TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zážehové motory při provozu na biobutanolová paliva

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce: **Ing. Martin Pechout**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Liberec 2016

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

Spark ignition engines in case of biobutanol fuels operation

Dissertation

Study programme: P2302 – Machines and Equipment
Study branch: 2302V010 – Machine and Equipment Design

Author: **Ing. Martin Pechout**
Supervisor: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Liberec 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14. 12. 2016

Podpis:

Poděkování

Poděkování náleží především mému školiteli doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za odborné vedení práce a četné a podnětné konzultace v průběhu jejího řešení. Dále bych rád touto formou poděkoval kolegům Ing. Aleši Dittrichovi a Ing. Martinu Mazačovi za spolupráci při realizaci experimentů.

V neposlední řadě náleží můj dík i mé rodině za podporu v průběhu celé doby studia.

Následně chci poděkovat za poskytnutí finanční podpory formou grantu Možnosti použití vyšších alkoholů jako rychlé náhrady benzínu Studentstké grantové soutěže na TUL a dále také za podporu při zahraničních výjezdech.

Souhrn

Práce se zaobírá možnostmi použití paliv obsahujících butanol, jakožto alkohol vyrobitelný z obnovitelných zdrojů, v současných zážehových motorech.

Z teoretické rozvahy vyplývá, že vlastnosti obou uvažovaných izomerů (n-butanolu a iso butanolu) jsou v mnohém výhodnější oproti etanolu, kdy vyniká například nižší nutný nárůst doby vstřiku (přibližně 21 %) pro butanol nežli prakticky dvojnásobný pro etanol.

Následuje experimentální porovnání charakteristických rysů spalování benzinu, čistých izomerů butanolu a jejich směsí v zážehovém motoru s otevřeným řízením včetně nalezení a porovnání optimálních předstihů zážehu pro několik vybraných režimů. Rovněž je pro jeden provozní režim vyhodnocena činnost třísložkového katalytického reaktoru.

Spalování butanolu bylo zkoumáno na motoru s otevřeným řízením za několika vybraných provozních režimů a na vozidlovém motoru při ustálených režimech, pokrývajících většinu provozní oblasti motoru. U vozidlového motoru byla sledována míra zachování výchozí bohatosti směsi a u obou pak průběh hoření. Výsledkem je doporučené mírné snížení předstihu zážehu při nízkých zatíženích zejména pro n-butanol. Dále bylo konstatováno snižování teplot výfukových plynů s rostoucí náhradou benzinu butanolem. Rovněž třísložkový katalytický reaktor vykazoval schopnost korektní funkce bez ohledu na podíl butanolu v palivu. Zároveň se však v nemalé míře projevila vysoká teplota varu butanolu, deformující destilační křivku, a vedoucí k výraznému zhoršení startovatelnosti studeného motoru. U zkoušeného vozidlového motoru se projevila již od středních podílů butanolu.

Jízdní zkoušky za reálných podmínek při provozu prohřátého motoru ukazují úspěšnost adaptace řídicí jednotky motoru pro jednotlivé podíly butanolu včetně vysokých. Část vozidel byla schopna za reálného provozu s prohřátým motorem akceptovat bez jakýchkoliv úprav poloviční, a v některých případech i vyšší, podíl butanolu za cenu problematické startovatelnosti. V případě přímého vstřiku paliva byla testována pouze nižší koncentrace, avšak bez zaznamenatelných potíží. V případech úspěšné adaptace převládaly emise plynných znečišťujících látek srovnatelné s provozem na benzin. Navíc výsledky ukazují výrazný pokles produkce pevných částic při přímém vstřiku paliva do válce. Dále jsou v teoretické rovině porovnána opatření pro zachování startovatelnosti motoru, která byla zjištěna jako problematická při přídavku butanolu.

