

# Výfukové emise a jejich měření

## Zkoušení vozidel a jejich částí, FS ČVUT 2015

31.3., 7.4., 14.4., 28.4.

doc. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.

VTP Roztoky 304, konzultační hodiny dle dohody

[michal.vojtisek@fs.cvut.cz](mailto:michal.vojtisek@fs.cvut.cz), tel. 774 262 854

Tato prezentace vznikla za podpory Evropského sociálního fondu v rámci realizace projektu „Podpora zkvalitnění týmů výzkumu a vývoje a rozvoj intersektorální mobility na ČVUT v Praze“, CZ.1.07/2.3.00/30.0034



# Výfukové emise a jejich měření

1. Co jsou emise, jejich vznik a význam, parametry ovlivňující emise
2. Měření emisí – aparatura, postupy, legislativa
3. Současné trendy, anomálie, měřicí metody

## Literatura

Takáts: Měření emisí spalovacích motorů,  
ČVUT 1997



**Částice a ozon v přízemních  
vrstvách atmosféry jsou příčinou  
cca 406 tisíc předčasných úmrtí  
v EU ročně  
(dopravní nehody „jen“ 39 tisíc)**

**Statistiky ČR:**  
**částice 7379** (Puklíková, Hygiena 2013)  
**nehody 583** (statistiky Policie ČR, 2013)

**Rozjezd kamionu na 90 km/h:  
0,5 až 1 litr nafty  
Volnoběh osobního automobilu:  
0,5 až 1 litr paliva za hodinu  
Zkuste spálit stejné množství  
uhlí či biomasy uprostřed ulice...**



# Spalovací proces v motoru

Složení paliva a vzduchu, ideální spalování, stechiometrická směs, poměr lambda

Reálné spalování

- globální stechiometrie - nedodržení lambda v přechodových režimech
- lokální stechiometrie - neúplné smísení, nerovnoměrnost složení směsi
- zhášecí zóny
- disociace spalin
- Zeldovičův mechanismus tvorby NO<sub>x</sub>, 95% NO
- rychlé děje, rychlý pokles tlaku a teploty – zamrznutí NO<sub>x</sub>
- vodík –  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$



# Emise ze spalovacích motorů - plyny

- Oxid uhelnatý (CO) – jedovatý plyn
- Směs uhlovodíků (vyjma metanu) (NMHC)
- Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>)
  - látky podílející se na tvorbě přízemního ozonu a smogu
- Metan (CH<sub>4</sub>)
- Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)
  - Skleníkové plyny
- Těkavé organické sloučeniny (VOC) odpařené z paliva
- Toxické látky, zejména formaldehyd, acetaldehyd, benzen, acrolein, 1,3-butadien, a směs plynných, kapalných a pevných organických látek vznikajících spalováním nafty ve vznětových motorech



# Emise ze spalovacích motorů - částice

- Černé saze – povětšinou „čistý“ uhlík, částice mají velikost 0.1 až 1 mikrometr, mají složitý fraktální tvar připomínající sněhové vločky, na těchto částicích se nachytávají aerosoly, plyny, pyl, mikroorganismy, atd.
- Aerosoly – směs organických látek z nespáleného nebo částečně spáleného paliva a oleje, kyseliny sírové a dusičné a jejich sloučenin, částice mají velikost řádově od 0.005 do 0.1 mikrometru, nejsou proto téměř viditelné
- Částice se zachycují a usazují v plicích, vyvolávají onemocnění dýchacích cest, napadají i srdce a mozek



# Složení výfukových plynů

Inertní plyny –  $N_2$  a další,  $CO_2$

Ideální produkty  $CO_2$ ,  $H_2O$

Neúplné spalování – HC, CO

Disociace při vysokých T

Oxidy dusíku – Zeldovičův mechanismus,  
disociace plynů, zamrznutí NO, 95%  $NO_x$  je  
NO

Částice - vznik



# Mechanismy vzniku škodlivin

Mechanismy vzniku dle (Takáts 1997)

-- viz. strana 16-20

- Hmotově bilanční

- např. CO z důvodu nedostatku vzduchu

- Chemicko termodynamický

- důsledek disociace a posunu rovnovážného stavu při vysokých teplotách

- Reakčně kinetický

- konečná rychlost reakce (zpomalení oxidace CO či redukce NO vlivem poklesu teploty při expanzi)





# Emise z motorových vozidel

## Výfukové emise

- skleníkové plyny CO<sub>2</sub>, metan, N<sub>2</sub>O
- rizikové látky
  - HC, CO, NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>), PM
  - formaldehyd, acetaldehyd, benzen, toluen, xyleny, 1,3-butadien, polyaromatické uhlovodíky (PAU), 3-nitrobenz(a)benzantron, ...
  - kvalita – velikost, morfologie, složení, ... - částic

## Emise z odvětrávání klikové skříně

## Emise z otěrů brzd a pneumatik

## Otěry z vozovky, resuspenze částic z vozovky



# Emise skleníkových plynů

Skleníkové plyny – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O – desítky let životnost v atmosféře

Skleníkový jev, oteplování, klimatické změny, hurikán jako tepelný stroj, 5. zpráva IPCC

Nejvýznamnější CO<sub>2</sub>

- Rozdíl mezi CO<sub>2</sub> z nedávno vyrostlé biomasy (součást koloběhu CO<sub>2</sub>) a z fosilních zdrojů (CO<sub>2</sub> „navíc“)

CH<sub>4</sub> – primárně u motorů poháněných zemním plynem či bioplynem

N<sub>2</sub>O – relativně málo významné, ale mohou být problém u některých katalytických zařízení

Saze, „black carbon“ – podstatný skleníkový efekt (2. po CO<sub>2</sub>)



# Skleníkový efekt

Energetická bilance Země – příjem = výdej – každé záření má jiné spektrum (teplota Slunce >> teplota Země)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_body\\_radiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Black_body_radiation)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law)

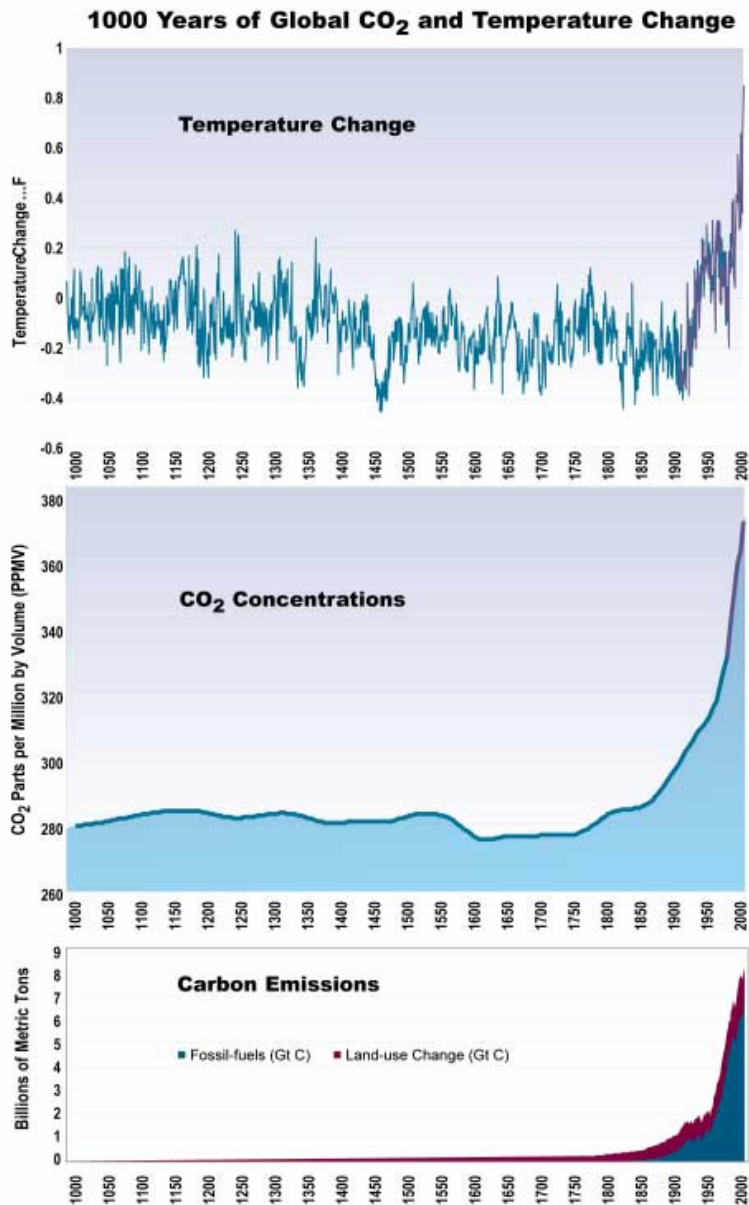
Heterogenní molekuly absorbují záření v infračerveném spektru

Vyšší koncentrace skleníkových -> vyšší záchyt infračerveného záření vyzařovaného Zemí

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C3%ADkov%C3%BD\\_efekt](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C3%ADkov%C3%BD_efekt)

