

2. přednáška

EMISE SPALOVACÍCH MOTORŮ A PROSTŘEDKY PRO JEJICH SNIŽOVÁNÍ

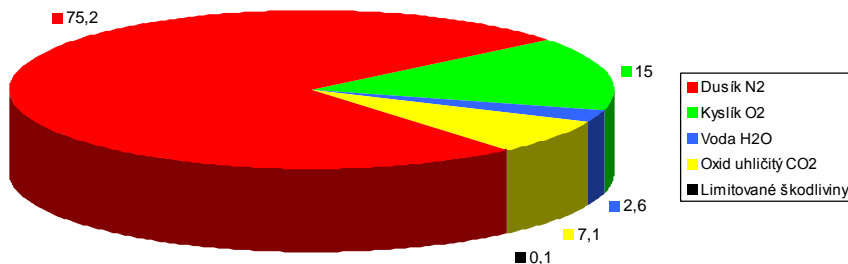
Ing. Adam Polcar, Ph.D.
email: adam.polcar@mendelu.cz



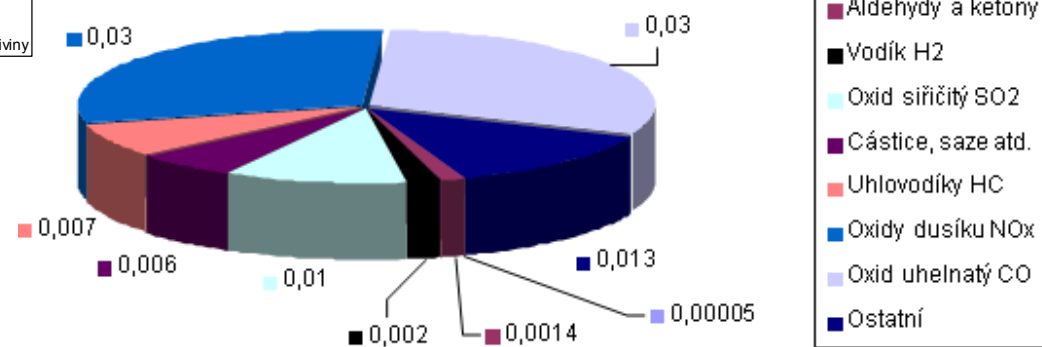
SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

- neškodné látky
 - dusík N_2
 - kyslík O_2
 - vodní páry H_2O a inertní plyny např. Argon
 - „oxid uhličitý CO_2 “

- škodlivé látky
 - oxid uhelnatý CO
 - oxidy dusíku NO_x
 - nespálené uhlovodíky C_xH_y
 - pevné částice



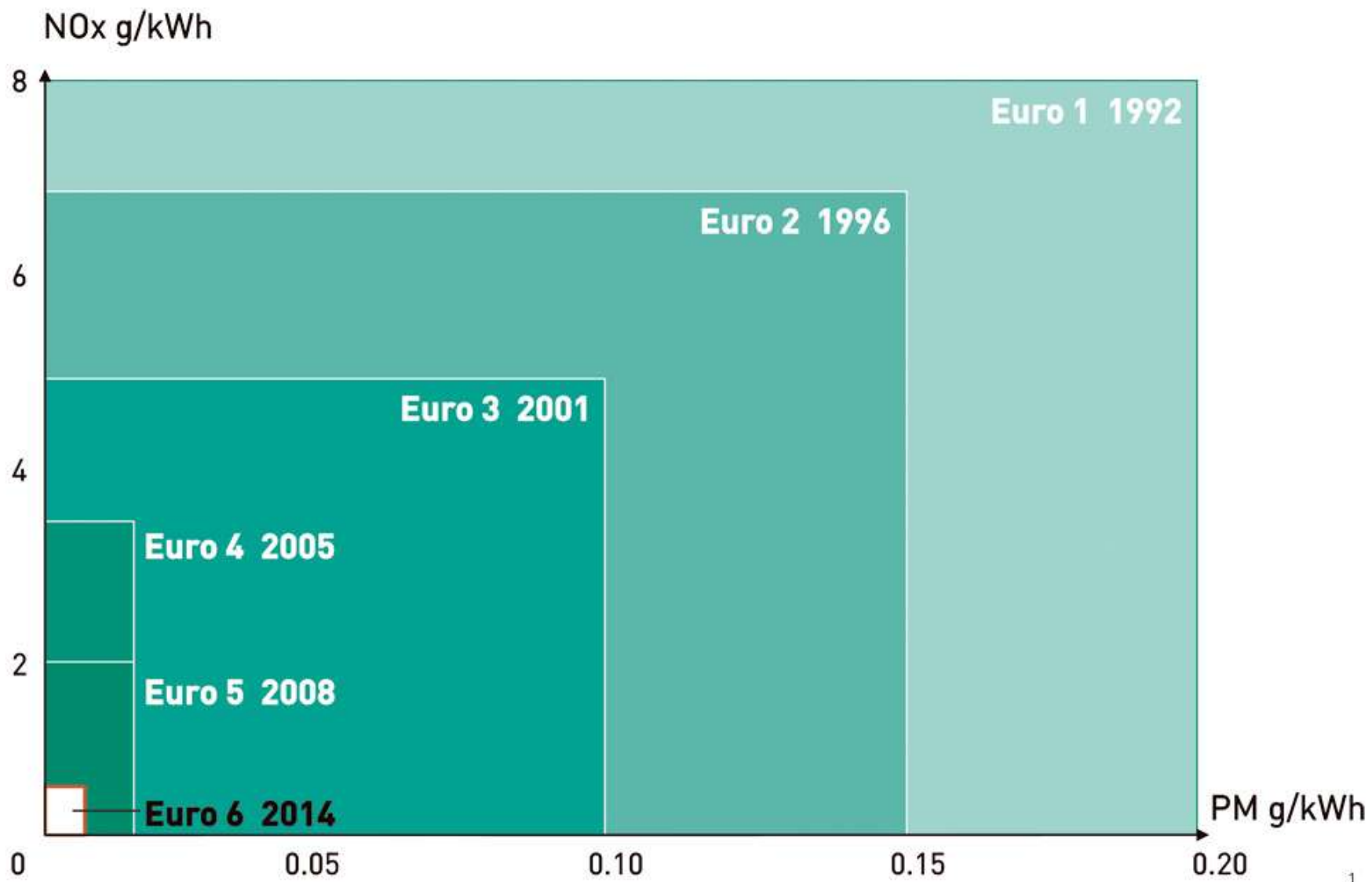
Pro oxidaci 1 kg nafty se spotřebuje 3,4 kg O_2 , to znamená 14,78 kg vzduchu.



EMISNÍ LIMITY

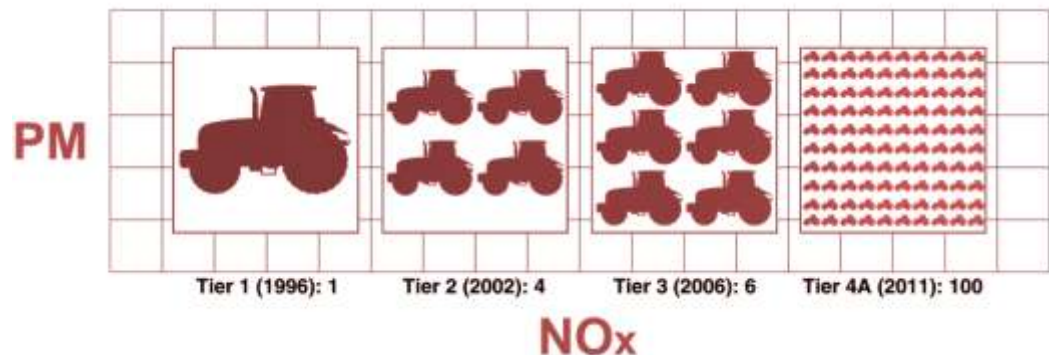
- první právní předpisy se objevily v roce 1997 (směrnice 97/68/ES)
- současné emisní předpisy vychází ze směrnice 2005/13/ES o opatřeních proti emisím plyných znečišťujících látek a znečišťujících částic z motorů používaných k pohonu zemědělských a lesnických traktorů.
- směrnice 2010/22/EU - týkající se schvalování typu zemědělských a lesnických traktorů
- v přípravě směrnice Stage V - platnost od 1.1.2019

Power P_n kW	NO _x g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	Particulates g/kWh	Date*
	NO _x + NMHC				
Stage III A					
$19 \leq P_n < 37$	7.5		5.5	0.6	2007
$37 \leq P_n < 75$	4.7		5.0	0.4	2008
$75 \leq P_n < 130$	4.0		5.0	0.3	2007
$130 \leq P_n \leq 560$	4.0		3.5	0.2	2006
Stage III B					
$37 \leq P_n < 56$	4.7		5.0	0.025	2013
$56 \leq P_n < 75$	3.3	0.19	5.0	0.025	2012
$75 \leq P_n < 130$	3.3	0.19	5.0	0.025	2012
$130 \leq P_n \leq 560$	2.0	0.19	3.5	0.025	2011
Stage IV					
$56 \leq P_n < 130$	0.4	0.19	5.0	0.025	Oct 2014
$130 \leq P_n \leq 560$	0.4	0.19	3.5	0.025	2014



Co je Tier ?

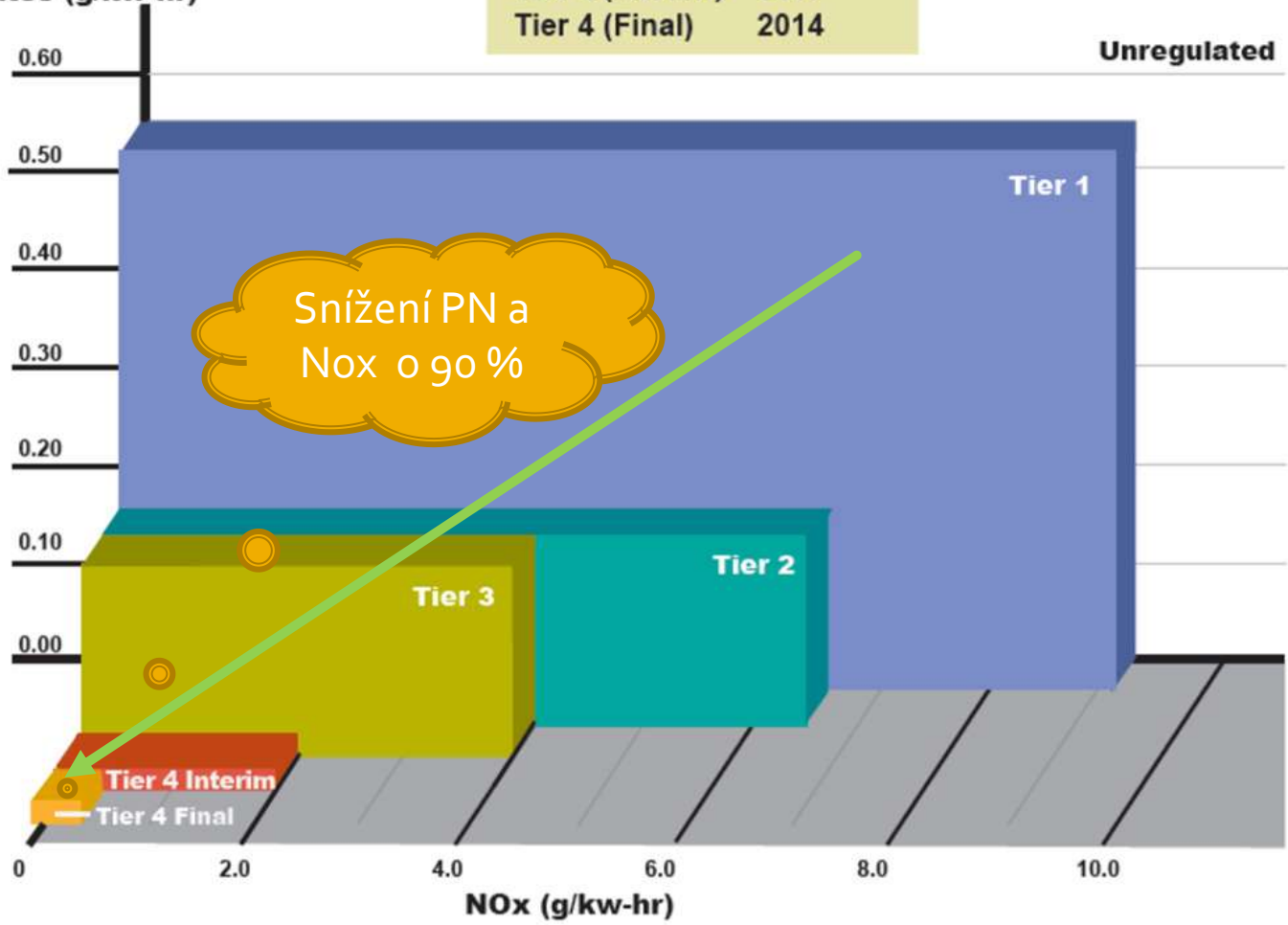
- Od roku 1996 byly nastaveny emisní cíle agenturou EPA (Environmental Protection Agency) v USA a Evropskou unií.
- Hlavní zaměření u těchto cílů je snížení oxidů dusíku (NO_x) a pevných částic (PM).
- Snížení pevných částic PM a oxidů dusíku NO_x se zavádí postupně ve dvou stupních. První stupeň je Tier 4A/Stage IIIB a druhý stupeň je Tier 4B/Stage IV.
- Tier 4B nařizuje 90% snížení pevných částic PM a oxidů dusíku NO_x proti normě Tier 3.