Z těchto experimentů na malých motorech vyplývá možnost zachovat nezměněnou bohatost směsi jednoduchou úpravou karburátoru, srovnatelné či nižší produkce sledovaných plynných znečišťujících látek a výrazný pokles emitovaných pevných částic. Daní za toto je zhoršená startovatelnost studeného motoru při vysokých koncentracích butanolu a několikanásobný nárůst množství vypouštěných aldehydů, je-li místo benzinu spalován butanol.

Celkově lze pro oba izomery butanolu očekávat obdobný potenciál pro úspěšné nahrazení benzinu v řádu nízkých až vysokých desítek procent v závislosti na míře úprav motorů.

Klíčová slova: spalovací motor, alkoholové palivo, biopalivo, n-butanol, iso-butanol butanol, analýza průběhu hoření, emise, plynné znečišťující látky, jízdní zkoušky, pevné částice, malé motory, aldehydy

Summary

The thesis investigates the possibilities of utilization of fuels containing butanol, which can be produced from renewable resources, in current spark ignition engines.

From a theoretical assessment follows that both considered butanol isomers (n-butanol and iso butanol) have about half of the necessary fuel injection prolongation (approximately 21 %) compared to ethanol.

The combustion of two butanol isomers, n-butanol and isobutanol, has been investigated on an open-control engine at few selected operating regimes and on an ordinary vehicle engine at steady state points covering most of the engine operating area. The air to fuel ratio change has been evaluated as an indicator of vehicular engine control unit adaptation and for both engines exhaust gas temperatures and composition. Based on these results, a suitable spark advance decrease is suggested at low loads mainly for n butanol; this is less pronounced for the vehicle engine. A small exhaust gas temperature decrease was observed with increasing butanol share. The three-way catalytic converter exhibited correct performance regardless of the concentration of butanol utilized. Higher butanol boiling temperature caused changes in distillation curve and significantly worsened cold engine startability at medium to high shares of butanol.

Driving tests were carried out on four cars representing the in-use vehicle fleet at real world driving conditions with hot start and utilizing mixtures including high butanol shares. Some tested vehicles were able to accept half, and in some cases higher, butanol share during real-world operation with hot engine without any engine modification, but the cold engine startability was very problematic. Only moderate butanol share was tested in a vehicle with a direct injection engine. No issues were detected during utilization. In case of successful control unit adaptation the exhaust emissions of gaseous pollutants were mostly comparable to gasoline-only operation. In addition, particulate matter emissions were dramatically reduced by using a butanol mixture in the direct injection engine. The countermeasures to ensure proper cold engine startability, which is found problematic if significant butanol share is used, are discussed and compared.

Experiments on small engines resulted in possibility of maintaining unchanged air to fuel ratio with a simple modification of the carbuteror; this has resulted in comparable or lower emissions of gaseous pollutants and a significant decrease of particulate matter emissions. On the other hand, cold engine startability and aldehyde emissions were worsened at high butanol share mixtures.

The results suggest a potential for blending of tens of percent of either n-butanol or isobutanol into gasoline, with the concentration dependent on engine parameters and on the degree of its modification.

Keywords: combustion engine, alcohols, biofuel, n-butanol, isobutanol, butanol heat release analysis, emissions, gaseous pollutants, driving tests, particulate matter, small engines, aldehydes