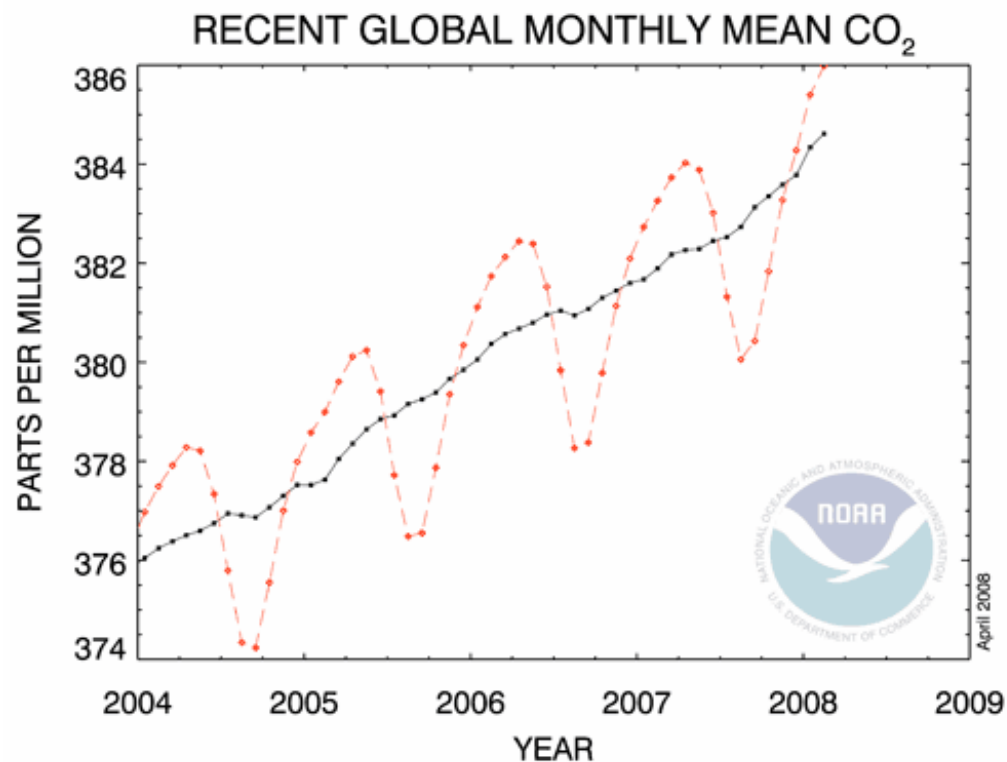
[http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect)





## Emise skleníkových plynů, trendy koncentrace CO<sub>2</sub>, trendy průměrné teploty

<http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalassessment/LargerImages/OverviewGraphics/1000YrRecords.jpg>



Zdroj: NOAA, USA

<http://www.esrl.noaa.gov/news/2008/img/co2trend.m.gif>



# Historické trendy CO<sub>2</sub>

Určení historických koncentrací CO<sub>2</sub> ze vzorků ledu z ledovců (většinou Antarktida)

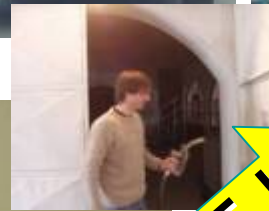
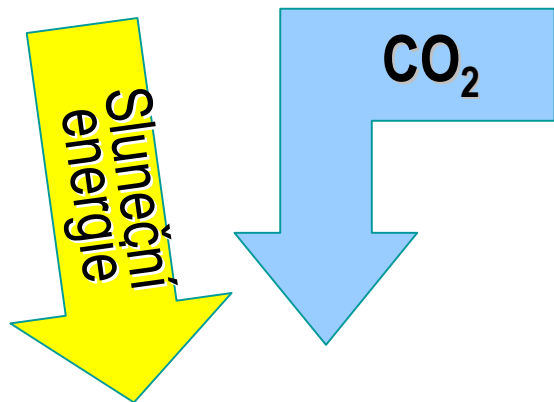
<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/ekologie/merenico2.htm>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1034/j.1600-0889.1991.t01-1-00002.x/pdf>

[ftp://ftp.nilu.no/pub/NDACC/thompson/AGAGE/MacFarlingMeure\\_GRL\\_2000yrCO2CH4N2O.pdf](ftp://ftp.nilu.no/pub/NDACC/thompson/AGAGE/MacFarlingMeure_GRL_2000yrCO2CH4N2O.pdf)



# Kdy je emitovaný CO<sub>2</sub> skleníkový plyn: Koloběh uhlíku u biopaliv



DOPRAVA

TEPLO



Olejnate plodiny

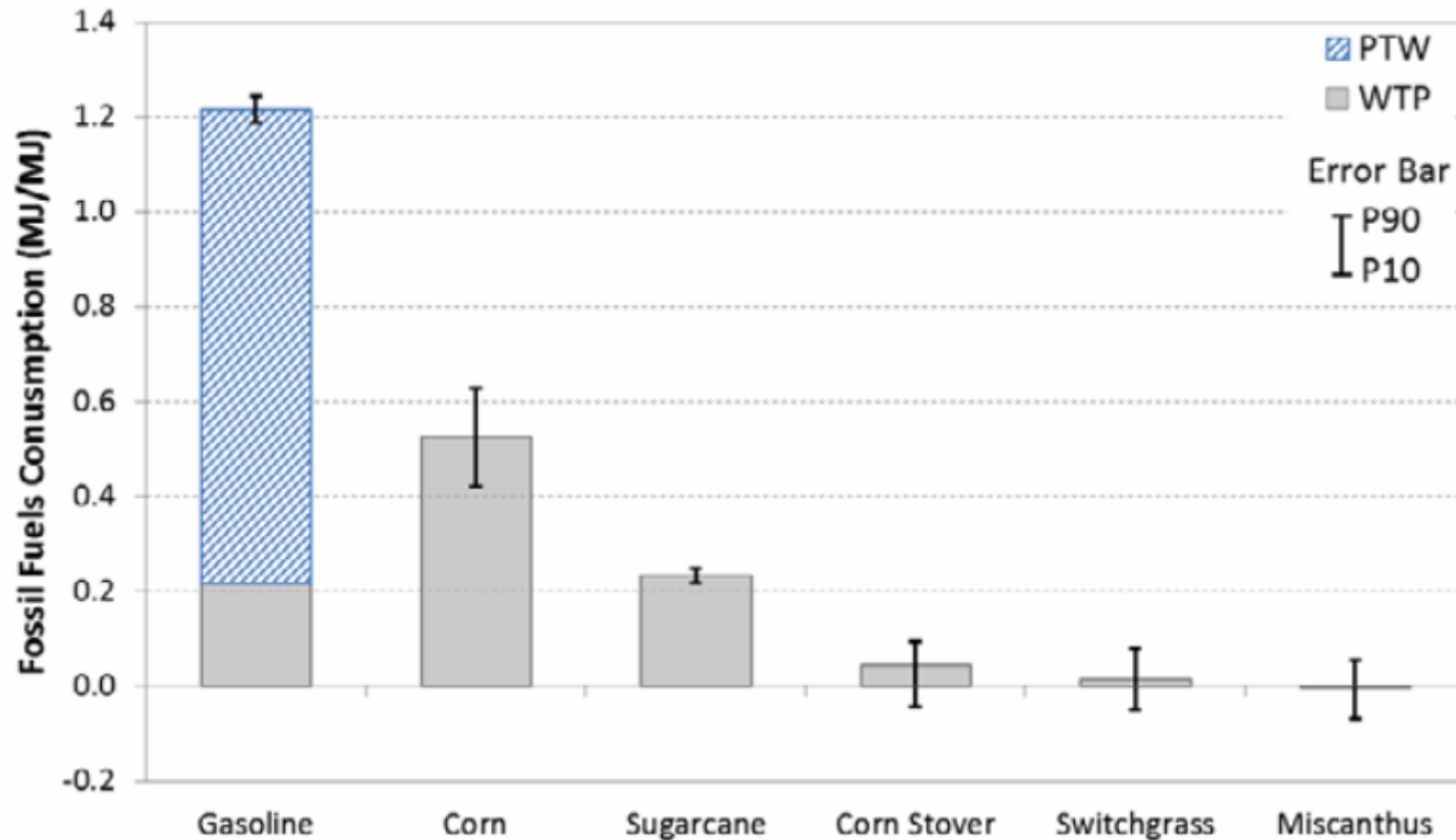
POKRUTINY

Živiny (popel)

