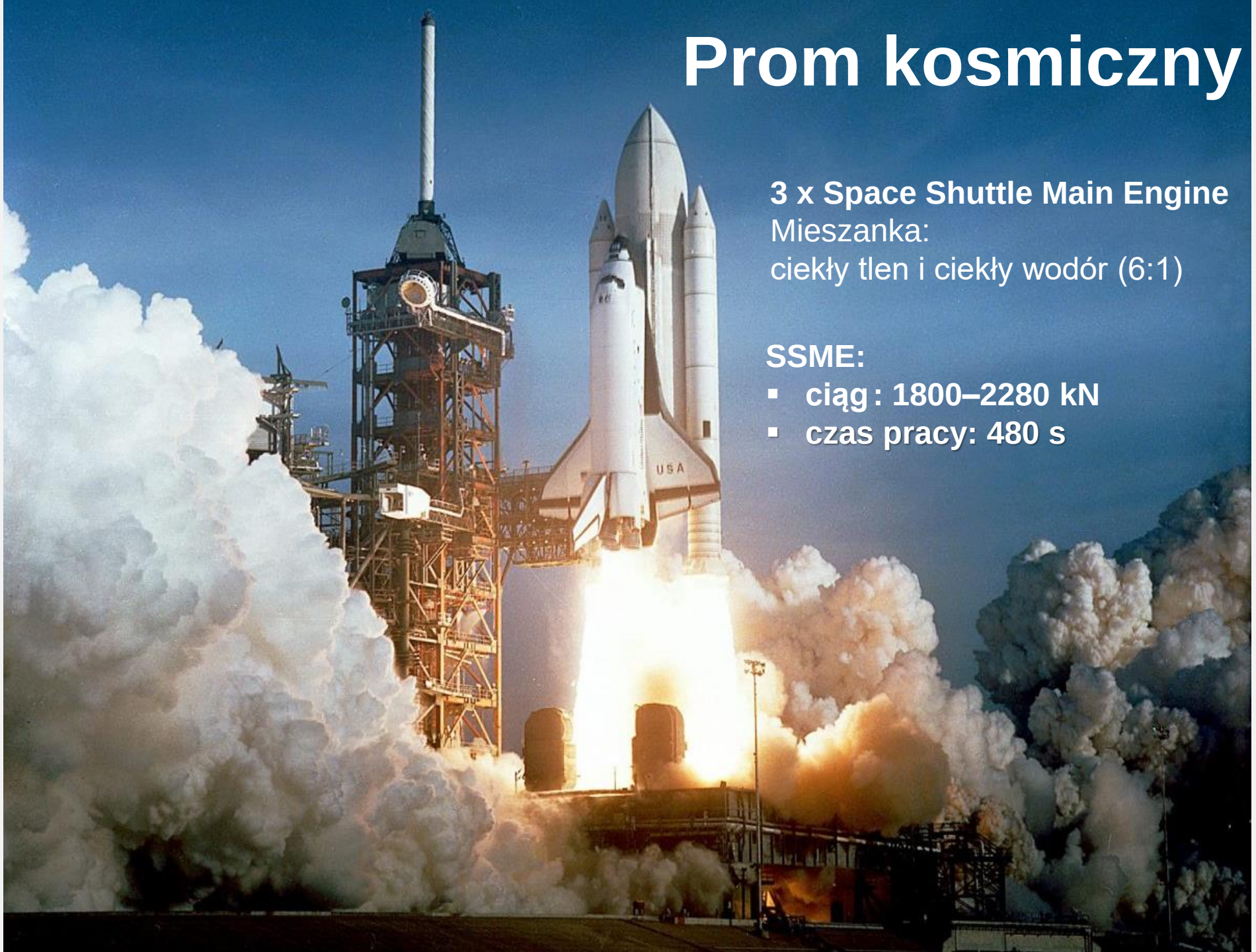
Silnik H2 Toyota



Czy zasilanie wodorem uratuje silnik spalinowy?



Prom kosmiczny



3 x Space Shuttle Main Engine
Mieszanka:
ciekły tlen i ciekły wodór (6:1)

SSME:

- **ciąg : 1800–2280 kN**
- **czas pracy: 480 s**

W ramach trwającej Debaty zachęcamy do zadawania pytań.

Forma prezentacji miała na celu przekazanie treści w możliwie przystępny sposób. Z uwagi na złożoność materii dotyczącej układów napędowych pojazdów mechanicznych, w referacie poruszono szereg zagadnień, które mogą jednak jeszcze wymagać merytorycznego pogłębienia.

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz, multi dr h.c.
dr inż. Maciej Andrzejewski

Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych
merkisz@ptnss.pl

Stowarzyszenie Ekspertów i Menedżerów Transportu Szynowego
m.andrzejewski@seim-tsz.pl

Dziękujemy za uwagę