Obsah

Seznam zkratek a symbolů 10

1 Úvod 13

2 Výroba butanolu a výběr izomerů k experimentům na motorech 14

3 Shrnutí a výběr izomerů a přehled vlastností 15

4 Rozbor vlivu základních vlastností butanolu na spalování 16

4.1 Porovnání potřebné změny dávky paliv z hlediska energetického toku 16

4.2 Porovnání výhřevnosti čistých paliv z hlediska plnicího vzduchu 17

4.3 Porovnání výhřevností benzinových, butanolových a etanolových palivových směsí 18

4.4 Zhodnocení tlaku nasycených par a destilační křivky butanolových směsí 19

4.5 Vliv použití butanolu na oktanové číslo stanovené výzkumnou metodou 22

4.6 Posouzení vlivu butanolu na adiabatický exponent 23

4.7 Porovnání dalších vlastností paliv 27

5 Přehled experimentů provedených jinými autory 28

6 Cíle disertační práce 30

7 Porovnání charakteristik vstřikovače při použití benzinu a butanolu 31

8 Výsledky experimentů na motoru s otevřeným řízením 34

8.1 Porovnání spalování vybraných izomerů butanolu s benzinem 34

8.1.1 Vliv použití butanolu na průběh hoření a polohu optimálního předstihu 34

8.1.2 Vliv použití butanolu na teploty výfukových plynů 44

8.2 Vliv použití butanolu na účinnost třísložkového katalyzátoru 47

8.3 Závěry vyplývající z experimentů provedených na motoru s otevřeným řízením 53

9 Výsledky experimentů na vozidlovém motoru 54

9.1 Popis adaptace řídicí jednotky motoru 55

9.2 Vliv butanolu na průběh hoření 59

9.3 Porovnání funkce zařízení pro úpravu výfukových plynů 68

9.4 Porovnání výkonových parametrů a zhodnocení experimentů na vozidlovém motoru 74

10 Výsledky jízdních zkoušek při využití benzin-butanolových směsí 75

10.1 Výsledky jízdních zkoušek vozidla s jednobodovým vstřikem paliva 77

10.2 Výsledky provozu vozidla s vícebodovým vstřikem paliva 82

10.3 Výsledky provozu vozidla s vícebodovým vstřikem a fungujícím třísložkovým katalyzátorem 85
10.4 Popis jízdních zkoušek vozidla s přímým vstřikem 87
11 Malé motory při provozu na butanolová paliva 94
11.1 Výsledky použití benzin-butanolové směsi v jednostopém vozidle 94
11.2 Výsledky použití butanolu v elektrické centrále 96
11.3 Použití benzin-butanolových směsí v zahradní sekačce trávy 100
11.4 Butanol v malém čtyřdobém motoru pro křovinořez 101
11.5 Butanol v malém dvoudobém motoru pro křovinořez 106
11.6 Stručný souhrn poznatků získaných v průběhu experimentů na malých motorech 110
12 Teoretický rozbor možností řešení výrazně zhoršené startovatelnosti neprohřátých motorů 111
13 Zhodnocení dosažených výsledků disertační práce a doporučení směřování budoucích aktivit 113
Seznam použité literatury 115
Seznam původních prací, vztahujících se k tématu disertační práce 119
Přílohy 120

Seznam zkratek a symbolů

BA	benzin automobilový dle ČSN EN 228
CLA	Chemiluminiscenční analyzátor
CO	Colorado
CO	oxid uhelnatý
DE	Delaware
EEPS	engine exhaust particle sizer
ES	evropské společenství
FID	plamenoionizační detektor (flame ionization detector)
FTIR	infračervený analyzátor využívající fourierovu transformaci
HC	nespálené uhlovodíky
HÚ	horní úvrať
LLC	Limited liability company
LPG	zkapalněný ropný plyn (liquid petroleum gas)
NDIR	nedisperzní infračervený analyzátor
NO_x	oxidy dusíku
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
PM	Pevné částice v hmotnostním vyjádření
PN	Pevné částice v početním vyjádření
TWC	třícestný katalytický reaktor
ε	kompresní poměr motoru
ρ_{alk}	hustota alkoholového paliva
ρ_{benz}	hustota benzinu
ρ_{pal}	hustota paliva
ρ_{p1}	hustota základního paliva
ρ_{p2}	hustota přidaného paliva
λ	součinitel přebytku vzduchu
κ	součinitel adiabatické změny
η_{vol}	Objemová účinnost motoru
a	konstanta Redlich-kwnognovy rovnice
b	konstanta Redlich-kwnognovy rovnice
C	molární podíl uhlíku v palivu
c_{alk}	výtoková rychlost alkoholového paliva
c_{pal}	výtoková rychlost paliva
c_{p2}	objemový podíl přidaného paliva