CO<sub>2</sub>



# Energetická náročnost biopaliv



Wang et al., Environ. Res. Lett. 7 (2012) 045905

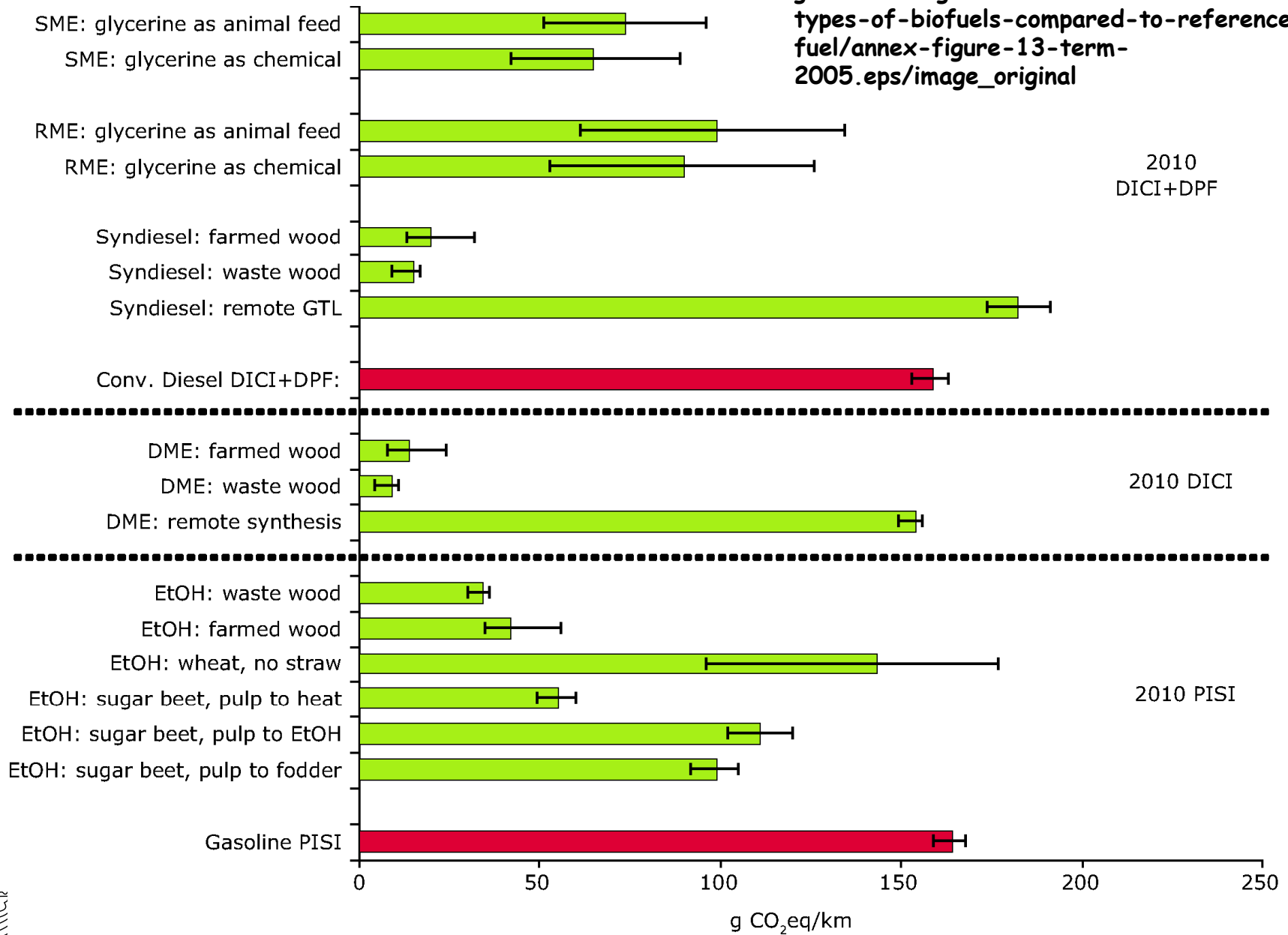
[http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/4/045905/pdf/1748-9326\\_7\\_4\\_045905.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/4/045905/pdf/1748-9326_7_4_045905.pdf)

Vojtíšek – emise ze spalovacích motorů a jejich měření – ZVC 2015

Centrum vozidel udržitelné mobility FS ČVUT – michal.vojtisek@fs.cvut.cz – tel. 774 262 854



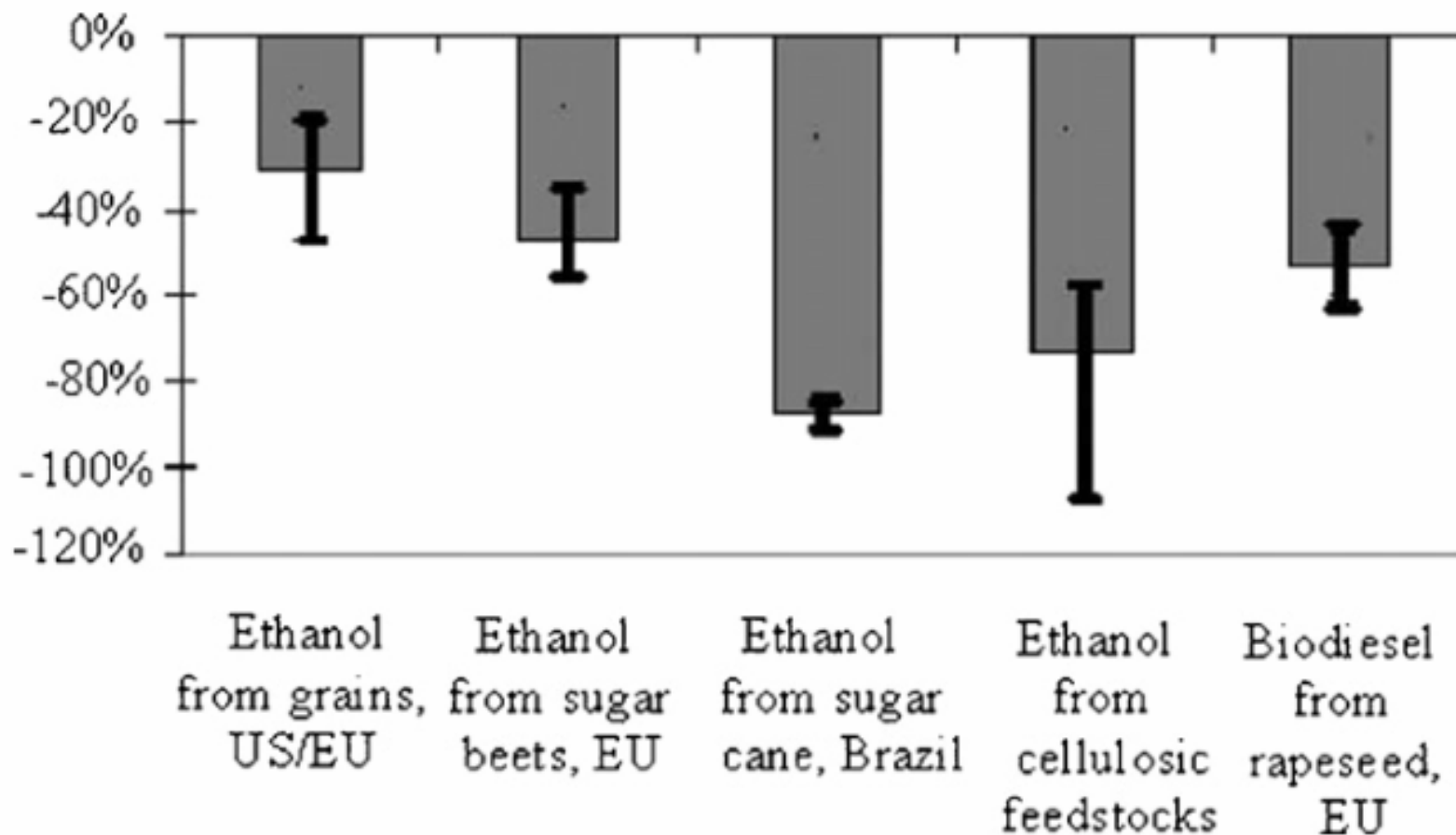
[http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/overall-well-to-wheel-greenhouse-gas-emissions-of-various-types-of-biofuels-compared-to-reference-fuel/annex-figure-13-term-2005.eps/image\\_original](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/overall-well-to-wheel-greenhouse-gas-emissions-of-various-types-of-biofuels-compared-to-reference-fuel/annex-figure-13-term-2005.eps/image_original)





# Energetická náročnost biopaliv

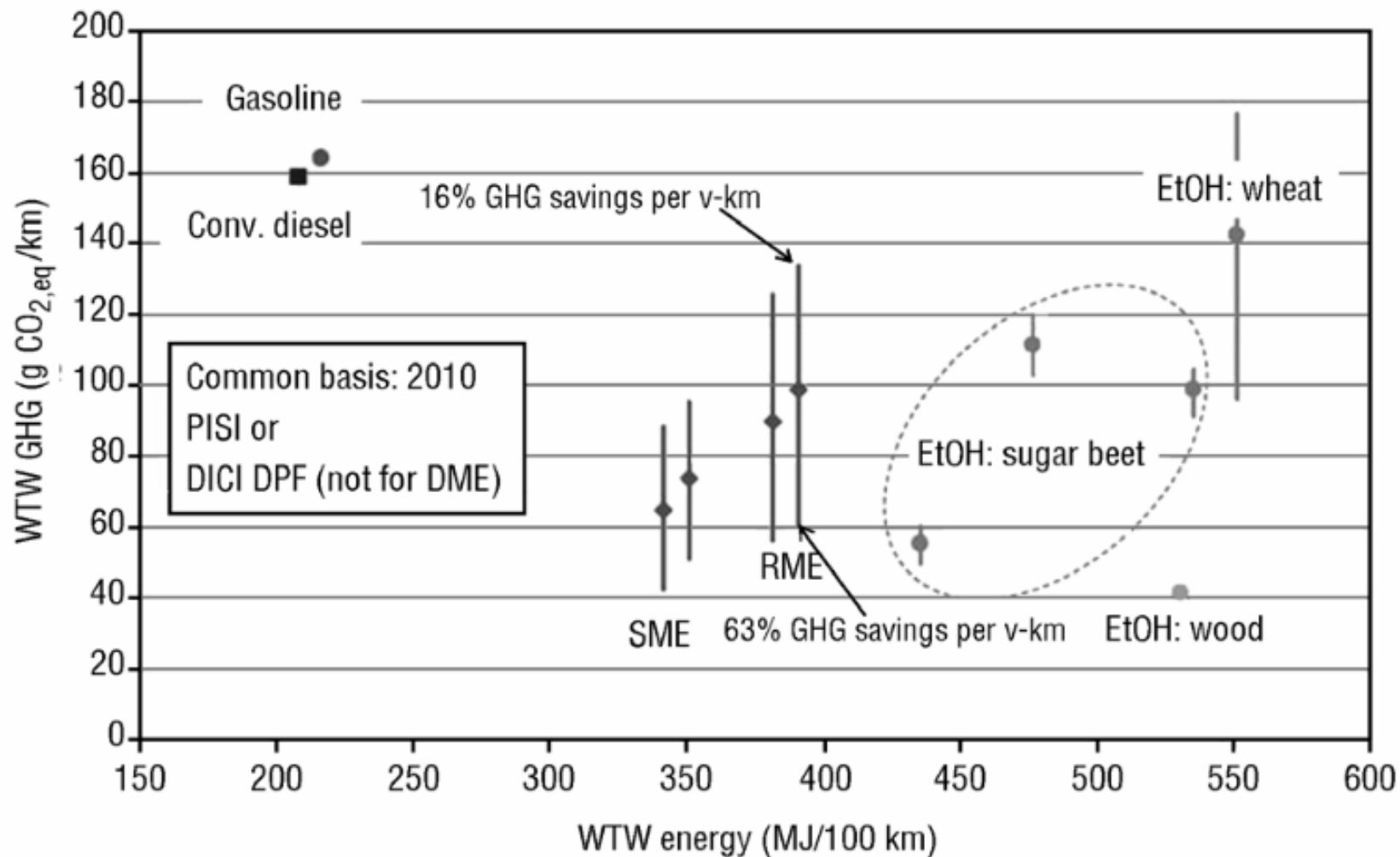
*K. Bozbas / Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 542–552*