US EPA Non-Road Regulations (130-560kw)

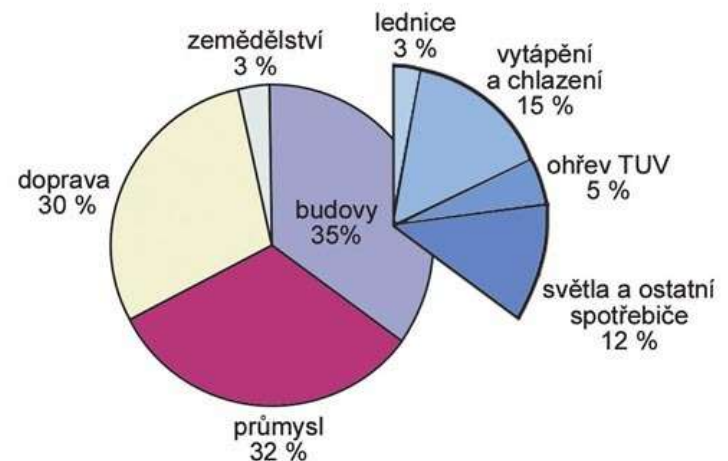
Tier 1	1996
Tier 2	2001-2003
Tier 3	2005-2006
Tier 4 (Interim)	2011
Tier 4 (Final)	2014

Particulates (g/kw-hr)



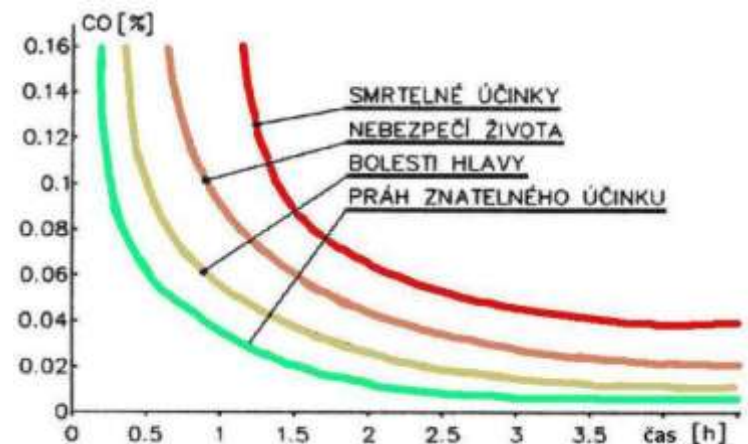
Oxid uhličitý CO₂

- bezbarvý, málo reaktivní stabilní plyn
- produktem dokonalé oxidace paliva – vzniká slučováním uhlíku s kyslíkem
- při koncentracích 8-10% ve vzduchu pro člověka nebezpečný
- řadí se k tzv. skleníkovým plynům
- není administrativně limitován
- slouží jako souhrnný diagnostický signál – slouží jako měřítko pro kvalitu spalování, vypovídá o těsnosti výfukové soustavy
- produkce CO₂ při dokonalém spálení 1 kg nafty je 3,15 kg



Oxid uhelnatý CO

- ✓ bezbarvý, bez chuti a zápachu
- ✓ vysoce toxický – váže se rychle na hemoglobin a tím blokuje okysličování krve
- ✓ produktem nedokonalé oxidace paliva – vzniká při spalování s nedostatkem kyslíku: **hmotově – bilanční příčina**
- ✓ vzniká i při spalování s vysokým přebytkem vzduchu díky zpožděnému nebo málo aktivnímu spalování s nízkou reakční rychlostí zejména na ochlazovaných stěnách a ve zhášecích zónách (**reakčně – kinetická příčina**)
- ✓ v atmosféře oxiduje na oxid uhličitý
- ✓ slouží jako souhrnný diagnostický signál



Nespálené uhlovodíky C_xH_y

- příčiny vzniku jsou srovnatelné s emisemi CO
- vysoce toxické - karcinogenní a mutagenní
- jsou částmi nespáleného paliva
- tvořeny – nasycenými, nenasycenými a polycyklickými aromatickými uhlovodíky, dále např. aldehydy atd.
- podmínky vzniku jako u emisí CO (produktem nedokonalé oxidace paliva)
- vzniká i v oblasti chudých směsí (dochází k výpadkům zapalování a ke zpožděnému nebo málo aktivnímu spalování)
- vzniká i v místech kam se plamen nemůže dostat a při uhasínání plamene u chladných stěn SP
- vyšší podíl ve výfukových plynech poukazuje na energickou ztrátu

Oxidy dusíku NO_x

- vznik: při vysokých teplotách v oblasti chudých směsí
při vysokých tlacích
- podmínky vzniku: A) vysoké teploty, které aktivují reakci pomalu reagujícího dusíku ze vzduchu
B) volný kyslík, který už nemůže reagovat s uhlíkem a vodíkem
- tvoří je zejména - oxid dusnatý NO (95 %) , oxid dusičitý NO₂, oxid dusný N₂O, podporují tvorbu smogu (C_xH_y), ozónu a kyselých dešťů, u člověka omezují jeho plicní funkce



Pevné částice

- podle EPA (Environmental Protection Agency) definovány jako všechny pevné částice, které jsou při teplotě $51,7^{\circ}\text{C}$ v naředěném plynu v pevné nebo kapalně formě zachyceny na filtru
- vznikají při nedokonalém spalování bohatých směsí bez přístupu kyslíku nebo při rychlém ochlazení spalin
- minimální teplota pro tvorbu sazí je 1400°C
- řazeny do rakovinotvorných látek
- u vznětových motorů 3x větší produkce než u zážehových – důvodem – krátká doba pro přípravu směsi - pro její homogenizaci – lokální nedostatek i přes vysokou hodnotu λ).



Pokud nemá studené palivo dostatek času pro smísení s horkým vzduchem, nedochází k reakci oxidační, nýbrž k reakci krakovací (rozklad řetězců uhlovodíku a odštěpení uhlíku). Čistý uhlík chemicky reaguje jen velmi pomalu a pro jeho spálení není dostatek času – důvod tvorby sazí

Pevné částice

➤ tvoří je:

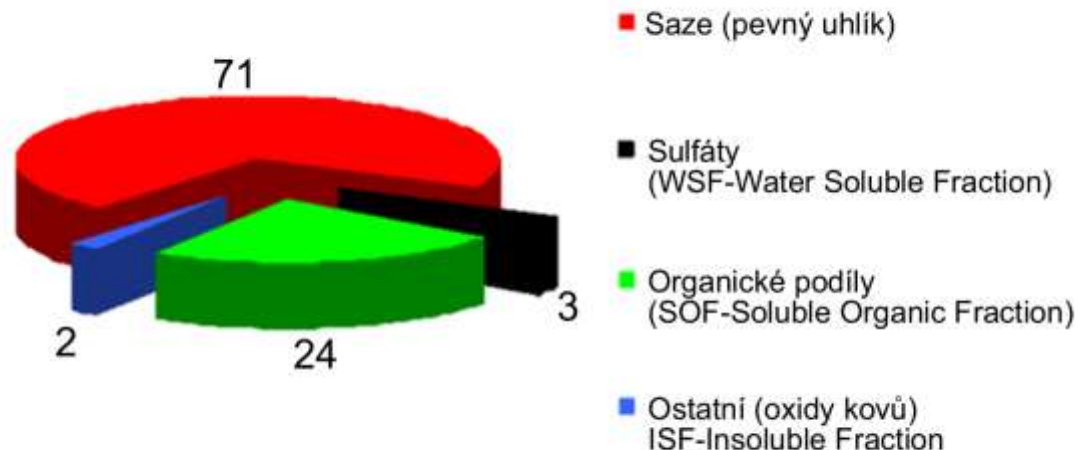
saze – jádro tvořené uhlíkem 0,3 -100 μm

uhlovodíky – které jsou kondenzované, či

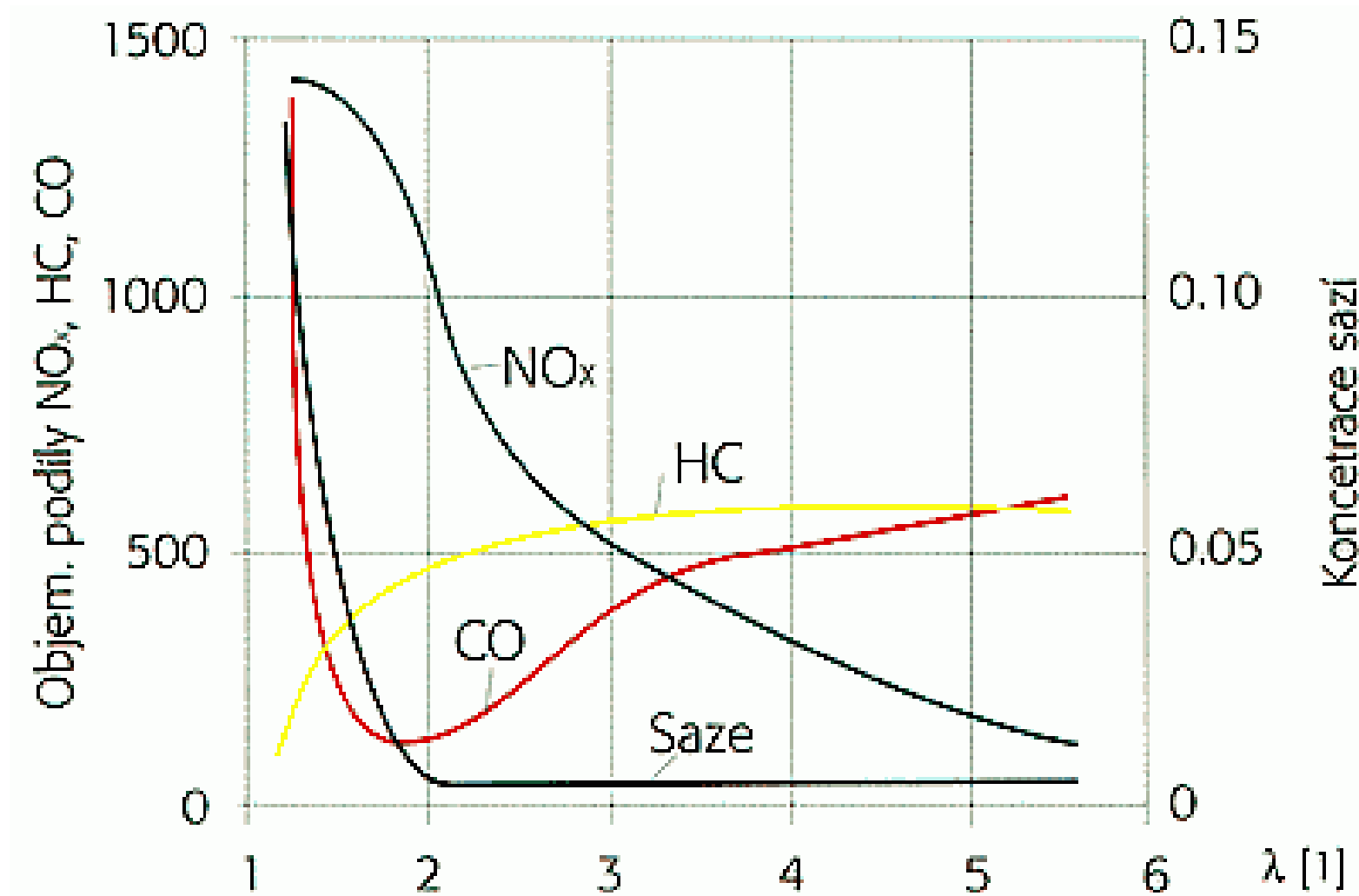
absorbované na saze (při ochlazování spalin)