c_p	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c_v	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
c_{di}	koncentrace složky i v suchých spalinách
c_{wi}	koncentrace složky i v mokrých spalinách
c_{benz}	výtoková rychlost benzinu
I	obecná vlastnost palivové směsi
I_1	obecná vlastnost základního paliva
I_2	obecná vlastnost přidaného paliva
H_{np}	Molární výhřevnost palivové směsi
$\Delta H^{\circ}_{r/nBu}$	reakční entalpie při spalování n-butanolu
$\Delta H^{\circ}_{r/iBu}$	reakční entalpie při spalování iso-butanolu
$\Delta H^{\circ}_{r/Et}$	reakční entalpie při spalování etanolu
$\Delta H^{\circ}_{sl(g)/CO_2}$	slučovací entalpie oxidu uhličitého
$\Delta H^{\circ}_{sl(g)/H_2O}$	slučovací entalpie vody
$\Delta H^{\circ}_{sl(l)/nBu}$	slučovací entalpie n-butanolu
$\Delta H^{\circ}_{sl(l)/iBu}$	slučovací entalpie iso-butanolu
$\Delta H^{\circ}_{sl(l)/Et}$	slučovací entalpie etanolu
H	molární podíl vodíku v palivu
$H_{u/Be}$	výhřevnost benzinu
$H_{u/Et}$	výhřevnost etanolu
$H_{u/nBu}$	výhřevnost n-butanolu
$H_{u/iBu}$	výhřevnost iso-butanolu
$H_{uV/nBu}$	objemová výhřevnost n-butanolu
$H_{uV/iBu}$	výhřevnost iso-butanolu vztažená na spotřebu vzduchu
$H_{uV/Et}$	výhřevnost etanolu vztažená na spotřebu vzduchu
$H_{uV/Be}$	výhřevnost benzinu vztažená na spotřebu vzduchu
M_{Et}	molární hmotnost etanolu
M_{nBu}	molární hmotnost n-butanolu
M_{iBu}	molární hmotnost iso-butanolu
m_1	hmotnostní podíl základního paliva
m_2	hmotnostní podíl přidaného paliva
m_c	dávka paliva na jeden pracovní cyklus
m_{OV}	spotřeba kyslíku ze vzduchu
$m_{O/C}$	spotřeba kyslíku při oxidaci uhlíku

$m_{O/H}$	spotřeba kyslíku při spalování vodíku
m_C	hmotnostní podíl uhlíku v palivu
m_H	hmotnostní podíl vodíku v palivu
m_O	hmotnostní podíl kyslíku v palivu
$m_{C/Bu}$	hmotnostní podíl uhlíku v butanolu
$m_{H/Bu}$	hmotnostní podíl vodíku v butanolu
$m_{O/Bu}$	hmotnostní podíl kyslíku v butanolu
$m_{C/Et}$	hmotnostní podíl uhlíku v etanolu
$m_{H/Et}$	hmotnostní podíl vodíku v etanolu
$m_{O/Et}$	hmotnostní podíl kyslíku v etanolu
$m_{O/C}$	teoretická spotřeba kyslíku pro butanol
$m_{OV/Et}$	teoretická spotřeba kyslíku pro etanol
m_V	hmotnostní množství vzduchu
m_p	hmotnostní množství paliva
$\dot{m}_{pal}$	hmotnostní tok paliva
$\dot{m}_{alk}$	hmotnostní tok alkoholového paliva
$\dot{m}_{benz}$	hmotnostní tok benzinu
M_v	molární hmotnost vzduchu
M_p	molární hmotnost paliva
n	otáčky motoru
n_x	molární množství sledované složky ve spalinách
n_{wet}	molární množství vlhkých výfukových plynů
n_{dry}	molární množství suchých výfukových plynů
n_{H_2O}	molární množství vody ve výfukových plynech
n_H	molární množství vodíku v palivu
n_C	molární množství uhlíku v palivu
n_v	molární množství vzduchu
n_p	molární množství paliva
O	molární podíl kyslíku v palivu
p	tlakový spád mezi zásobníkem paliva a místem vstřiku
p_{atm}	atmosférický tlak
p_{pal}	tlakový spád mezi zásobníkem paliva a místem vstřiku
p_S	tlak v sacím potrubí
p_{RAIL}	tlak v zásobníku paliva