# Energetická náročnost biopaliv

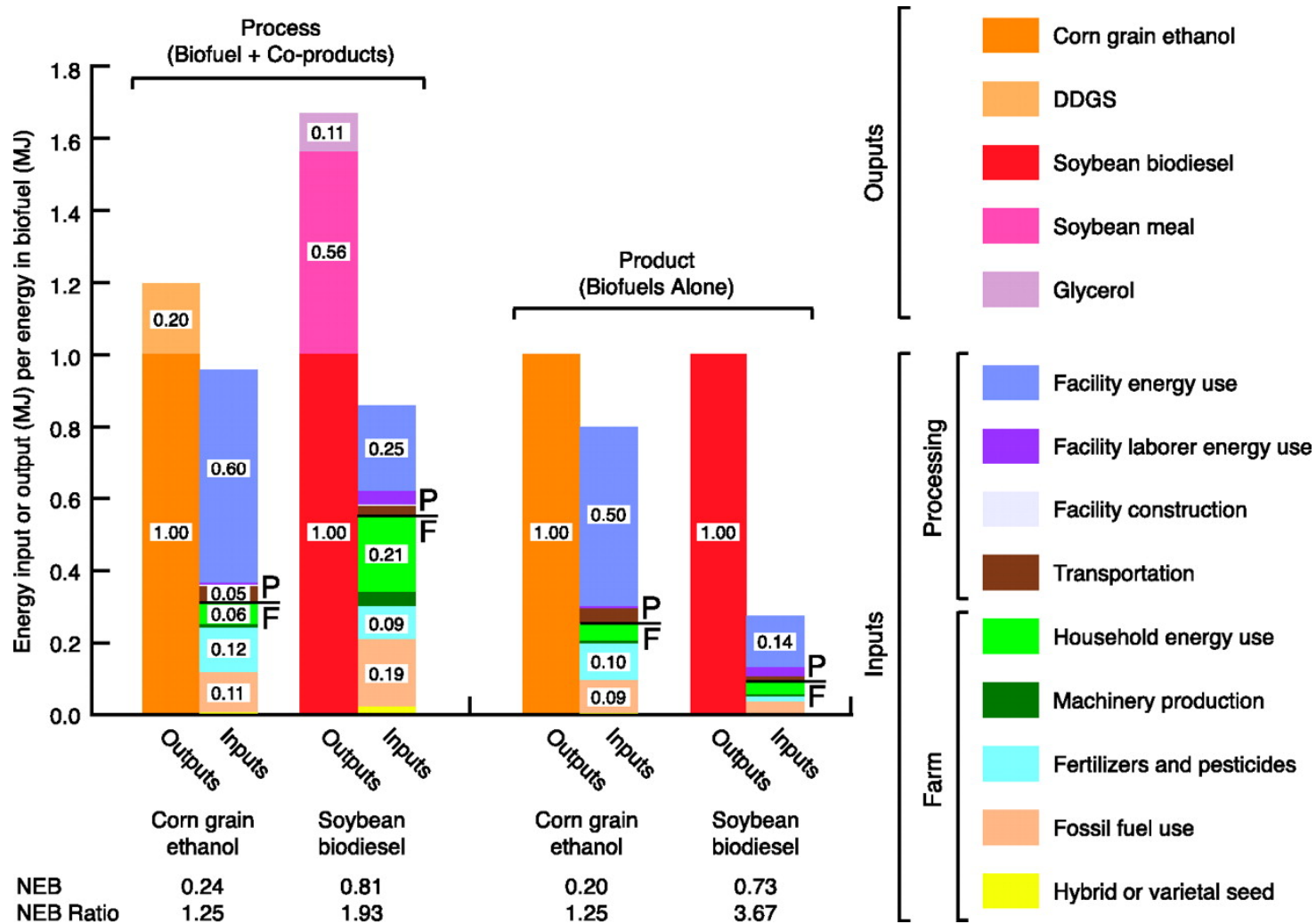
Larson, Energy for Sustainable Development, 10, 2, 2006, 109-126.

<http://francois.catroux.free.fr/CNAM/ENF208-Energie%20et%20developpement%20durable/2008/sdarticle4.pdf>



# Energetická náročnost biopaliv

## NEB of corn grain ethanol and soybean biodiesel production.



Hill J et al. PNAS 2006;103:11206-11210

# Oxidy dusíku, amoniak

Vysoké p,T – disociace N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O

Zeldovičův mechanismus vzniku

Prudký pokles p,T při expanzi – „zamrznutí NO“

Většina NO<sub>x</sub> emitována jako NO

NO se oxiduje na NO<sub>2</sub> – v atmosféře či katalyzátoru

Vymývání z atmosféry – kyselina dusičná (mokrý deponice)  
nebo dusitany a dusičnany (suchá deponice)

NO<sub>2</sub> dráždivý, NO<sub>x</sub> – podíl na troposférickém ozonu

Amoniak

[http://en.wikipedia.org/wiki/Yakov\\_Borisovich\\_Zel%27dovich](http://en.wikipedia.org/wiki/Yakov_Borisovich_Zel%27dovich)

<http://en.wikipedia.org/wiki/NOx>



# Troposférický ozon

Přízemní – troposférický - ozón – rozdíl od stratosférického, vznik a zánik, následky ozonu

Poměry VOC, NO<sub>x</sub> a ozon – v EU nesnížen  
ozon – ozon se mj. spotřebovává na NO -> NO<sub>2</sub>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Tropospheric\\_ozone](http://en.wikipedia.org/wiki/Tropospheric_ozone)



# Organické látky

formaldehyd, acetaldehyd, 1,3-butadien,  
akrylaldehyd, benzen, toluen, xyleny

Polyaromatické uhlovodíky (PAU)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Benzo%28a%29pyrene>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Aromatic\\_hydrocarbon#List\\_of\\_PAHs](http://en.wikipedia.org/wiki/Aromatic_hydrocarbon#List_of_PAHs)

<http://en.wikipedia.org/wiki/3-Nitrobenzanthrone>



# Částice

Částice – vznik, složení, působení na lidský organismus, rozložení podél cest, korelace blízkost silnice a nemocnost

Primární částice – EC, OC, kovy, anorganika  
- PAH, oxy-PAH, nitro-PAH, 3-NBA

Sekundární částice – kondenzace aerosolů, dusičnany, sírany, apod.



# Dopady na zdraví

## Počet předčasných úmrtí – znečištění ovzduší

WHO: 7 milionů lidí ročně na světě (25.3.2014)

<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

European Environment Agency: 350 tisíc ročně v EU

<http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/reducing-the-20ac-45-billion>

European Environmental Bureau: 455 tisíc ročně v EU – jen částice

<http://www.eeb.org/EEB/index.cfm/news-events/news/air-pollution-threat-highlighted-at-launch-of-2013-year-of-air/>

DG ENV: 406 tisíc ročně v EU, částice + troposférický ozon

Státní zdravotní ústav (2013?) – 7-8 tis. Ročně

<http://apps.szu.cz/svi/hygiena/archiv/h2013-1-02-full.pdf>





# Částice

Viz. prezentace Vojtíšek - „Nanočástice ze spalovacích motorů a jejich rizika“

[http://medetox.cz/wp-content/uploads/2013/01/2012-26\\_OO-53-62\\_Vojtisek-Nano%20emistovan%20s%20palovac%20mi%20motory%20v%20m%20st%20sk%20m%20provozu.pdf](http://medetox.cz/wp-content/uploads/2013/01/2012-26_OO-53-62_Vojtisek-Nano%20emistovan%20s%20palovac%20mi%20motory%20v%20m%20st%20sk%20m%20provozu.pdf)

[http://medetox.cz/wp-content/uploads/2012/09/2012-8\\_GenTox-2012\\_Vojtisek\\_nanocastice-uvod.pdf](http://medetox.cz/wp-content/uploads/2012/09/2012-8_GenTox-2012_Vojtisek_nanocastice-uvod.pdf)



# Zařízení pro úpravu výfukových plynů

Třícestný katalyzátor (TWC)

Oxidační katalyzátor (DOC)

Selektivní redukční katalyzátor (SCR)

Úložiště NO<sub>x</sub> (LNT) s regenerací

Filtr částic (DPF)

Kombinace výše uvedených



# Techniky omezování emisí

## Zážehové motory

- Stechiometrická směs, lambda-regulace, TWC
- recirkulace výfukových plynů – EGR
- chudá směs – pokročilé spalování, oxidační katalyzátor, LNT

## Vznětové motory

- Vysokotlaké vstřikování
- Optimalizace časování a dávkování vstřiku
- nízkoteplotní spalování - LTC
- brzký vstřik, DOC, SCR // pozdní vstřik, EGR, DOC+DPF // DOC+DPF+SCR

## Pokročilé metody spalování – HCCI, RCCI, ...



# Techniky omezování emisí

Prezentace

Tim Corning:

Vehicle emissions trends



# Měření výfukových emisí

## Výzkum

- nové znečišťující látky, dopad nových paliv a technologií motorů a zpracování výfukových plynů na lidské zdraví, ...