sulfáty, produkty tepelné degradace oleje, prach,

popel, části koroze a otěrové částice



Vliv součinitele přebytku vzduchu na složení emisí u vznětového motoru



Činitelé ovlivňující vznik škodlivých emisí

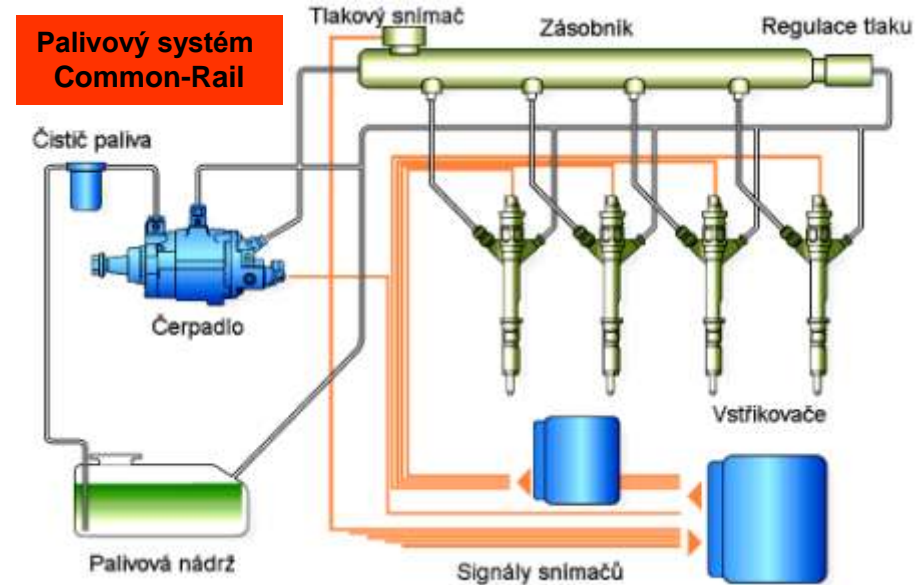
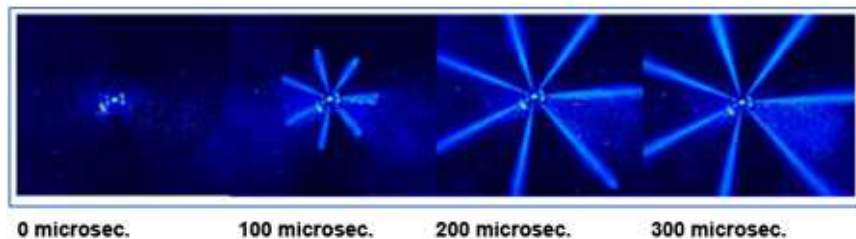
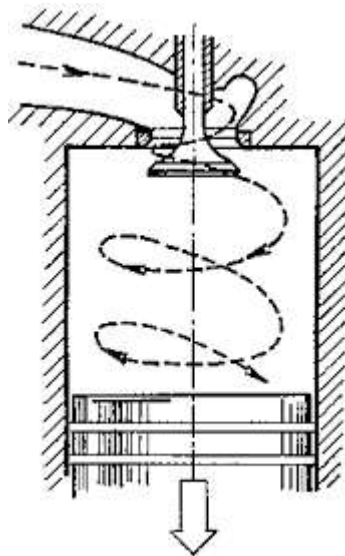
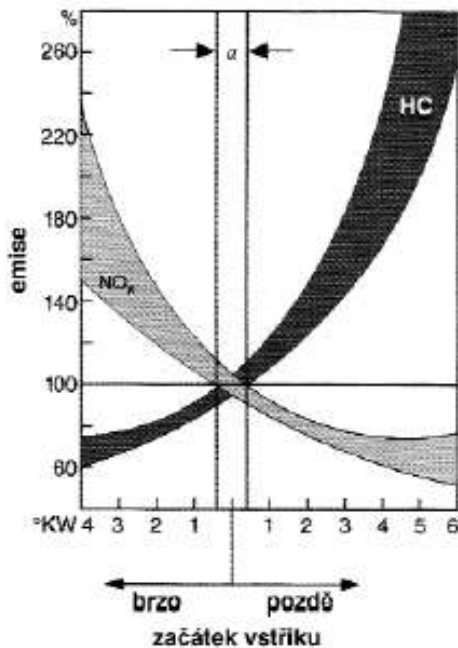
- druh použitého paliva

Co jsou paliva? VIZ 3. PŘEDNÁŠKA

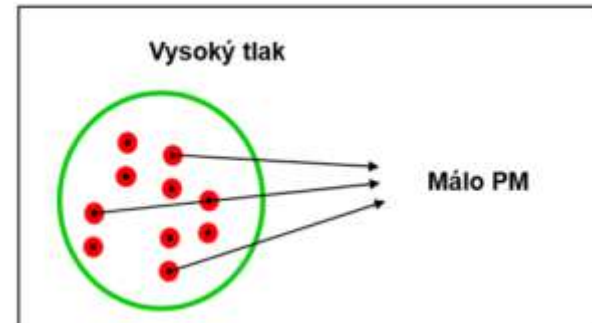
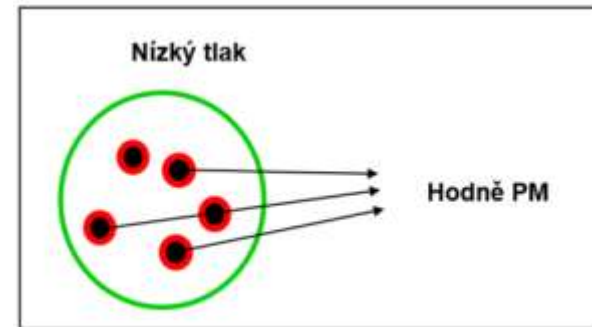
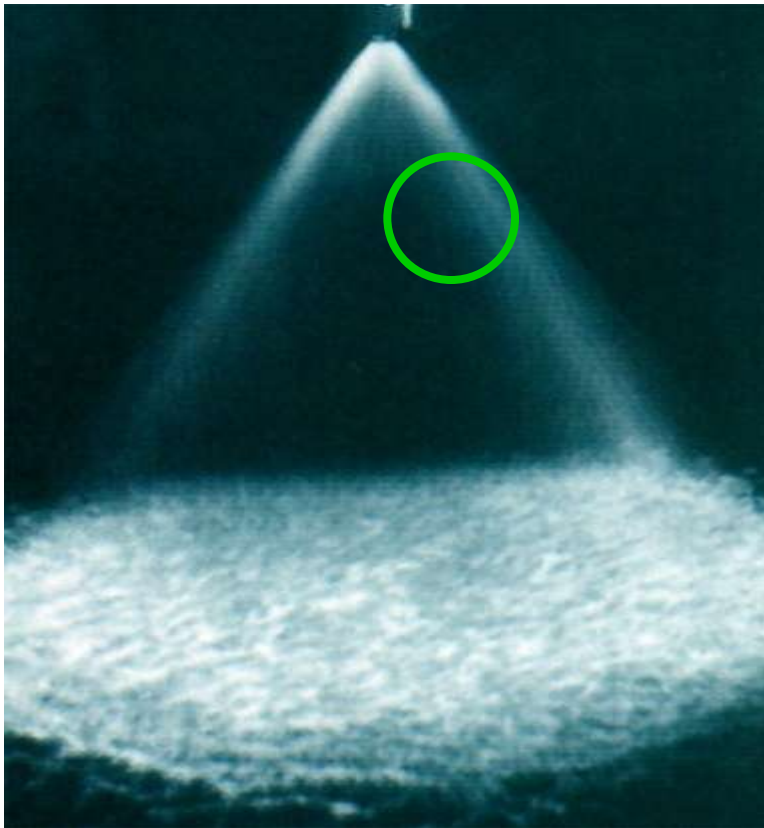


Činitelé ovlivňující vznik škodlivých emisí

- příprava směsi (homogenita, časování)

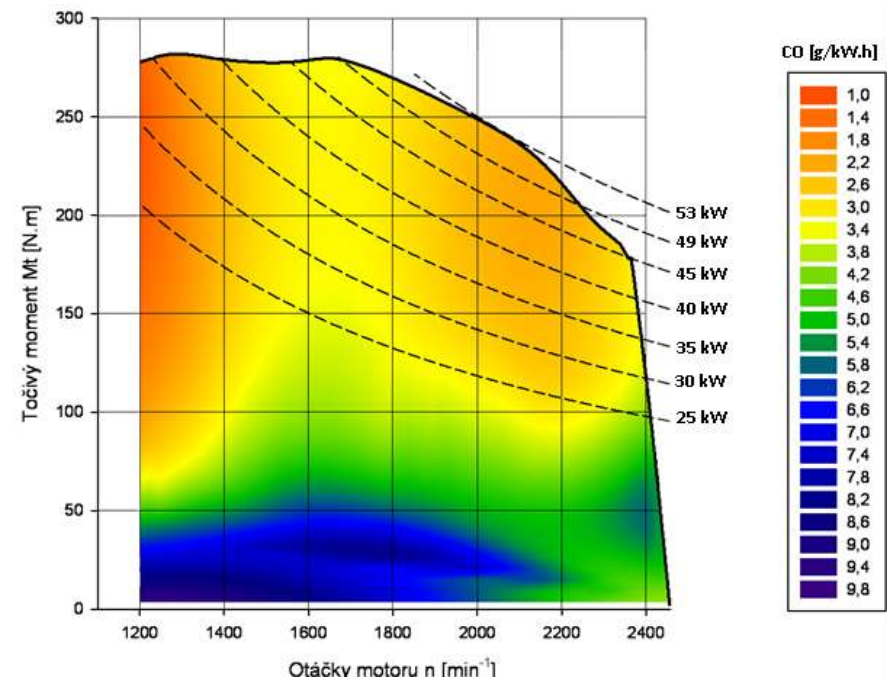
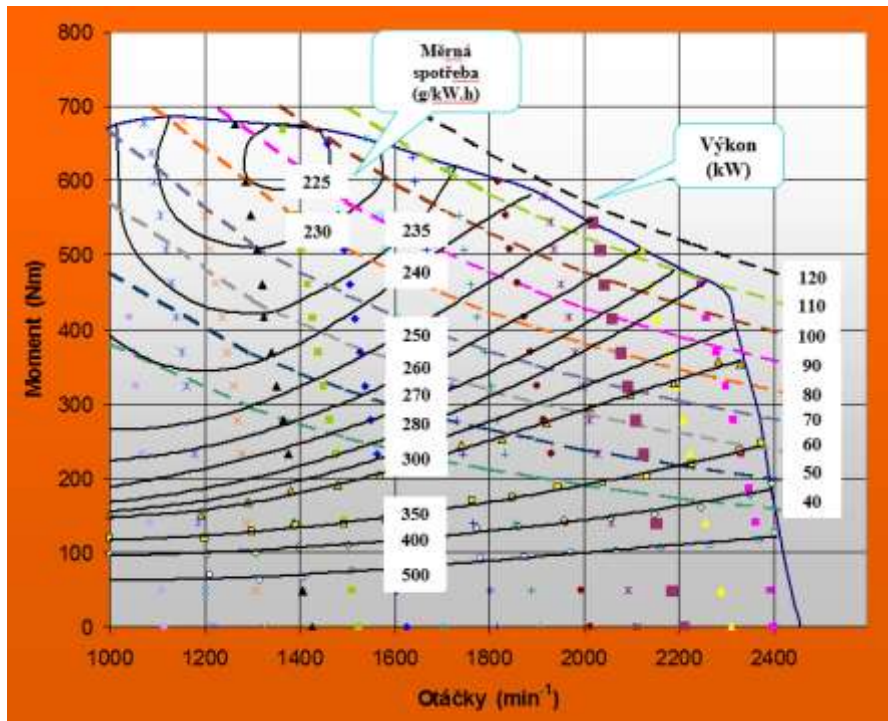


Vstřikovací tlak a spalování?