R	univerzální plynová konstanta
T	termodynamická teplota
T_S	teplota nasávaného vzduchu
V	objemové množství
V_{benz}	objem benzinu
V_{Bu}	objem butanolu
V_m	molární objem
V_{vt}	teoretická spotřeba vzduchu
V_z	Zdvihový objem motoru
$\dot{V}_V$	Objemový tok vzduchu
x_i	molární podíl složky v palivové směsi
X_p	molární podíl paliva

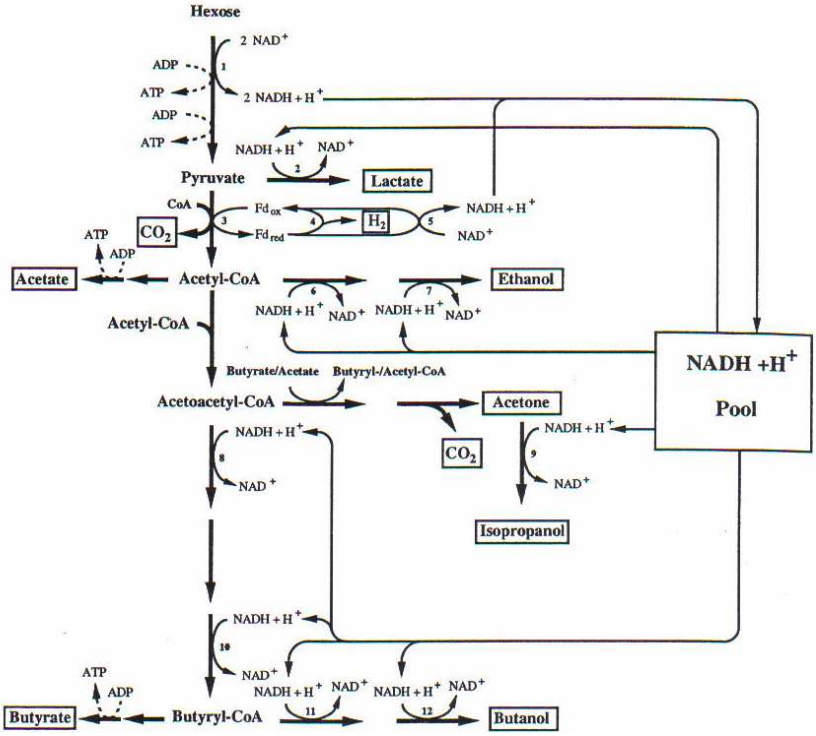
1 Úvod

Již od počátku využívání pístových spalovacích motorů, jakožto tepelných strojů s vnitřním spalováním, bylo nutné řešit otázku vhodného zdroje energie, tedy paliva.
Z pohledu zážehových motorů došlo k jejich největšímu rozšíření, co do počtu i množství spotřebovávaného paliva, zejména v oblasti osobních automobilů, s převládajícím podílem motorů spalujících kapalná paliva. Nicméně s vědomím konečných zásob ropy dochází k nárůstu úsilí o nalezení paliv z jiných zdrojů, což vyústilo ve vyvinutí značného úsilí směřujícího k diverzifikaci energetických nároků dopravy. Toto se projevilo výzkumem a následně zavedením výroby a využitím paliv z obnovitelných zdrojů a využitím dalších, zejména plynných, paliv ropného původu.
V současné době je jako takovéto kapalné palivo produkován a nabízen zejména etanol ve směsi s benzinem, jehož použití však vykazuje jisté negativní vlastnosti ať už z technického či společenského hlediska. Je tedy stále na místě ohlížet se po dalších kapalných palivech, která by vykazovala lepší potenciál z hlediska výrazné náhrady benzinu. Jedním z takových kandidátů je i čtvrtý z homologické řady alkoholů, butanol, jakožto palivo druhé generace vyrobitelné z obnovitelných nepotravinových zdrojů.