## Vývoj motorů

### Typové schválení (homologace)

- exempláře nových lehkých vozidel / motorů
- laboratorní měření vybraných látek za určených podmínek
- ověření hladin emisí po dobu životnosti vozidla
- měření v emisí v reálném provozu po dobu životnosti vozidla

### Ověření technického stavu motoru

- palubní diagnostika
- pravidelná technická kontrola
- vzdálené snímání (remote sensing)



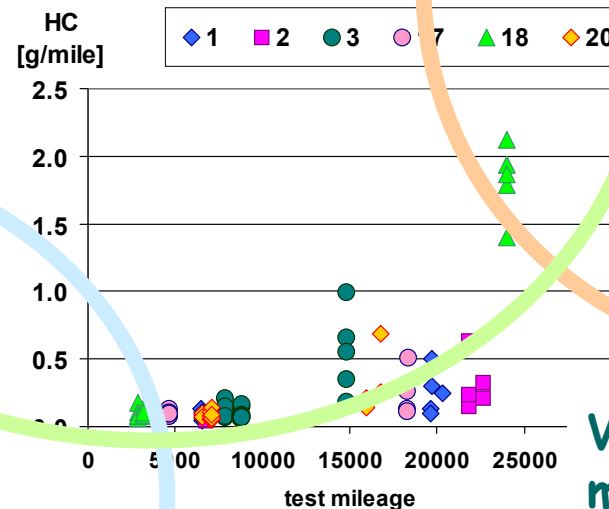
# Sledování emisí během celé životnosti vozového parku

Měření individuálních vozidel v terénu  
Střední počet vozidel  
Podrobná charakterizace emisí měřených vozidel

VZDÁLENÉ SNÍMÁNÍ  
MĚŘENÍ V TUNELECH  
A U DOPRAVNÍCH  
TEPEN

Technická kontrola  
Velký počet vozidel  
Jednoduchá měření  
Celkové průměrné emise vozového parku  
Identifikace vozidel s velmi vysokými emisemi

PALUBNÍ PŘÍSTROJE  
MOBILNÍ LABORATOŘ V  
ZÁVĚSU



LABORATOŘ

EMISE

Stávající laboratorní měření  
Výzkum, vývoj, homologace  
Nízký počet vozidel  
Vysoká cena  
Výkvalitní data

HODINY, KILOMETRY

Vždy je třeba zvážit účel měření, a tomu podřídít přístrojové vybavení a metodiku.

(Levná jednoduchá měření velkého počtu vozidel, náročnější měření malého počtu)



# Legislativa

## Typové schválení (homologace)

- EU
- EHK (UN ECE)
- USA – US EPA, CARB (Kalifornie)
- Japonsko
- několik dalších zemí vlastní předpis, jiné adoptovaly EU nebo USA

## Přehled legislativy (pozor na časté aktualizace!)

- věstník EU – EUR LEX - <http://eur-lex.europa.eu/>
  - přesné, aktuální, srozumitelné informace, překlady do češtiny
  - velmi obsáhlé dokumenty
- Diesel Net - [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)
- Delphi - [http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/emissions\\_standards/](http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/emissions_standards/)



# Jaké motory?

## Prakticky všechny

- historický důraz na silniční motory
- postupné zařazování dalších kategorií

## Motocykly

## Automobily a lehká vozidla

- schvaluje se celý automobil s daným motorem, limity na km

## Těžká silniční vozidla

- schvaluje se pouze motor, limity na kWh

## Nesilniční motory

- lokomotivy
- lodní motory
- stacionární motory





# Vybavení a postupy zkušebny

Předepsaná zkušební paliva

Předepsané klimatické podmínky

Ustálení - preconditioning

Dynamometr

Jízdní / zkušební cyklus

Stanovení koeficientů pro vozidlový dynamometr

Denormalizace zkušebního cyklu pro motorový dynamometr

Spotřeba paliva

Průtok nasávaného vzduchu

Průtok zředěných výfukových plynů

Koncentrace sledovaných látek ve výfukových plynech

Příprava, nulování, kalibrace, linearizace analyzátorů

Metrologická trasovatelnost měření k primárním standardům

Regulace a měření teplot a dalších veličin



# Jaké látky se sledují

## Současná legislativa

- HC (US EPA – limity pro THC, NMHC)
- CO
- NO<sub>x</sub> (výhledově také pouze NO<sub>2</sub>)
- částice – PM - celková hmotnost
- částice – PN – celkový počet (současně nevolatilní částice nad 23 nm)
- částice - kouřivost
- skleníkové plyny – CO<sub>2</sub>
- formaldehyd (US EPA)

## Předpokládaný vývoj legislativy

- NO<sub>2</sub> (nebo podíl NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>), amoniak, metan
- revize metodiky měření částic



# Detekční metody – dle legislativy

- HC – plamenoionizační detektor (FID)
  - vyhřívaný pro vznětové motory (HFID)
  - katalyzátor pro metan x THC, NMHC = THC - metan
- CO, CO<sub>2</sub> – nedisperzní infračervený spektrometr (NDIR)
- NO<sub>x</sub> – chemiluminescenční analyzátor
  - měří NO, konvertor NO<sub>2</sub> -> NO, amoniak -> NO
- O<sub>2</sub> – paramagnetický analyzátor
- PM - celková hmotnost – gravimetrie (vážková metoda)
- PN – čítač dle PMP (Particle Measurement Programme)
- kouřivost - opacimetr



# Detekční metody – plynné látky - literatura

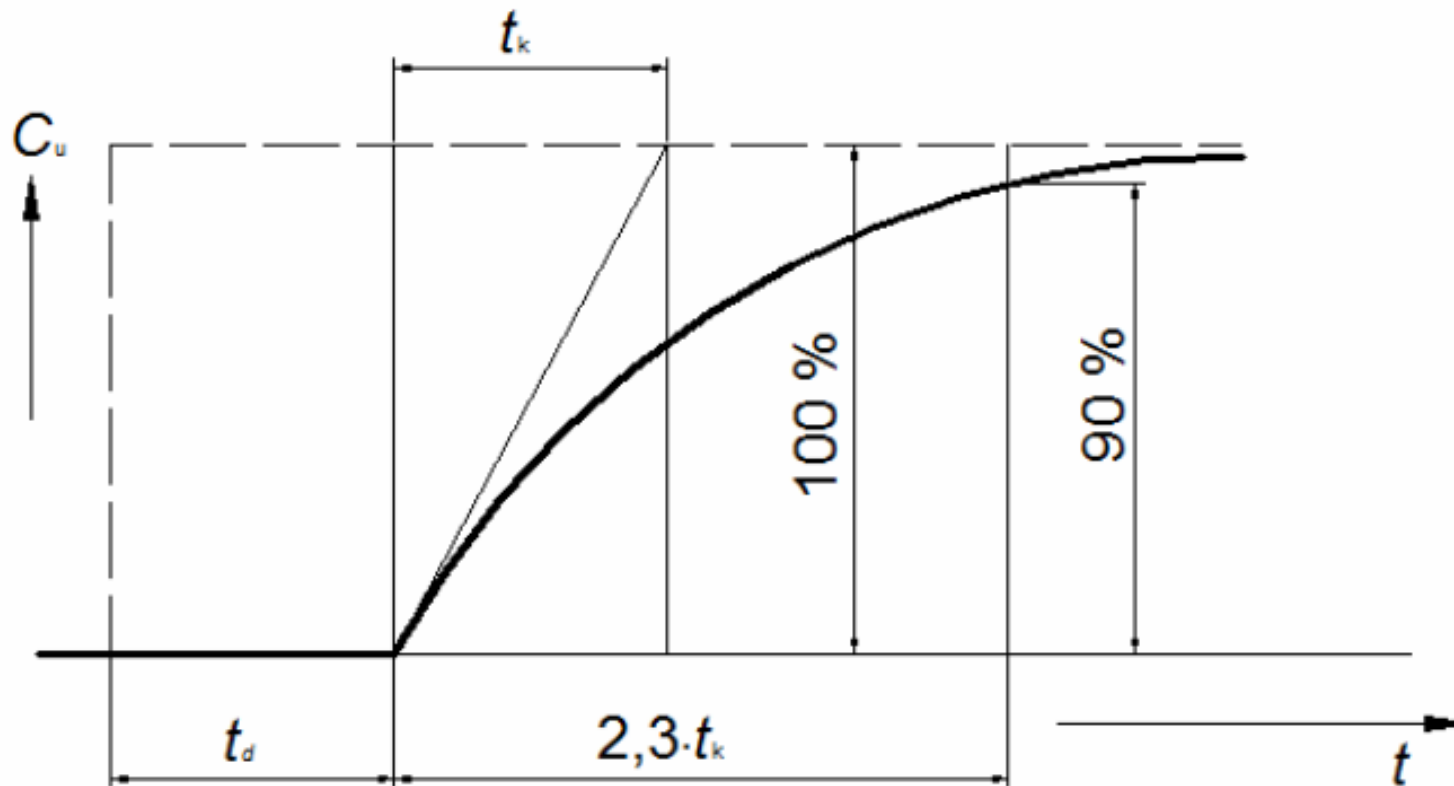
- HC – plamenoionizační detektor (FID)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Flame\\_ionization\\_detector](http://en.wikipedia.org/wiki/Flame_ionization_detector)
- CO, CO<sub>2</sub> – nedisperzní infračervený spektrometr (NDIR)  
<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/ekologie/merenico2.htm>  
Beer-Lambertův zákon  
<http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/beerlambert.html>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Beer-Lambert>
- NO<sub>x</sub> – chemiluminescenční analyzátor  
– měří NO, konvertor NO<sub>2</sub> -> NO, amoniak -> NO  
[www.ti.bfh.ch/uploads/media/2CLD.pdf](http://www.ti.bfh.ch/uploads/media/2CLD.pdf)
- O<sub>2</sub> – paramagnetický analyzátor  
– viz. skripta prof. Takátse