Činitelé ovlivňující vznik škodlivých emisí

➤ způsob provozování motoru

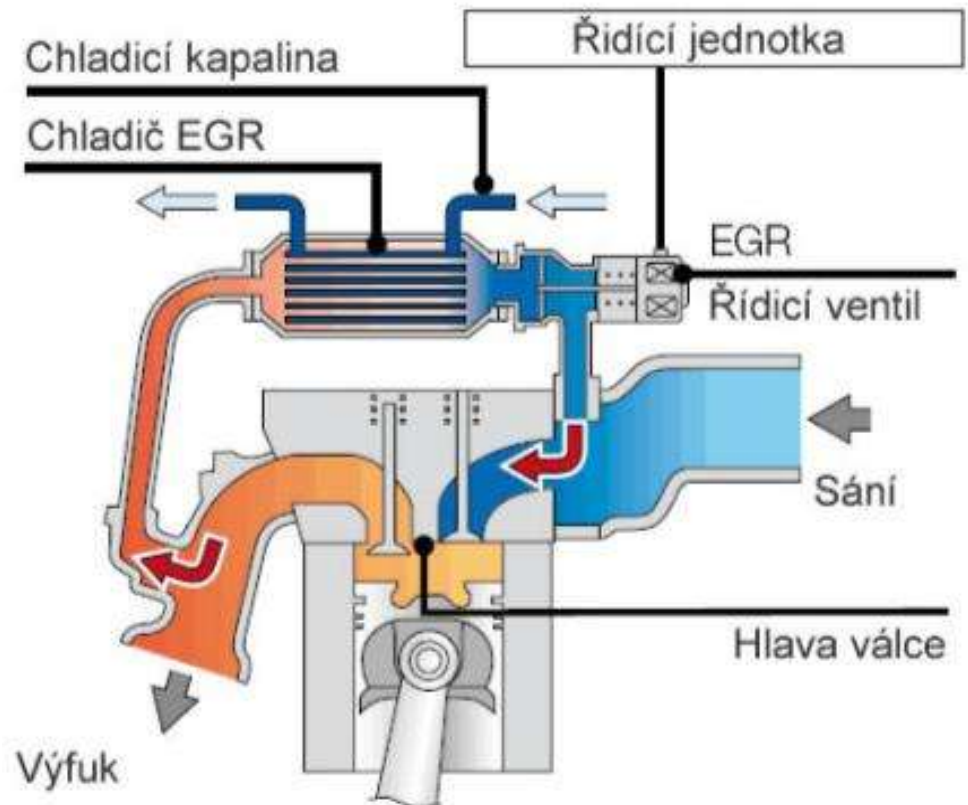


Opatření ke snížení škodlivin

RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

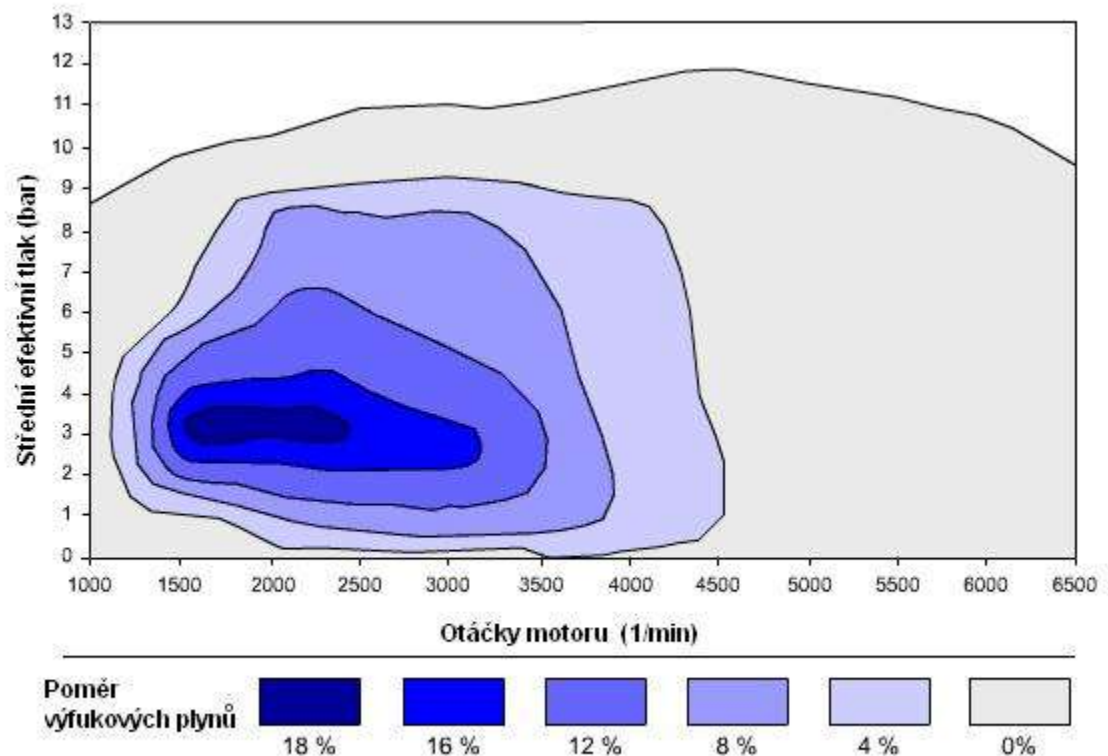
- přivedení části výfukových plynů zpět do spalovacího prostoru
- s volným vzdušným kyslíkem reaguje dusík za vysokých teplot na produkty NO_x , které jsou limitované normami.
- spaliny mají větší měrnou tepelnou kapacitu než vzduch, tzn., jsou schopny přijmout více tepla ze spalovacího prostoru, a tím snižovat teplotu ve spalovacím prostoru, která ovlivňuje tvorbu NO_x

- vnitřní recirkulace
- vnější recirkulace



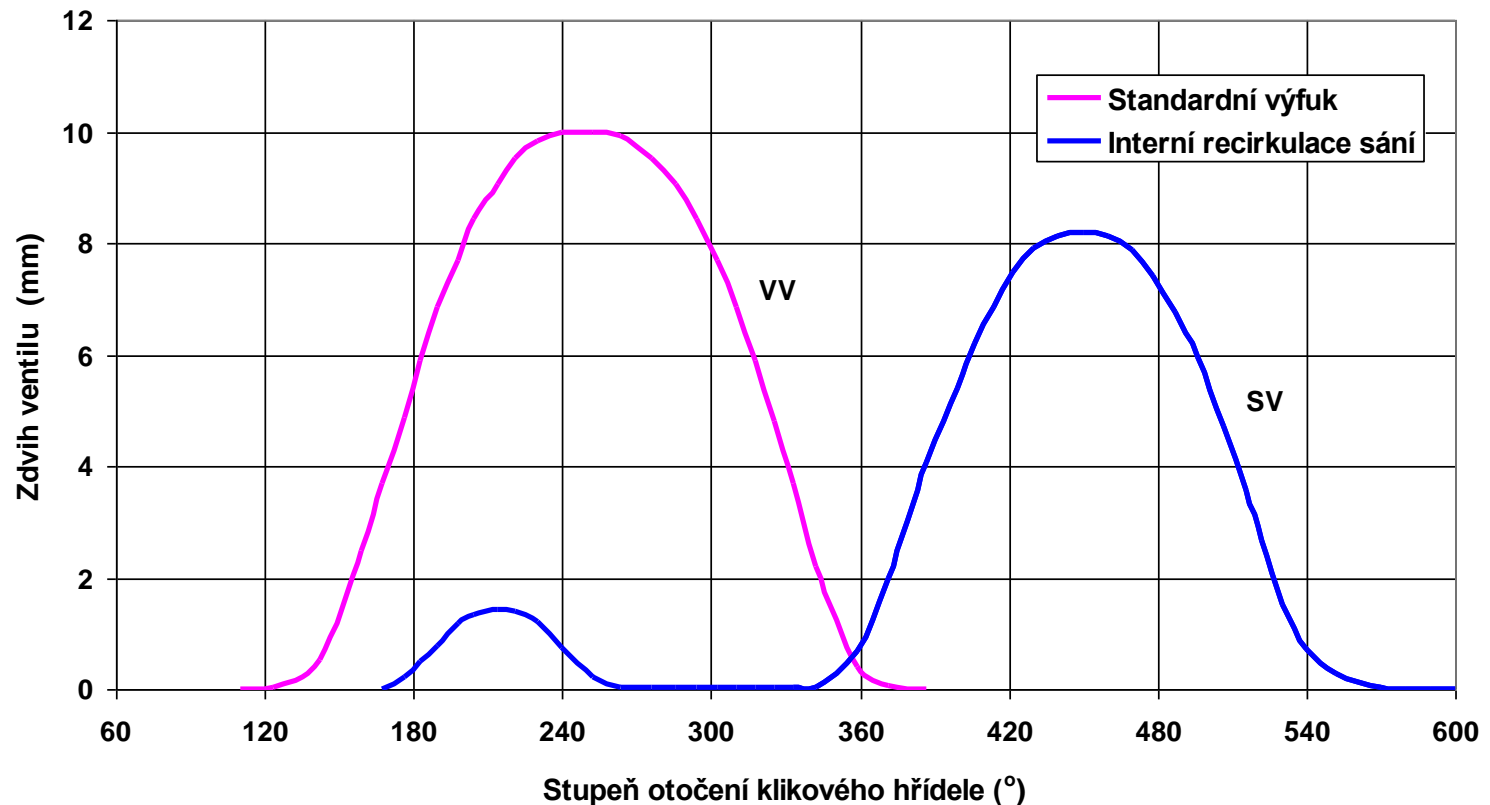
Recirkulace výfukových plynů

- označuje se německou AGR (Abgasrückführung) nebo anglickou EGR (Exhaust Gas Recirculation) zkratkou
- recirkulace je prováděna především v oblasti částečného zatížení, neboť při max. zatížení je u traktorových motorů mezní hodnota součinitele přebytku vzduchu mezi 1,6 – 1,8 a snížení koncentrace kyslíku by vedlo k nárůstu emisí pevných částic



Recirkulace výfukových plynů

- vnitřní recirkulace (CASE IH)
- nevýhoda: stálé nastavení bez možnosti regulace množství recirkulovaných výfukových plynů



Recirkulace výfukových plynů

- vnější recirkulace - spalin jsou přes ventil vraceny zpět do sání motoru
- modifikace existují v možnosti chlazení odměřeného množství spalin:

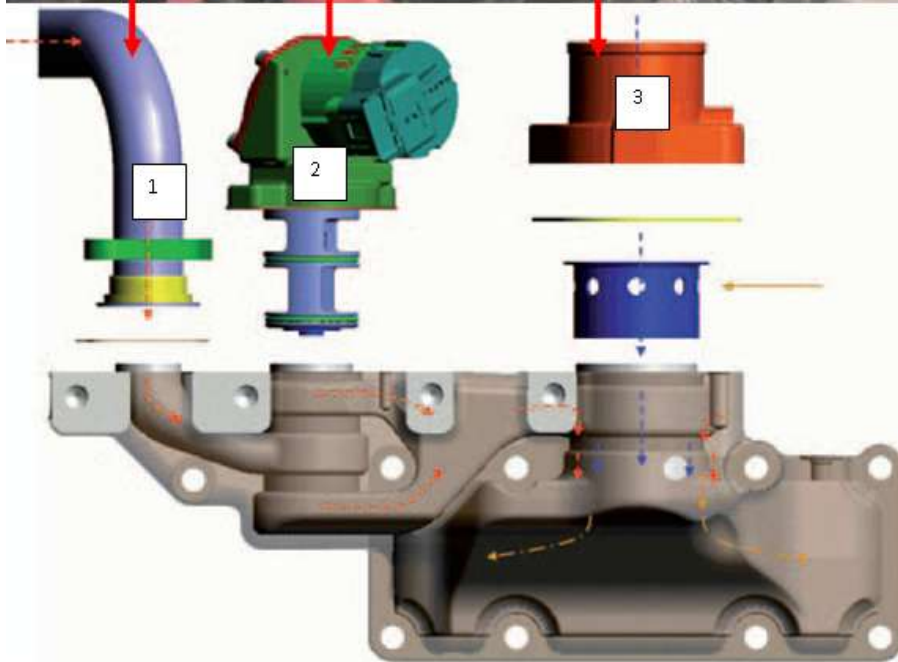
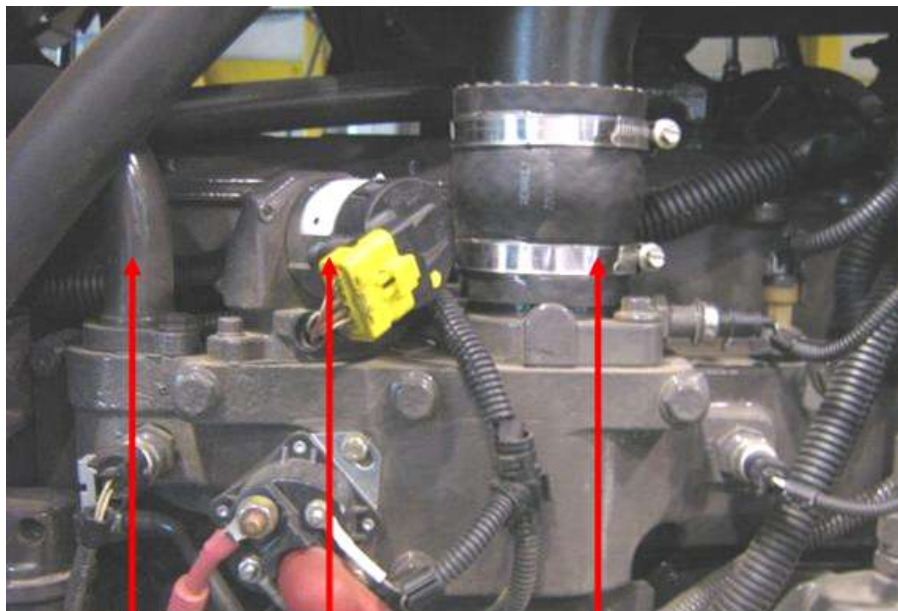
EGR bez ochlazování (výfukové plyny neprocházejí přes výměník tepla a tím zvyšují teplotu nasávaného vzduchu, rychlejší přechod paliva z kapalného do plynného stavu)

EGR s plným ochlazením (výfukové plyny procházejí přes výměník tepla. Přitom může docházet ke kondenzaci vody a její dopravě do spalovacího prostoru) - **CEGR**

EGR s částečným ochlazením
(pouze část výfukových plynů prochází přes výměník, aby se zabránilo vnikání vody do spalovacího prostoru, tím že se bude udržovat teplota vráceného množství plynů nad teplotu kondenzace)