Předmětem prováděné disertační práce je shrnutí vlastností jednotlivých izomerů butanolu, důležitých pro použití v zážehových pístových spalovacích motorech, experimentální zjištění průběhu spalování a jeho produktů, určení limitů pro použití butanolu a návrhu opatření pro překonání překážek v použití butanolu jakožto paliva pro zážehové motory.
Experimentální vyšetřování je prováděno s využitím několika konstrukčních variant motorů z pohledu uspořádání tvorby palivové směsi za účelem jejich vzájemného porovnání z hlediska vhodnosti použití butanolu.

2 Výroba butanolu a výběr izomerů k experimentům na motorech

Historicky spadá objev výroby butanolu fermentací do období prvopočátku pístových motorů s vnitřním spalováním. V průběhu rozšiřování znalostí o kvasných procesech byly izolovány další mikroorganismy, které při tomto anaerobním procesu vytvářejí butanol, jejichž základní přehled uvádí [1]. Biologickou cestou je možné produkovat dva ze čtyř možných izomerů butanolu, 1-butanol a iso-butanol, za současné produkce dalších látek, zejména etanolu a acetonu. Butanol nebyl dlouho uvažován jako palivo pro zážehové motory a byl využíván zejména při výrobě syntetického kaučuku a jako rozpouštědlo. Výrazný rozvoj petrochemického průmyslu, který umožnil snazší výrobu butanolu z ropných zdrojů, však na počátku druhé poloviny dvacátého století upozadil výrobu butanolu biologickou cestou.
Spolu s hledáním obnovitelných zdrojů energie však došlo k navázání na historický vývoj a k dalšímu výzkumu v této oblasti. V současné době je sice jako palivo z obnovitelných zdrojů nejvíce využíván etanol, jeho použití je však provázeno řadou negativních jevů. Z technického hlediska vyžaduje značný nárůst dávky paliva pro zachování nezměněného poměru paliva a vzduchu ve válci spalovacího motoru, vykazuje chemickou agresivitu. Distribuci dále komplikuje jeho hygroskopické chování. Společenský přínos spočívá mimo jiné v možnosti výroby z nepotravinové biomasy, na rozdíl od biopaliv první generace včetně etanolu, v důsledku čehož lze očekávat zmírnění vlivu na ceny dotčených potravinových komodit. Toto je umožněno využitím buněčných kultur, které jsou schopny využít nejen cukry, ale i celulózu a tím rozšířit soubor vhodných plodin.



Obrázek 1: *Metabolické dráhy bakterií Clostridium acetobutylicum a C. beijerinckii [2]*

Přestože je problematice výroby butanolu věnována nemalá pozornost, výskytů průmyslové produkce biobutanolu není mnoho. Toto je dáno jednak složitostí chemických pochodů a dodržením vhodných podmínek v důsledku nutnosti odlučovat výsledné produkty, které působí jako inhibitory výrobního procesu či fágová infekce. Z těchto důvodů se nasazením procesů pro výrobu butanolu zabývají specializované společnosti, které poskytují licence k jimi vyvinutým postupům. V současné době zaujímají v těchto aktivitách vedoucí pozici společnosti Butamax, Advanced Biofuels, LLC (Wilmington, DE, USA) a Gevo (Englewood, CO, USA). Součástí jejich aktivit jsou i přestavby stávajících stanic pro výrobu etanolu na produkci biobutanolu. Tao a kol. porovnávali

množství vynaložené energie připadající na jednotku energie přítomnou v n-butanolu, iso-butanolu a etanolu a z hodnocení nejlépe vychází n-butanol, poměrně těsně následovaný etanolem, kdy iso-butanol zůstává s odstupem poslední [3].