# Odezva přístroje

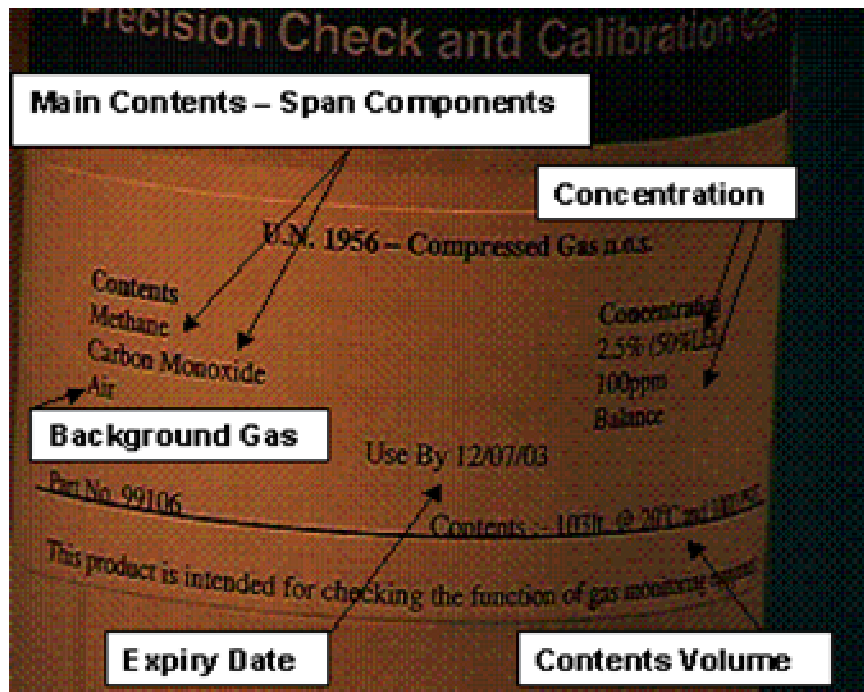
[https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/vyslouzf/docs/dynamicke\\_vlast\\_chvs.pdf](https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/vyslouzf/docs/dynamicke_vlast_chvs.pdf)

$t_d$  – dopravní zpoždění,  $t_k$  – časová konstanta



# Kalibrační plyny

<http://paisleyandjohnstone.tripod.com/>



**Linde**  
 LINDE GAS UK LTD.  
 Greenbank Road  
 East Tulce  
 Aberdeen AB12 3BQ  
 Scotland  
 Telephone: (01224) 877409  
 Telefax: (01224) 899444  
 Fax: (01224) 879942  
 Telex: 75103

LINDE GAS UK LTD.  
 Newfield Industrial Estate  
 Tunstall  
 Stoke-on-Trent ST6 5PD  
 England  
 Telephone: (01782) 822058  
 Fax: (01782) 852350  
 Telex: 367247

To : GAS MEASUREMENT INSTRUMENTS  
 Your order number: 54181  
 Cylinder type : 10AL  
 Cylinder number : 0116427  
 Valve connection : BS No 4  
 Date : 15/01/2003  
 Gas volume : 1.35 MS

Our Order Number: 1/1/26040/E  
 To reorder this product quote product code: A/ 7959.430

Mixture Category: CERTIFIED STANDARD

CALIBRATION MIXTURE			MIXTURE SPECIFICATION		
Component	Certified Value	Requested Value	Range	Preparation Tolerance	Certification Accuracy
OXYGEN	20.0 %	20.5 %	10% to 50%	± 5%	± 2%
PENTANE	0.122X	0.120X	1% to 10%	± 10%	± 2%
NITROGEN	BALANCE		100 ppm to 1%	± 10%	± 2%
			1ppm to 100ppm	± 20%	± 5%

REMARKS: See numbers 6, 9, 12

Signature: *L. Hamill*  
 L. HAMILL (Laboratory Chemist)

Component	Certified Value	Requested Value

REMARKS

- 1. The cylinder must be stored horizontally.
- 2. The cylinder must be stored vertically.
- 3. The cylinder should be made homogeneous before every use (ie by rolling the cylinder).
- 4. The conformity of the mixture is only guaranteed by using the gas at a temperature of C.
- 5. The stability of the mixture is only guaranteed if the mixture has not been exposed to a temperature above C.
- 6. The stability of the mixture is only guaranteed if the mixture has not been exposed to a temperature below 0 C.
- 7. The stability of the mixture is guaranteed up to a settle pressure of BAR.
- 8. We guarantee the stability of the mixture until January 2006 as far as the mixture has not received improper treatment, and as far as our remarks have been complied with.
- 9. The cylinder contains an eductor tube.
- 10. On top of the liquid phase a pressure of BAR has been added.
- 11. Preparation of this mixture is in accordance with the following standard.
- 12. All units are in MOLE% or ppm (MOLE). All equipment used is traceable to NPL standards. NPL Ref No. 5265

Registered to I.S.O. 9002 Part 2 Cert No. FM 823  
 Company Registered in England Reg. No. 2103630



Vojtíšek – emise ze spalovacích motorů a jejich měření – ZVC 2015  
 Centrum vozidel udržitelné mobility FS ČVUT – michal.vojtisek@fs.cvut.cz – tel. 774 262 854

# Měření částic

Měření hmotnosti částic - gravimetrická metoda

[http://www.dieselnet.com/tech/measure\\_pm\\_col.php](http://www.dieselnet.com/tech/measure_pm_col.php)

Měření počtu částic

- Nevolatilní částice s průměrem větším než 23 nm

<http://www.engr.ucr.edu/~heejung/publications/2012-PMP.pdf>

Kouřivost metodou zčernání filtru

Kouřivost - opacita

Pokročilé metody

- Velikostní spektra

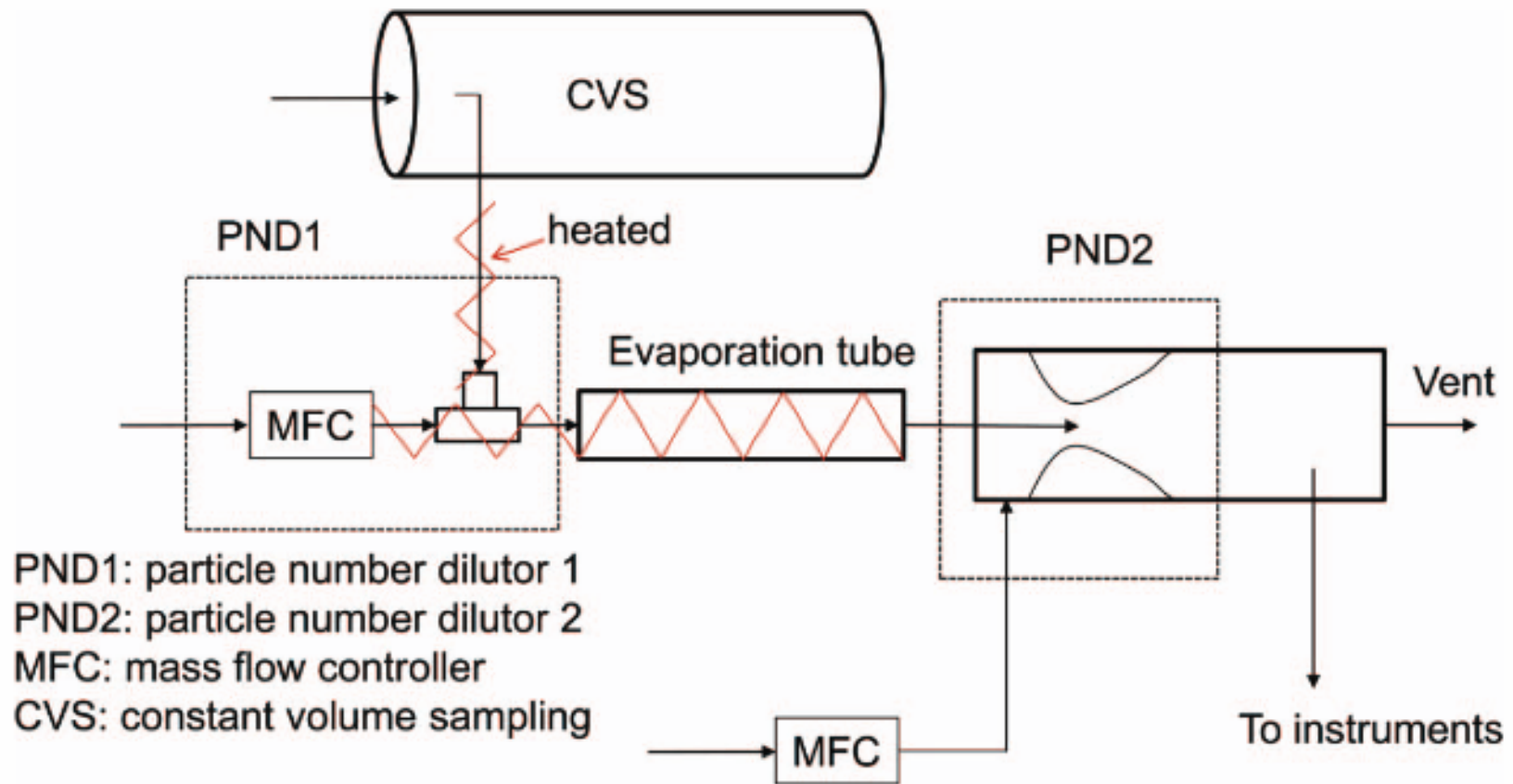
- podíl elementárního a organického uhlíku (EC/OC)