Pohled na
uspořádání
EGR ventilu
v sání motoru
traktoru Claas
Axion 850



Opatření ke snížení škodlivin

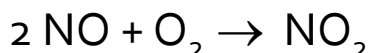
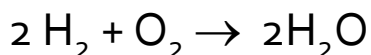
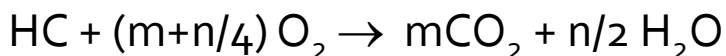
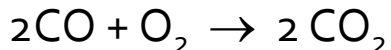


KATALYZÁTORY

- hlavní konstrukční prvky : pouzdro z ušlechtilé oceli
kompenzační vložka
nosný materiál nebo monolit
mezivrstva (700x zvětšení plochy až na 15000 – 18000 m², AlO_x, MgO_x a křemičitany)
katalyticky aktivní vrstva (cca 3-7 g Pt, 1,5-5 g Pd, 0,8-1,5 g Rh)



- u vznětových motorů – **oxidační katalyzátory** (Pt a Pd) – velmi malé množství CO a HC – oxidace NO na NO₂
- rychlý nástup oxidace (již od 160 °C)

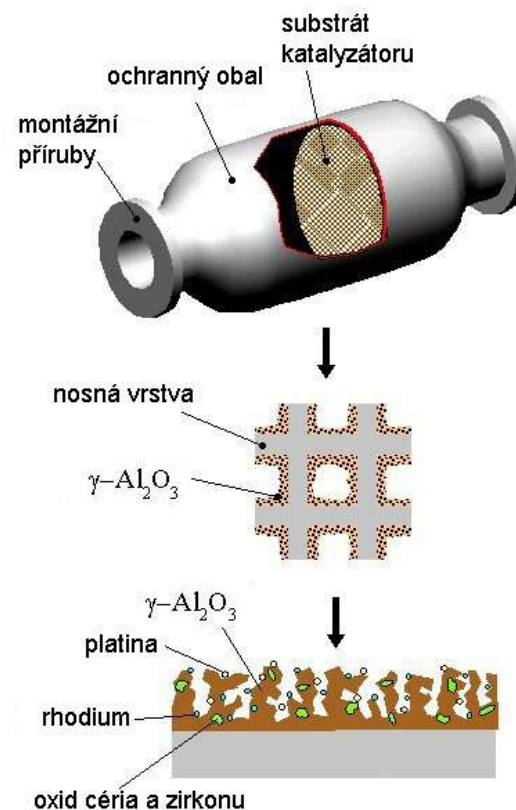
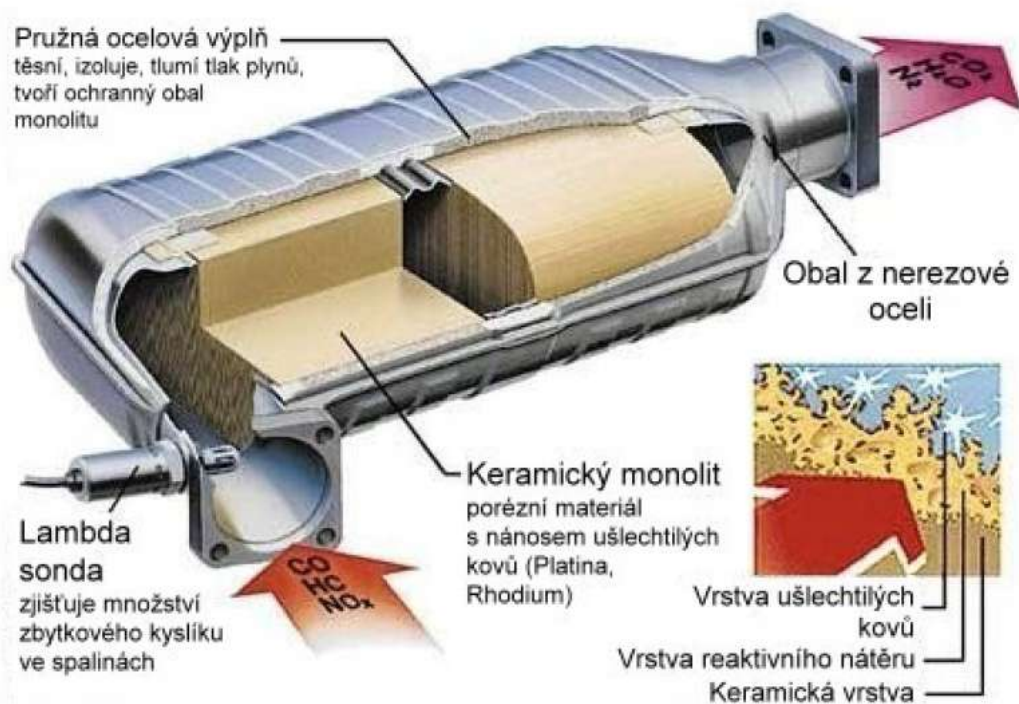


- přeměna pevných částic – od EURO 4 – nutná jejich další úprava



Součástí katalyzátoru je lambda sonda, která monitoruje přítomnost kyslíku ve výfukových plynech a podle toho upravuje složení směsi vstupující do motoru

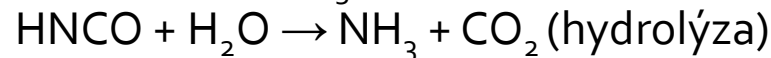
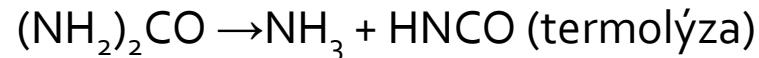
Monolit katalyzátoru může být buď keramický nebo kovový



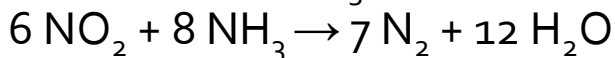
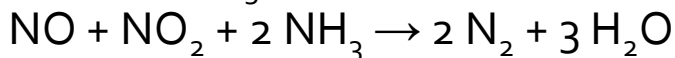
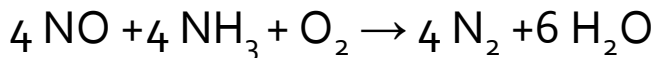
Opatření ke snížení škodlivin

SCR KATALYZÁTORY (Selective Catalytic Reduction)

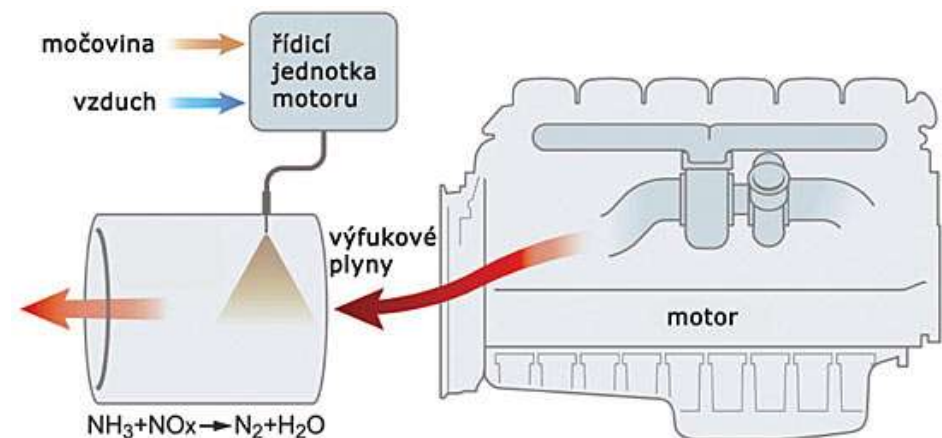
- Euro 4 a 5 – výrazné požadavky na snížení emisí NO_x a PM (o 30 % a o 80 % ve srovnání s EURO_3)
- konstrukce katalyzátoru podobná oxidačnímu – povlaková vrstva $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ popř. ještě WO_2
- nutné použití redukčního činidla – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (úprava v hydrolytickém katalyzátoru):



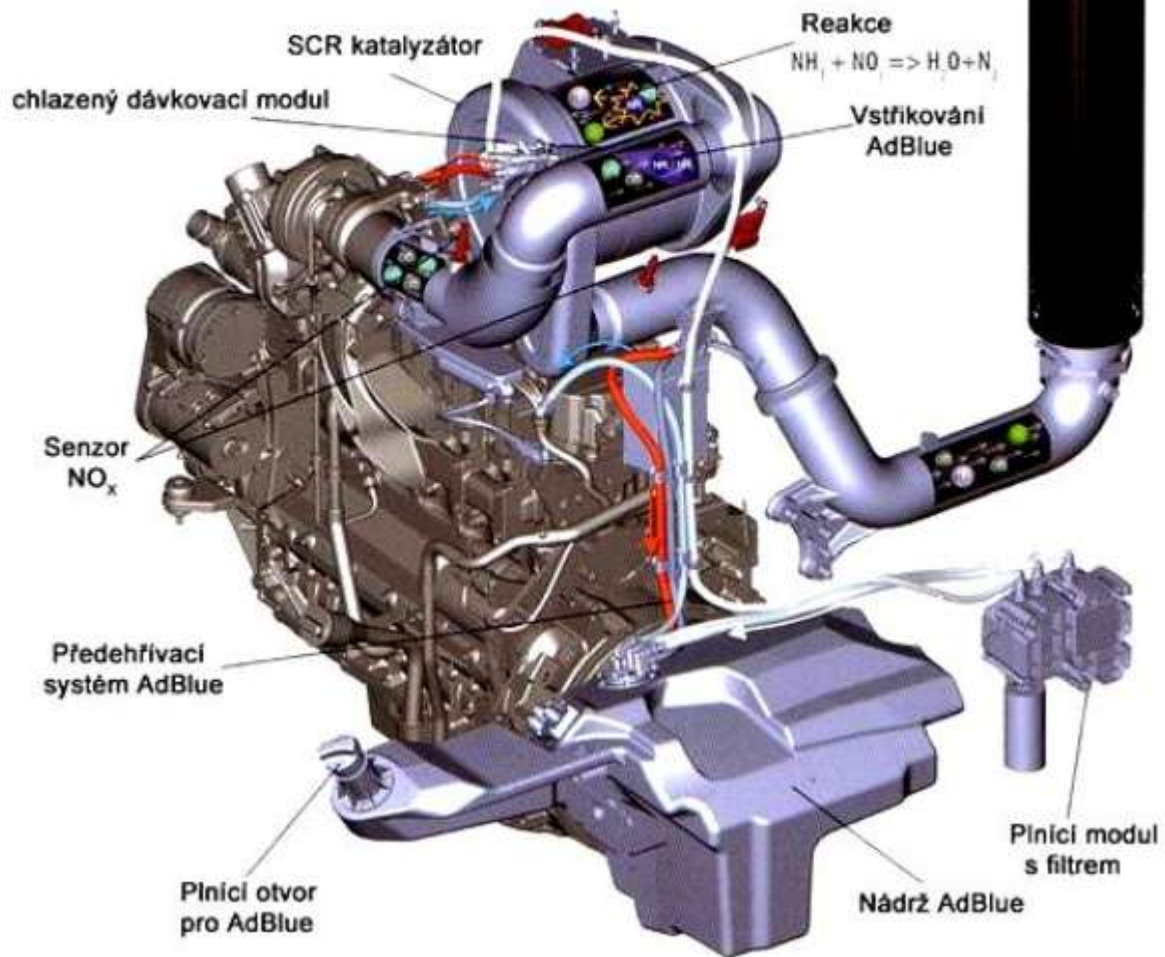
- nebo přímo čpavek NH_3 (v budoucnu používaná i pevná fáze – AMONIUMCARBAMÁTU)
- přeměna NO_x na N_2 a H_2O (90 %)
- snížení PM o 40 %