3 Shrnutí a výběr izomerů a přehled vlastností

Použití butanolu se, vzhledem k možnostem výroby biologickou cestou, redukuje na n-butanol a iso-butanol. V tabulce 1 jsou uvedeny základní vlastnosti benzinu, obou využitelných izomerů butanolu a etanolu.

Tabulka 1: *Základní parametry uvažovaných paliv*

	Benzin	N-butanol	Iso-butanol	Etanol
OČVM, pro alkoholy jako směsné	95	94−96	113	110
Hustota [kg·m^{-3}]	750	810	806	790
Výhřevnost [MJ·kg^{-1}]	42,9	33,3	33,3	26,8
Objemová výhřevnost [MJ·dm^{-3}]	32,3	27,0	26,8	21,2
Skupenské teplo varu [kJ·kg^{-1}]	380−500	716	579	904
Hmotnostní podíl C [%]	86	65	65	52
Hmotnostní podíl H [%]	14	13,5	13,5	13
Hmotnostní podíl O [%]	0	21,5	21.5	35
Viskozita [mPa·s]	0,4−0,8	2,57	3,33	1,08
Teplota varu [°C]	35−185	118	108	78
Teoretická spotřeba vzduchu [-]	14,7	11,2	11,2	9,0

Již z tohoto základního přehledu vlastností vyplývá, že výhřevnost a teoretická spotřeba vzduchu jsou pro oba izomery butanolu výrazně bližší benzinu jakožto referenčnímu palivu, než v současnosti používanému etanolu. Vzhledem k výrazně nižšímu hmotnostnímu podílu kyslíku v butanolu lze tento mísit ve větších množstvích s benzinem při dodržení legislativního limitu 2,7 % kyslíku v palivu pro benziny s nízkým obsahem kyslíkatých látek a 3,7 % pro benziny s vysokým obsahem kyslíkatých látek.
V případě využití iso-butanolu ve větším množství je pak možné využít vyšších kompresních poměrů v motorech a zvýšit tak jejich účinnost.

4 Rozbor vlivu základních vlastností butanolu na spalování

4.1 Porovnání potřebné změny dávky paliv z hlediska energetického toku

Obecným vlivem při použití kapalných paliv nahrazujících benzin je nutnost změny dávky paliva za účelem dosažení nezměněné bohatosti směsi, respektive využitelného energetického toku obsaženého v palivu, se kterým motor pracuje. Alkoholová paliva obecně, z důvodu vysokého hmotnostního podílu kyslíku, vyžadují znatelný nárůst dodaného paliva.
Potřebnou změnu lze posoudit v kontextu způsobu dávkování paliva buď na základě hmotnostní nebo objemové výhřevnosti. Ve stávajících systémech dodávky paliva v zážehových motorech je využíván systém se zásobníkem paliva s konstantním tlakem, kdy je množství paliva dáno dobou otevření vstřikovače, přesněji délkou elektrického pulzu dodaného řídicí jednotkou motoru.
Sestavením Bernoulliho rovnice a vyjádřením výtokové rychlosti dojdeme k elementárnímu vztahu

$$\dot{c}_{pal} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{pal}} \cdot p_{pal}} \,, \tag{1}$$

ve kterém $\boldsymbol{p_{pal}}$ značí tlakový spád mezi zásobníkem paliva a místem vstřiku paliva, $\boldsymbol{\rho_{pal}}$ hustotu paliva a $\boldsymbol{\dot{c}_{pal}}$ výtokovou rychlost.