- termogravimetrie



# Měření počtu částic - PMP

<http://www.engr.ucr.edu/~heejung/publications/2012-PMP.pdf>





# Měření opacity

$$\text{Opacita} = 1 - E/E_0$$

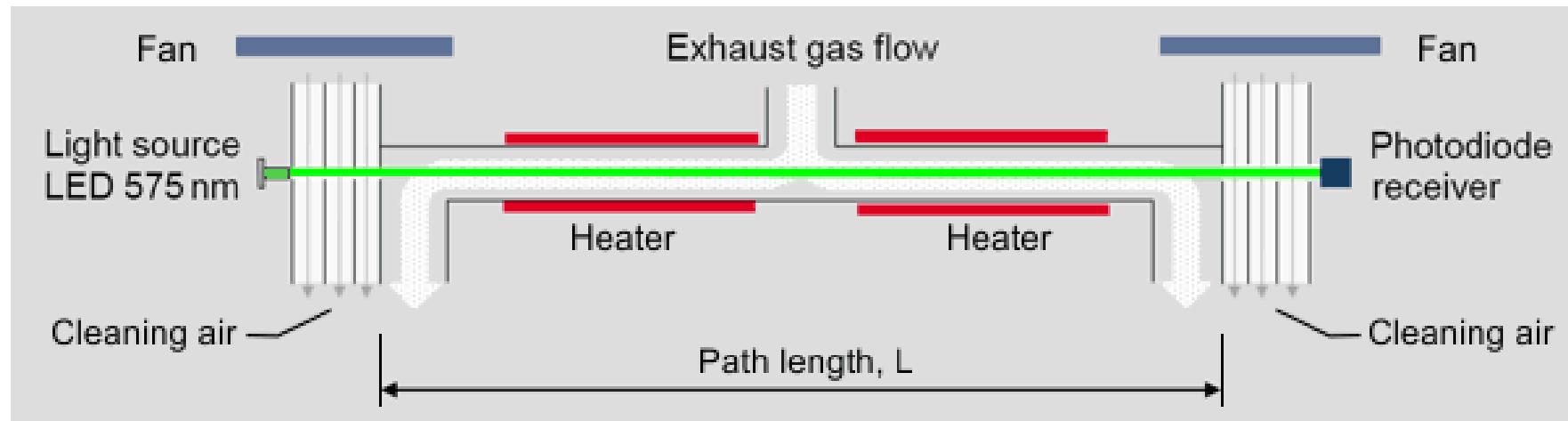
E – intenzita světla po průchodu

E<sub>0</sub> – intenzita světla bez částic

$$\text{Opacita} = 1 - \exp(-kL)$$

L = délka optické dráhy paprsku

k = absorbční koeficient



# Měření opacity

SAE standard J-1667

<http://www.arb.ca.gov/enf/hdvip/saej1667.pdf>

<http://www.wagerusa.com/media/files/6500operationsmanual.pdf>



# Válcová zkušebna pro lehká vozidla

[http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy\\_z\\_projektu/04~TUL%20-%20KI%C3%AD%C4%8Dov%C3%A1%20aktivita%204/In-TECH2\\_valce.pdf](http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/04~TUL%20-%20KI%C3%AD%C4%8Dov%C3%A1%20aktivita%204/In-TECH2_valce.pdf)



# Detekční metody – STK

## Pravidelné kontroly

- HC, CO, CO<sub>2</sub> – NDIR
- NO, O<sub>2</sub> – elektrochemické články
- PM – kouřivost – kouřoměr (opacimetr)

## Remote sensing

- pohlcení IR, UV, viditelného světla oblakem za vozidlem
- měřené koncentrace vždy vztaženy k CO<sub>2</sub> nebo HC+CO+CO<sub>2</sub> a přepočteny na kg paliva



# Detekční metody – výzkumné

- NH<sub>3</sub>, formaldehyd, NO<sub>2</sub> a další – FTIR
- velikostní spektra částic (SMPS, EEPS, ...)
- podíl uhlíku v částicích – EC/OC, termogravimetrie
- černé saze – absorpce světla nebo beta záření
- PAU a další – chromatograf
  - GC-MS, HPLC s fluorescenční detekcí
- kovy – PIXE, difrakce rentgenového záření
- elektronový mikroskop
- a další...



# Evropské limity pro CO2

US EPA CAFE (Corporate Average Fuel Efficiency)

Dobrovolné limity ACEA

[http://www.dieselnet.com/standards/eu/ghg\\_acea.php](http://www.dieselnet.com/standards/eu/ghg_acea.php)

EU GHG

<http://www.dieselnet.com/standards/eu/ghg.php>

[http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm)

Příklady aktualizací:

11.3.2014 CO2 automobily

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R0333&rid=1>

26.2.2014 CO2 lehká užitková vozidla

<http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R0253&rid=2>



# Legislativa

Přehled: [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)

<http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Passenger-Car-Light-Duty-Truck-Emissions-Brochure-2014-2015.pdf>

<http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Heavy-Duty-Emissions-Brochure-2013-2014.pdf>

Lehká silniční vozidla - UN ECE

[http://en.wikipedia.org/wiki/World\\_Forum\\_for\\_Harmonization\\_of\\_Vehicle\\_Regulations](http://en.wikipedia.org/wiki/World_Forum_for_Harmonization_of_Vehicle_Regulations)

[http://www.unece.org/trans/main/wp29/meeting\\_docs/wp29.html](http://www.unece.org/trans/main/wp29/meeting_docs/wp29.html)

Pracovní skupina UN ECE 29 (WG 29) – cyklus WLTP

<https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=2523179>

<https://www2.unece.org/wiki/display/trans/PMP+30th+session>

EHK 96

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:42014X0322%2801%29&rid=2>

EHK 49

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:42013X0624%2801%29&qid=1397370548333&from=EN>

Rekreační plavidla, vodní skútry

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0053&rid=10>

US EPA Tier 3

[http://www.dieselnet.com/standards/us/ld\\_t3.php](http://www.dieselnet.com/standards/us/ld_t3.php)



# Legislativa – lokomotivy (dotaz 28.4.)

## USA federální 40 CFR 1033

<http://cfr.regstoday.com/40cfr1033.aspx>

<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2011-title40-vol33/pdf/CFR-2011-title40-vol33-part1033.pdf>

<http://www.epa.gov/otaq/locomotives.htm>

<http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/locomotv/frm/f99036.pdf>

<http://www.dieselnet.com/standards/us/loco.php>

## Měření – prezentace Steve Fritz Southwest Research Institute

<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/771161>

## Kalifornie

<http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/loco/loco.htm>

## EU přehled

[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/documents/legislation/emissions-non-road/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/documents/legislation/emissions-non-road/index_en.htm)

<http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

<http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#rail>

## EU 97/68/EC konsolidované v platném znění

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1997L0068:20130110:EN:PDF>





# Legislativa – aktualizace PMP

Pracovní skupina PMP

<https://www2.unece.org/wiki/display/trans/PMP+30th+session>

sub 23 nm

[https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/16450001/GPRE-PMP-30-09%20DRAFT%20Sub23nm%20report\\_JRC\\_20140212.pdf?api=v2](https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/16450001/GPRE-PMP-30-09%20DRAFT%20Sub23nm%20report_JRC_20140212.pdf?api=v2)



# Hmotové bilance

Palivo a vzduch do motoru, emise z motoru

Odchytky od zákona zachování hmotnosti  
(profuky, ředění oleje palivem)

Výpočet AFR / lambda ze složení paliva

<http://www.bridgeanalyzers.com/EGA/Automotive/mediaRepos/productDocs/White%20Paper%209.pdf>

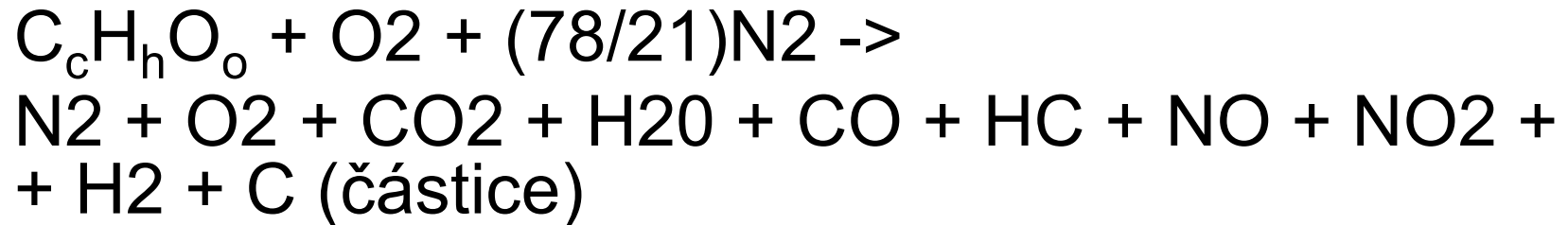
SAE 972989 – Brettschneider

[http://www.horiba.com/uploads/media/R015-04-017\\_01.pdf](http://www.horiba.com/uploads/media/R015-04-017_01.pdf)