Spotřeba AdBlue 5 – 10 % ze spotřeby nafty



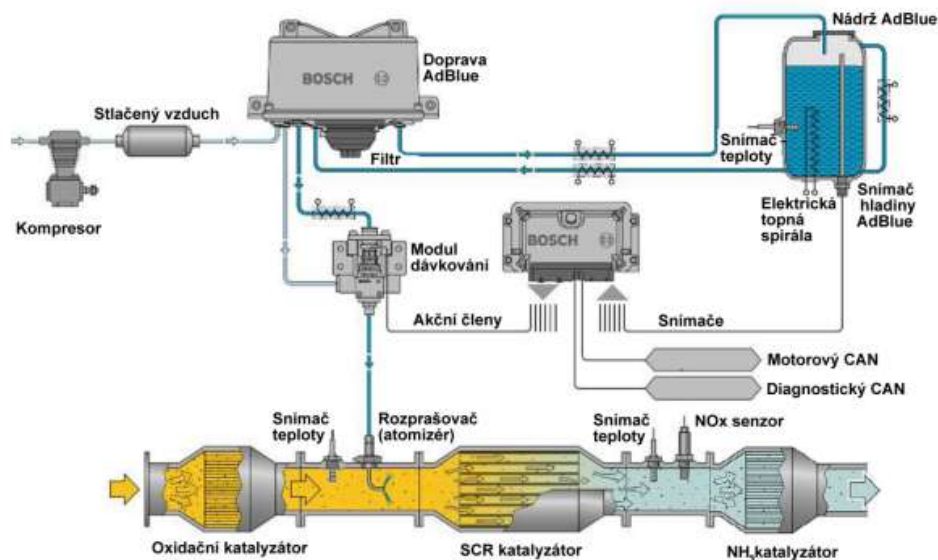
Fendt SCR Vario



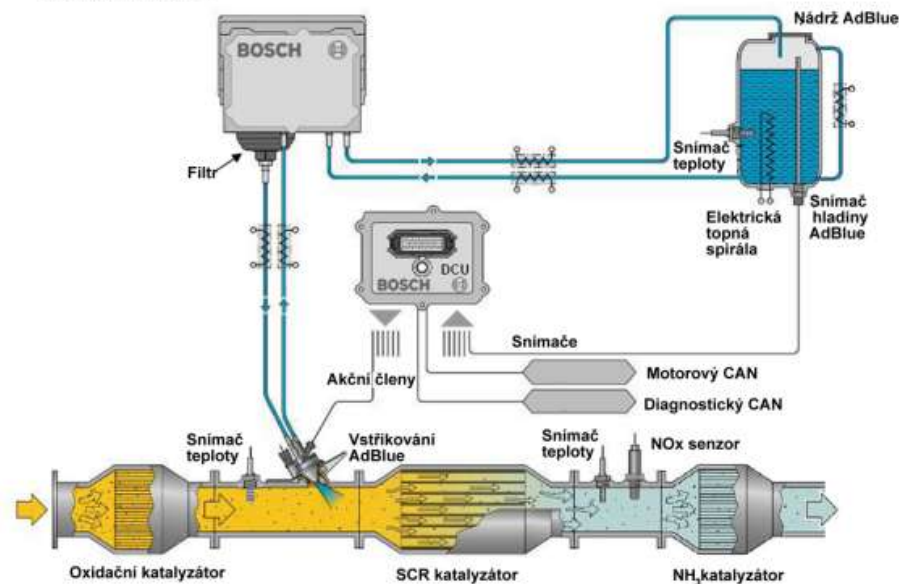
- úzké teplotní rozmezí od 250 °C do 450 °C
- vstřikování AdBlue v závislosti na zatížení, teplotě výfuk. plynů atd.
- ověření správné funkce NOx snímačem + měření elektrické vodivosti roztoku – při odchylce snížení výkonu o 30 až 50 %
- nutné vyhřívání nádrže s reduk. činidlem (zavádění roztoku tzv. Denoxium – bod mrazu -35 °C
- používání paliva bez síry

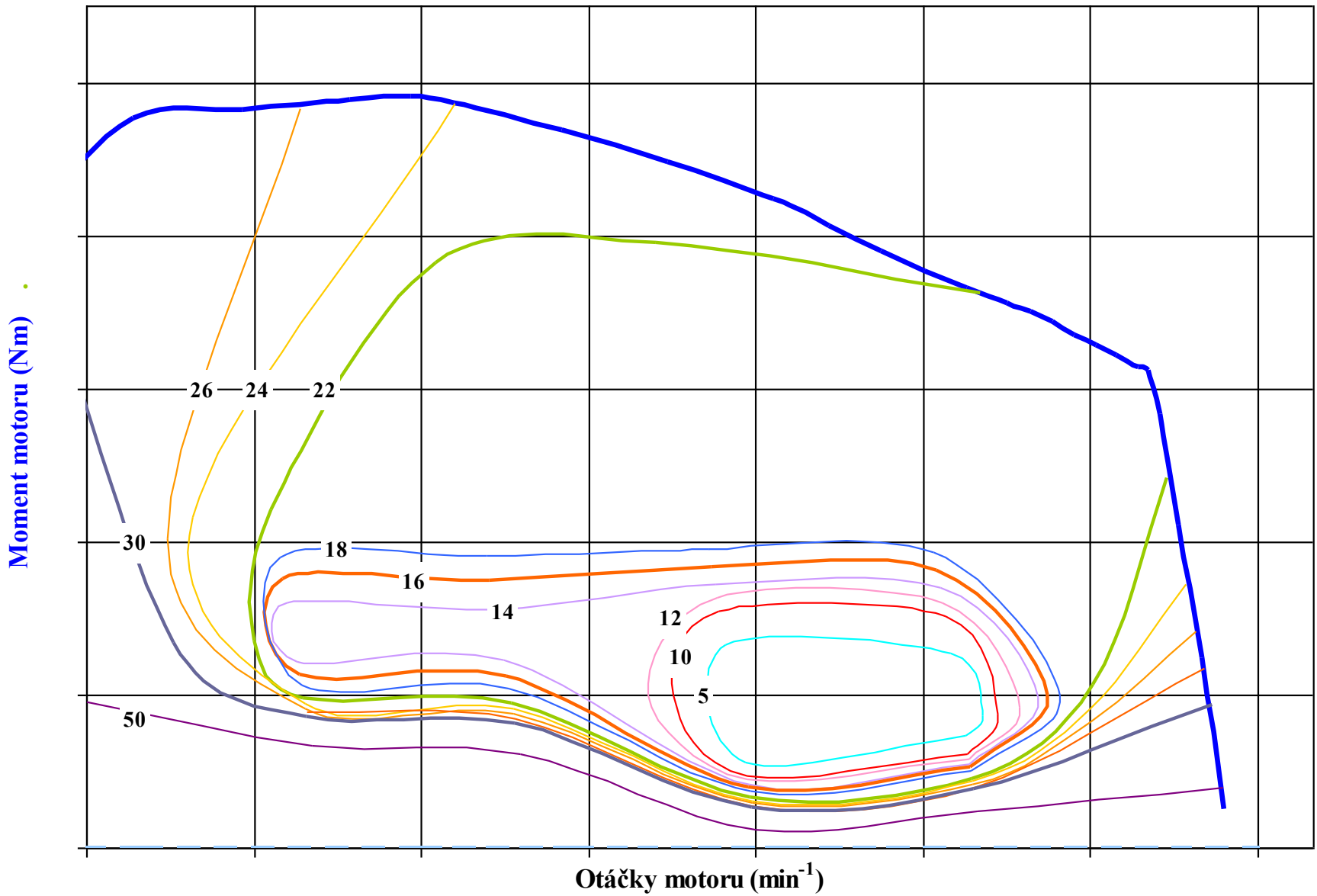
s SCR katalyzátorem dochází k poklesu spotřeby paliva o 3% až 5%!!!

DENOXTRONIC 1



DENOXTRONIC 2



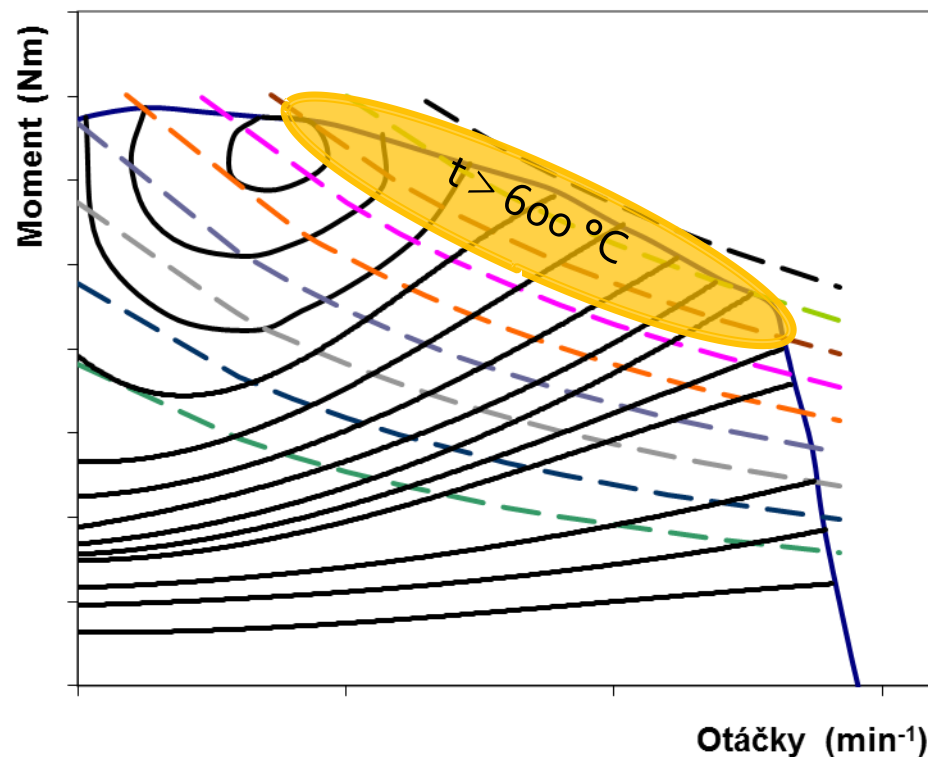


Úplná charakteristika dávkování činnidla AdBlue před katalyzátor traktorového motoru.

Opatření ke snížení škodlivin

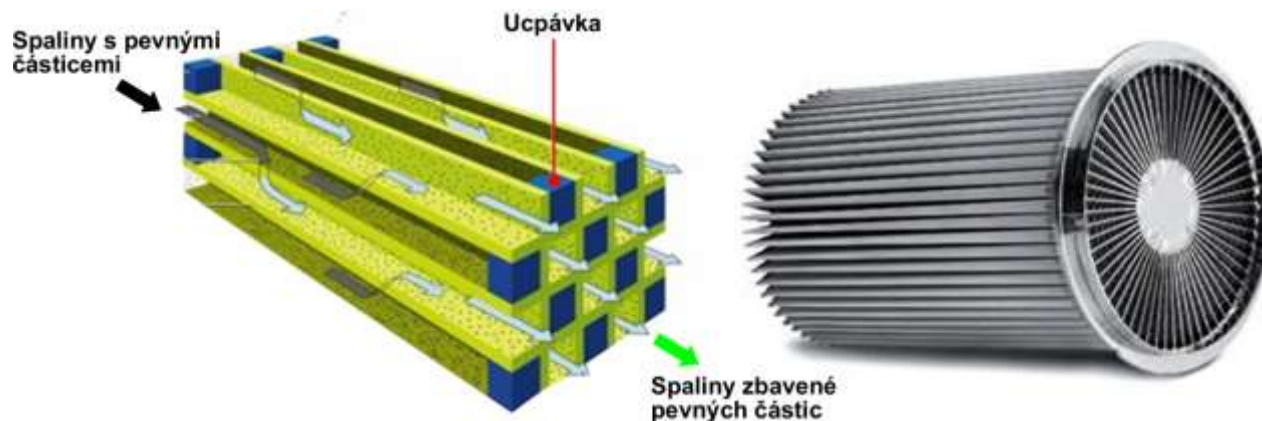
FILTRY PEVNÝCH ČÁSTIC DPF (Diesel Particulate Filter)

- snižování emisí pevných částic ($0,1 \mu\text{m}$)
- uhlík velmi málo reaktivní a má velmi dlouhou dobu hoření
- nutno odfiltrovat pomocí částicových zachycovačů a dodatečně spálit
- teplota spalování sazí a pevných částic – vyšší než $600 \text{ }^\circ\text{C}$
- spálení sazí probíhá buď zvýšením teploty spalin, nebo snížením teploty spalování PM (příspěvek v palivu FBC – Fuel Burn Catalyst)



Filtr pevných částic

- složení: cordierid (pěnová keramika z karbidu křemíku) – obdoba jako u katalyzátorů, titaničitan hlinitý, karbid křemíku, speciální pěnové kovy nebo spékané materiály
- povrch může být opatřen vrstvou oxidů kovů nebo platiny (teplota vznícení PM je možné snížit až na 250°C)
- objem filtru 1,5-2,5 násobek zdvihového objemu motoru
- kanálky střídavě uzavřeny SMF (⇒ pronikání spalin pórovitým materiálem (0,0001 mm) ⇒ ulpívání PM na povrchu keramického materiálu $\eta = 95 \%$)

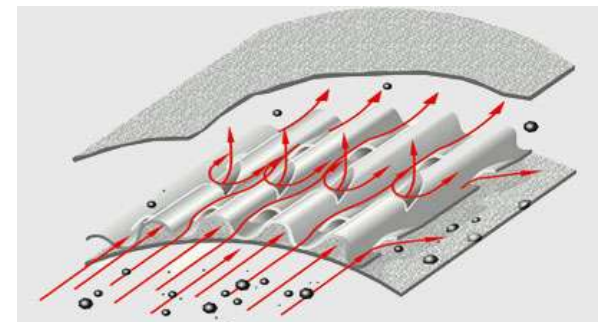


Filtr pevných částic

- nevýhoda DPF - omezená kapacita ukládání ⇒ zvýšení tlakového odporu spalin
- nutná regenerace filtru: přidáním aditiv FBC – na bázi oxidu cernu nebo železa (snížení teploty zapálení PM na 350 °C) – pasivní regenerace
zvýšení teploty spalin – pomocí dodatečného vstřiku paliva v expanzním popř. výfukovém zdvihu, nebo pomocí hořáku (zvýšení teploty výfukových plynů až na 600 °C) a snížení plnicího tlaku vzduchu v kombinaci s předřazeným oxidačním katalyzátorem – aktivní regenerace