Výpočet složení paliva ze složení výfukových emisí



# Hmotové bilance

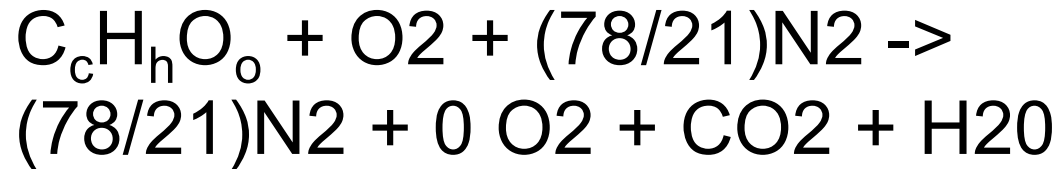


Z praktického hlediska lze zanedbat

- spalování motorového oleje
- ztráty paliva do motorového oleje
- ztráty plynů do klikové skříně (profuky)
- obsah síry a dalších látek v palivu



# Hmotové bilance – ideální spalování



Teoretická spotřeba vzduchu

$$n(\text{O}_2) = n(\text{palivo}) \times (c + \frac{1}{4} h - \frac{1}{2} o)$$

$$1 \text{ mol metanu (CH}_4\text{): } n(\text{O}_2) = 2 \text{ mol}$$

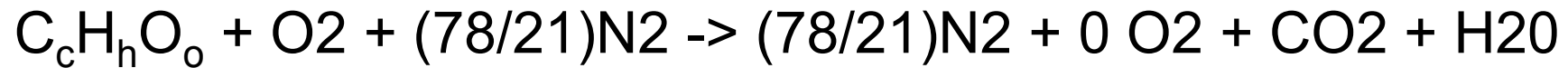
$$1 \text{ kg metanu: } m(\text{O}_2) = M(\text{O}_2) * 2 n(\text{CH}_4) =$$

$$= M(\text{O}_2) * 2 m(\text{CH}_4) / M(\text{CH}_4)$$

$$= 32 \text{ g/mol} * 2 * 1 \text{ kg} / 16 \text{ g/mol} = 4 \text{ kg O}_2$$



# Teoretická spotřeba vzduchu



Teoretická spotřeba vzduchu

$$n(O_2) = n(\text{palivo}) \times (c + \frac{1}{4} h - \frac{1}{2} o)$$

$$n(\text{vzduch}) = 1/0.21 \times n(O_2)$$

1 mol **metanu** (CH<sub>4</sub>):  $n(O_2) = 2 \text{ mol}$

1 kg metanu:  $m(\text{vzduch}) = n(\text{vzduch}) \times M(\text{vzduch})$

$$= 1/0.21 * 2 n(\text{CH}_4) * M(\text{vzduch})$$

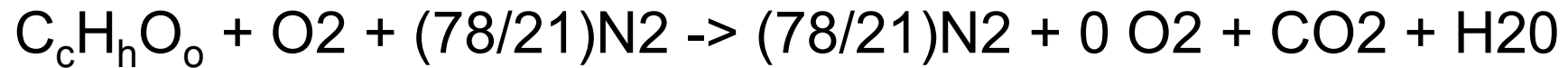
$$= 1/0.21 * 2 m(\text{CH}_4) / M(\text{CH}_4) * M(\text{vzduch})$$

$$= 1/0.21 * 2 * 1 \text{ kg} / 16 \text{ g/mol} * 28.7 \text{ g/mol}$$

$$= 17.08 \text{ kg vzduchu}$$



# Teoretická spotřeba vzduchu



Teoretická spotřeba vzduchu

$$n(O_2) = n(\text{palivo}) \times (c + \frac{1}{4} h - \frac{1}{2} o)$$

$$n(\text{vzduch}) = 1/0.21 \times n(O_2)$$

1 mol **benzínu/nafty** (CH<sub>2</sub>):  $n(O_2) = 1.5$  mol

1 kg benzínu/nafty (bez biosložky):

$$m(\text{vzduch}) = n(\text{vzduch}) \times M(\text{vzduch})$$

$$= 1/0.21 * 1.5 n(\text{CH}_2) * M(\text{vzduch})$$

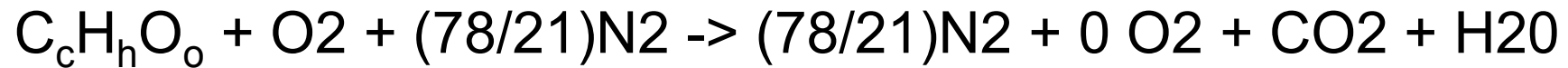
$$= 1/0.21 * 1.5 m(\text{CH}_2) / M(\text{CH}_2) * M(\text{vzduch})$$

$$= 1/0.21 * 1.5 * 1 \text{ kg} / 14 \text{ g/mol} * 28.7 \text{ g/mol}$$

$$= 14.64 \text{ kg vzduchu}$$



# Teoretická spotřeba vzduchu



Teoretická spotřeba vzduchu

$$n(O_2) = n(\text{palivo}) \times (c + \frac{1}{4} h - \frac{1}{2} o)$$

$$n(\text{vzduch}) = 1/0.21 \times n(O_2)$$

1 mol etanolu (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH):  $n(O_2) = 3$  mol

1 kg etanolu:

$$m(\text{vzduch}) = n(\text{vzduch}) \times M(\text{vzduch})$$

$$= 1/0.21 \times 3 n(\text{etanol}) \times M(\text{vzduch})$$

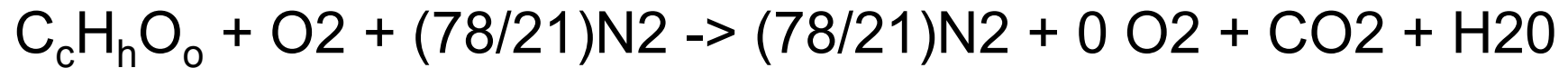
$$= 1/0.21 \times 3 m(\text{etanol}) / M(\text{etanol}) \times M(\text{vzduch})$$

$$= 1/0.21 \times 3 \times 1 \text{ kg} / 46 \text{ g/mol} \times 28.7 \text{ g/mol}$$

$$= 8.91 \text{ kg vzduchu}$$



# Implikace pro spalování biopaliv



Teoretická spotřeba vzduchu

$$n(O_2) = n(\text{palivo}) \times (c + \frac{1}{4} h - \frac{1}{2} o)$$

$$n(\text{vzduch}) = 1/0.21 \times n(O_2)$$

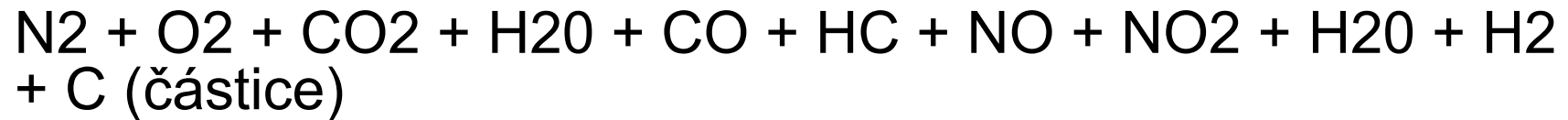
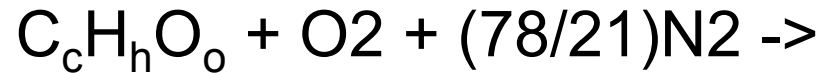
1 kg etanolu ~ 8.9 kg vzduchu

1 kg benzinu (bez biosložky) ~ 14.7 kg vzduchu

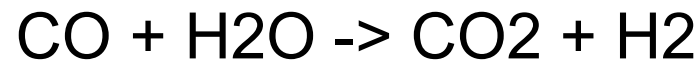




# Hmotové bilance



## Rovnice reakce vodního plynu



$$K = [CO] [H_2O] / [CO_2] [H_2]$$

$$K \sim 3.5 \text{ (skripta Takáts)}$$

[http://en.wikipedia.org/wiki/Water-gas\\_shift\\_reaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Water-gas_shift_reaction)

<http://matlab.cheme.cmu.edu/2011/12/12/water-gas-shift-equilibria-via-the-nist-webbook/>

<http://papers.sae.org/2004-01-0592/> - zdarma na

<http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/122018.pdf>

Vollmer EMPA:  $[H_2] \sim 0.48 [CO]$  [http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/68312/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/68312/---/l=1)

Vodík se neměří, lze měřit hmotnostním spektrometrem

Je-li  $[H_2O] \sim [CO_2]$ , pak  $[H_2] \sim 1/3.5 \times [CO]$



# Hmotové bilance – Brettschneiderova rovnice

Složení paliva  $C_c H_h O_o$

x – objem uhlíku v HC

$$\text{Lambda} = \frac{c ([CO_2] + [O_2] + 0.5[CO] + 0.5[NO])}{(c + \frac{1}{4}h - \frac{1}{2}o) ([CO] + [CO_2] + x[HC])} +$$

$$\frac{(\frac{1}{4} h * (K / (K + ([CO]/[CO_2]))) - \frac{1}{2} o}{(c + \frac{1}{4}h - \frac{1}{2}o)}$$



# Hmotové bilance – Brettschneiderova rovnice

$$\lambda = \frac{c*([\text{CO}_2]+[\text{O}_2]+1/2[\text{CO}]+1/2[\text{NO}]) + (1/4h*(K/(K+([\text{CO}]/[\text{CO}_2]))) - 1/2o)*([\text{CO}]+[\text{CO}_2]+x[\text{HC}])}{(c+1/4h-1/2o)*([\text{CO}]+[\text{CO}_2]+x[\text{HC}])}$$

Viz. Též

<http://www.bridgeanalyzers.com/EGA/Automotive/mediaRepos/productDocs/White%20Paper%209.pdf>

[http://www.horiba.com/uploads/media/R015-04-017\\_01.pdf](http://www.horiba.com/uploads/media/R015-04-017_01.pdf)