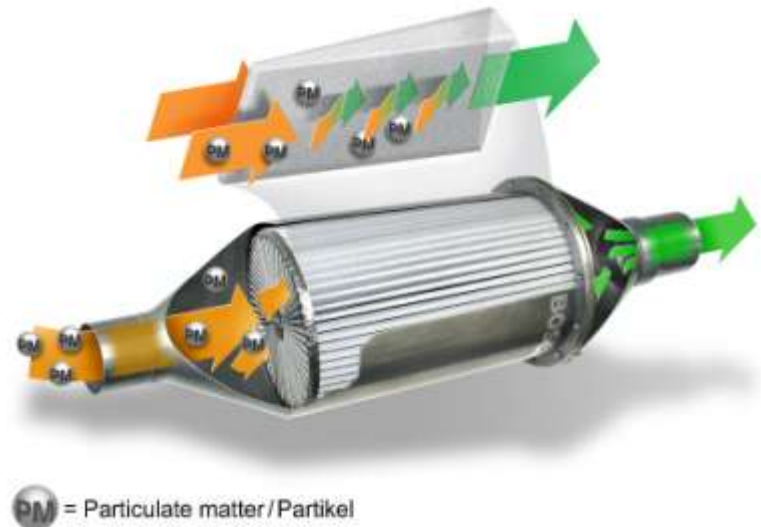
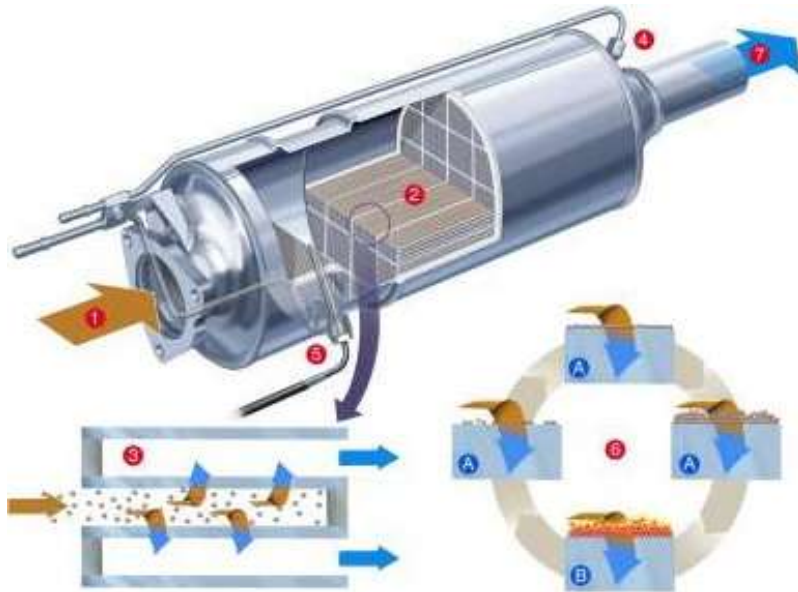
REGENERACE: - v závislosti na provozních podmínkách, cca po 500 - 2000 km, u traktorů mezi 8 až 30 provozními hodinami

- přirozená regenerace ve vysokých teplotách
- při nedostatečné teplotě při použití aditiv – řidič upozorněn kontrolkou, aby zvýšil rychlost vozu
- délka trvání 3 – 5 minut



Filtr pevných částic

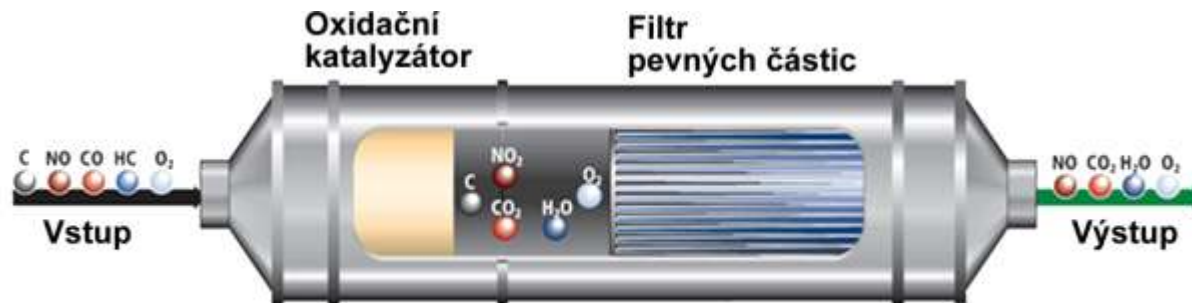
- dávkování aditiv po každém natankování paliva z oddělené nádržky – doplnění při výměně filtru (životnost v závislosti na konstrukci – 5000 mth) nebo při servisní prohlídce
- jedna náplň u některých vozů až pro ujetí 240 000 km (spotřeba cca 0,03 %)
- usazování popela (z aditiva a z motrového oleje cerin – anorganická látka) → nemožno odstranit pomocí regenerace ⇒ zvyšování protitlaku spalin – nutná výměna filtru pro daném kilometrovém proběhu



Opatření ke snížení škodlivin

Kombinované systémy

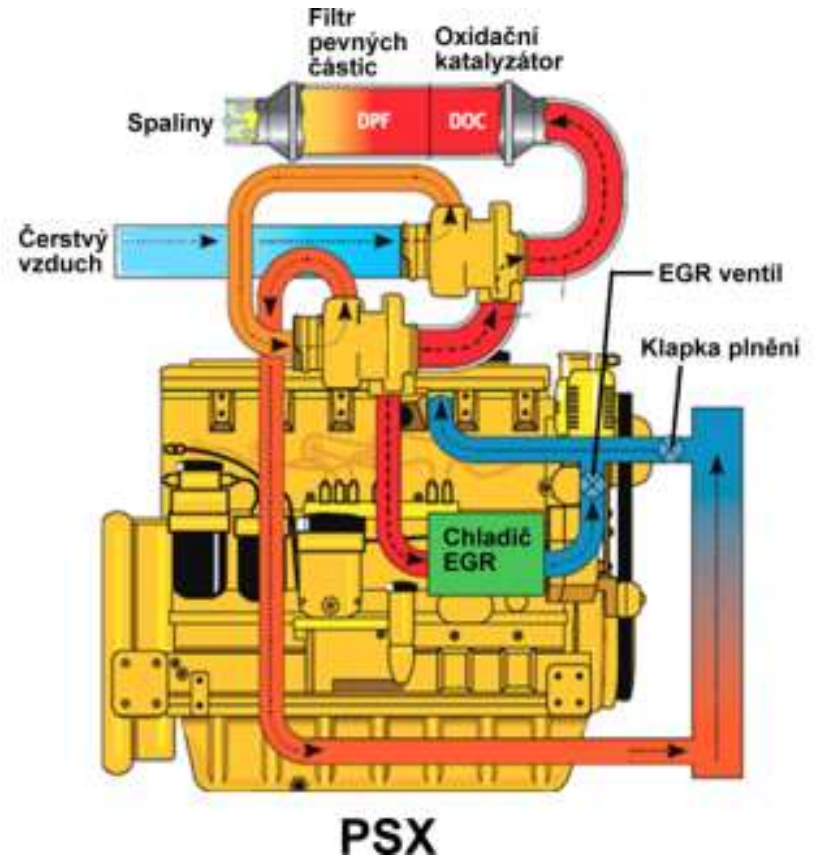
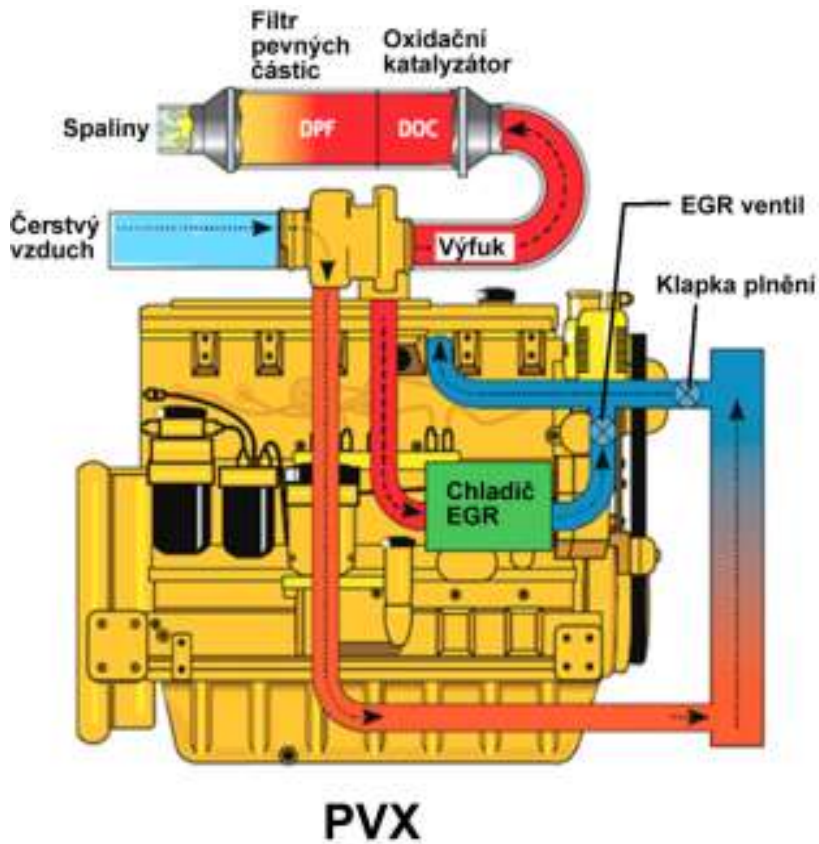
- podle EMA (Engine Manufacturers Association) lze u traktorů použít systém regenerace s přidáváním aditiv, oxidační katalyzátor s kontinuální regenerací filtru nebo filtr s aktivní vrstvou.



Oxidační katalyzátor (DOC) s principem práce CRT (Continuously Regenerating Trap)

- kontinuální regenerace filtru při nižších teplotách, než je teplota vznícení sazí
- oxidace NO na NO₂ (tvorba při 200 °C až 280 °C) → oxidační činitel ⇒ ve výfukových plynech lze pak spalovat saze při nižších teplotách 250 °C – 450 °C
- za CRT katalyzátorem následuje většinou SCR katalyzátor
- náchylné na síru

- Firma John Deere motory s označením Powertech PVX a PSX

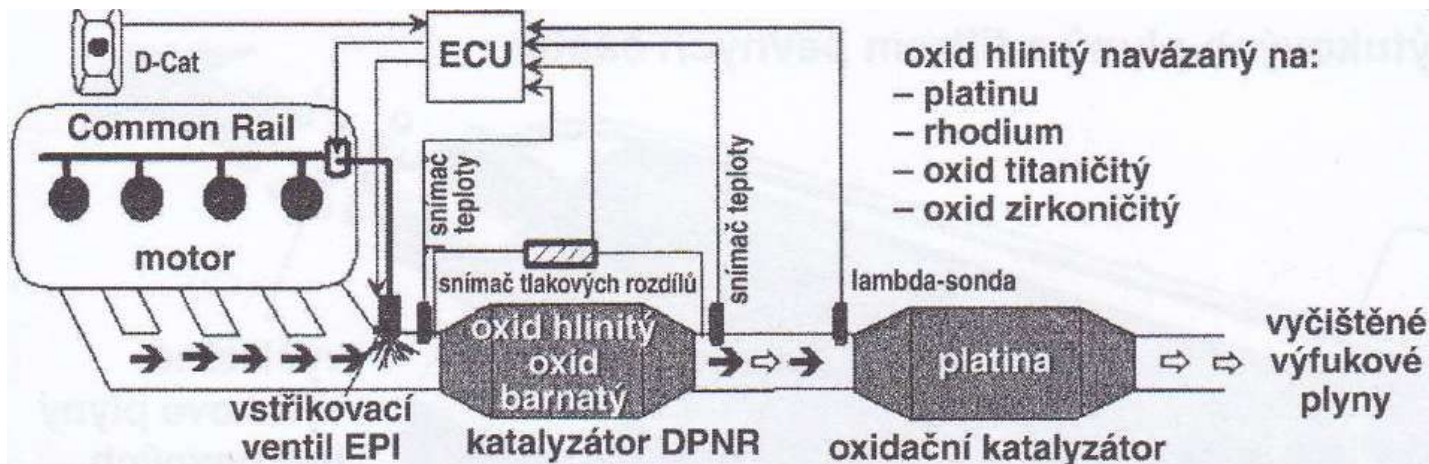


Konstrukce systémů úpravy spalin pro splnění normy „Tier 4 Interim platí pro USA (Etapa III)

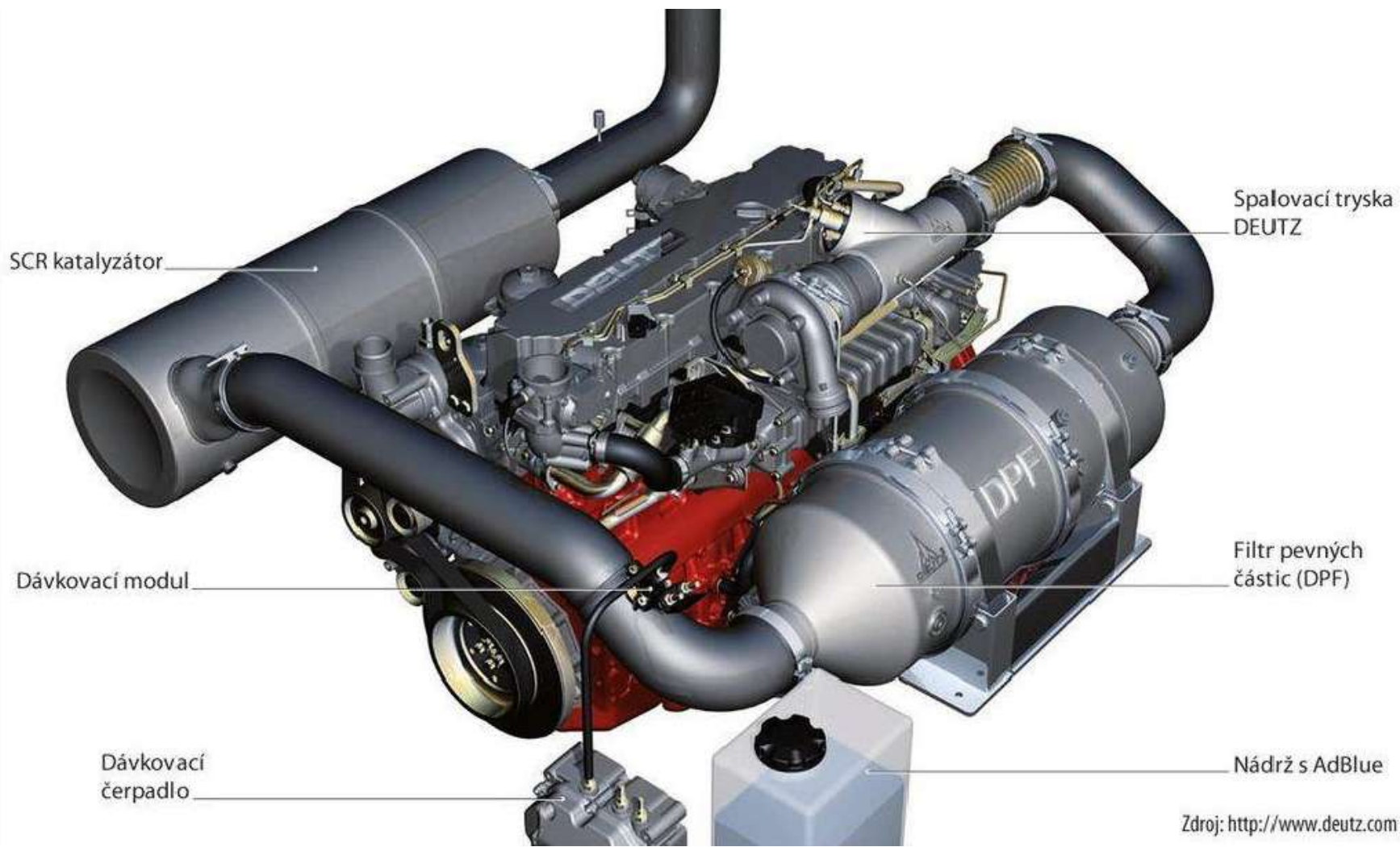
Opatření ke snížení škodlivin

Systemy D-CAT

- kombinace zásobníkového katalyzátoru (DPNR – Diesel Particulate NO_x Reduction) s „filtrem“ pevných částic
- vložka z cordieritu + Pt a BaO + TiO₂ (pro uvolňování vodíku pro snižování oxidů síry)
- snížení NO_x + PM současně
- vstřikovací ventil EPI - vstřikování paliva pod tlakem 1 Mpa – pro umožnění redukce a zvýšení teploty výfukových plynů (nad 600 °C)



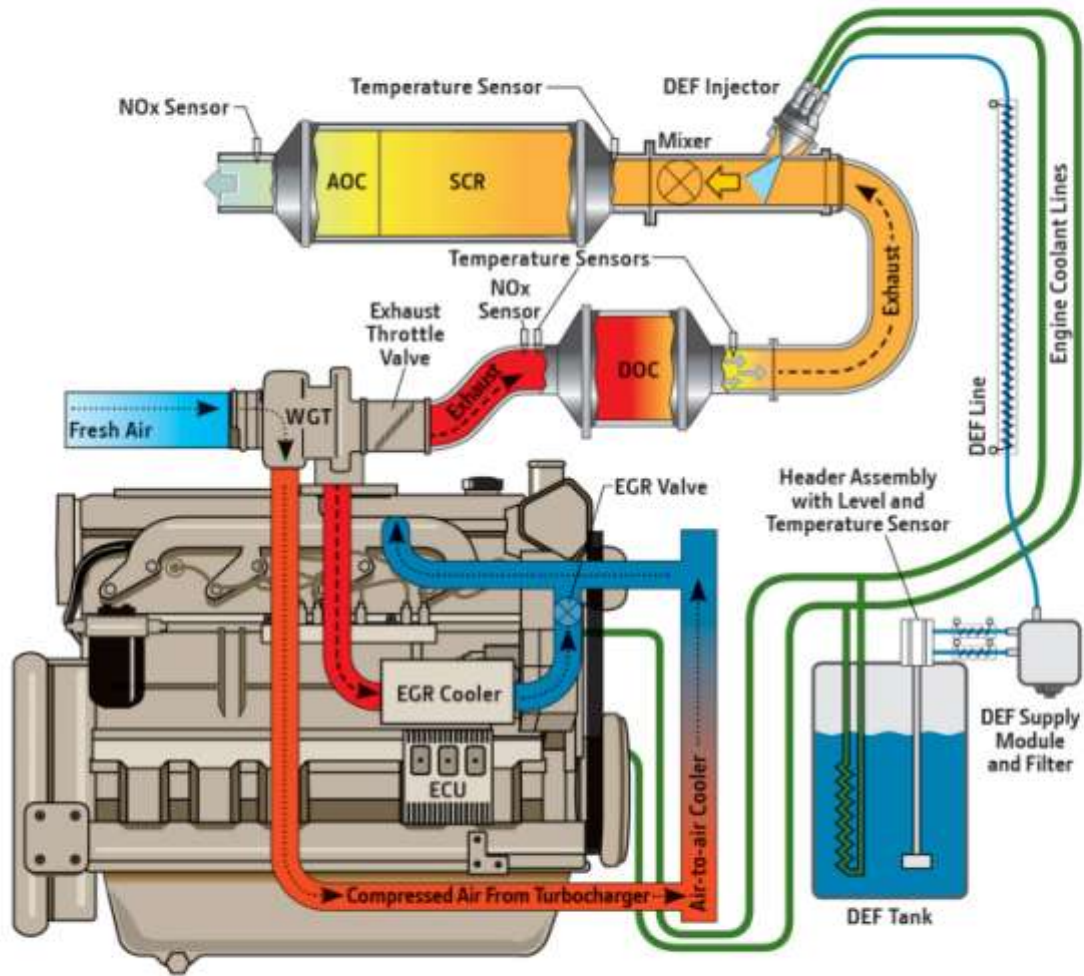
➤ Kombinované systémy: CEGR + DPF + SCR



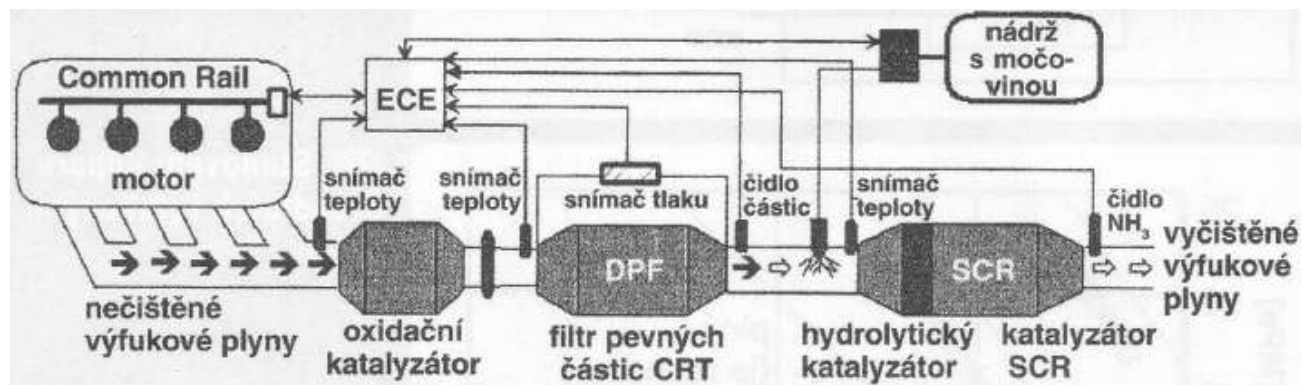
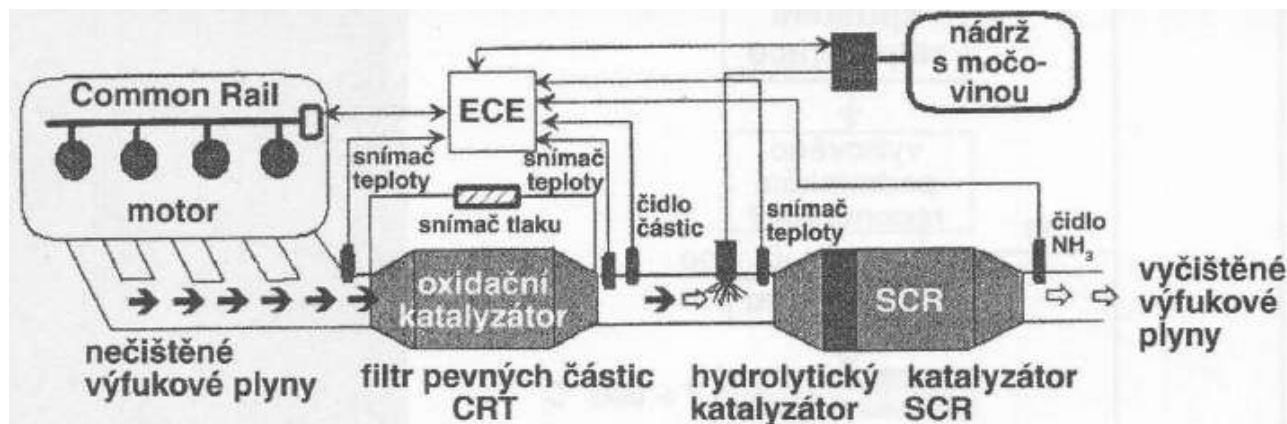
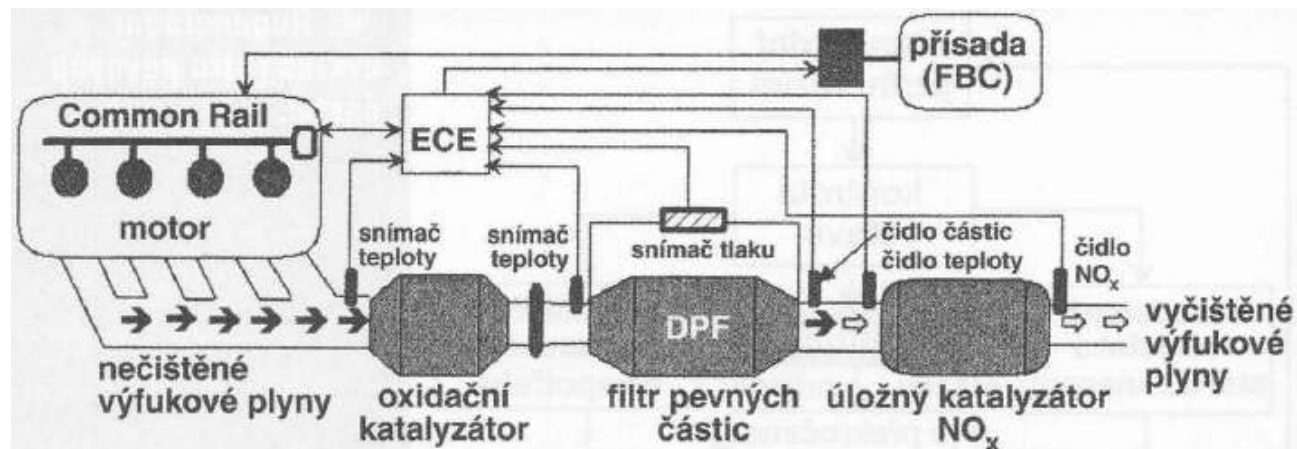
Zdroj: <http://www.deutz.com>

➤ Kombinované systémy

PowerTech PWL Final Tier 4 technology



➤ Kombinované systémy



DĚKUJI ZA POZORNOST