Pokud budeme chtít vyjádřit hmotnostní tok na jednotku plochy, obdržíme po aplikaci hustoty paliva vzorec

$$\dot{m}_{pal} = \sqrt{2 \cdot \rho_{pal} \cdot p_{pal}} \,. \tag{2}$$

Obě veličiny jsou v této, maximálně zjednodušené, úvaze ovlivněny jak přetlakem v zásobníku paliva, tak jeho hustotou. Při určení změny dávky paliva za konstantního tlaku paliva v zásobníku lze vyjádřit změnu dodaného paliva následujícím poměrem pro výtokové rychlosti.

$$\frac{\dot{c}_{alk}}{\dot{c}_{benz}} = \sqrt{\frac{\rho_{benz}}{\rho_{alk}}} \tag{3}$$

a následujícím pro hmotnosti

$$\frac{\dot{m}_{alk}}{\dot{m}_{benz}} = \sqrt{\frac{\rho_{alk}}{\rho_{benz}}} \,. \tag{4}$$

V případě dosazení hodnot pro benzin a butanol, uvedených v tabulce 1, obdržíme poměr výtokových rychlostí, tedy objemový poměr dodávek paliva 0,959 a hmotnostní poměr 1,043.
V reálném případě vystupují ještě přechodové děje při otvírání a zavírání vstřikovacího ventilu a ztráty při průtoku reálné kapaliny. Při uvažování shodné rychlosti otevření vstřikovacího ventilu lze očekávat mírný pokles skutečné dávky alkoholových paliv v důsledku jejich vyšší viskozity. Z tohoto důvodu budou poměry (3) a (4) nižší a v jejich důsledku lze očekávat menší změnu hmotnostní dávky paliva než objemové. Z tohoto důvodu má, z hlediska potřebné změny dávky paliva, vyšší vypovídací hodnotu jeho hmotnostní výhřevnost.
Z důvodu nemalého rozptylu hodnot hmotnostní výhřevnosti uvažovaných izomerů butanolu, uváděných v dostupné literatuře, bylo přistoupeno k provedení jejího výpočtu na základě standardních reakčních entalpií reagentů a produktů dokonalého spalování.
Výpočet využívá Hessova zákona, který říká, že celková reakční entalpie je shodná s lineární kombinací jednotlivých reakčních entalpií jednotlivých reakcí. Při výpočtu bylo použito standardních entalpií jednotlivých látek určených při tlaku 101,325 kPa a teplotě 298 K [4].
Například pro n-butanol bude na základě spalovací reakce

$$2 \cdot C_4H_9OH + 5 \cdot O_2 \rightarrow 8 \cdot CO_2 + 10 \cdot H_2O \tag{5}$$

lze stanovit reakční entalpii

$$\Delta H^{\circ}_{r/nBu} = 4\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/CO_2} + 5\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/H_2O} - \Delta H^{\circ}_{sl(l)/nBu} = \\ = -4\cdot 393{,}5\cdot 10^3 - 5\cdot 242{,}8\cdot 10^3 + 328\cdot 10^3 = -2460\cdot 10^3\, J\cdot mol^{-1}, \quad (6)$$

což po vydělení molární hmotností $\boldsymbol{M_{nbu}}$ = 74·10^{-3} kg·mol^{-1} dává výslednou výhřevnost

$$H_{u/nBu} = \frac{\Delta H^{\circ}_{r/nBu}}{M_{nbu}} = \frac{2460\cdot 10^3}{74\cdot 10^{-3}} = 33{,}24\ MJ\cdot kg^{-1}\ . \quad (7)$$

Obdobným postupem můžeme určit hodnoty reakčního tepla a výhřevnosti pro další paliva, tj. iso-butanol a etanol:

$$\Delta H^{\circ}_{r/iBu} = 4\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/CO_2} + 5\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/H_2O} - \Delta H^{\circ}_{sl(l)/iBu} = \\ = -4\cdot 393{,}5\cdot 10^3 - 5\cdot 242{,}8\cdot 10^3 + 334\cdot 10^3 = -2454\cdot 10^3\, J\cdot mol^{-1}, \quad (8)$$

$$H_{u/iBu} = \frac{\Delta H^{\circ}_{r/iBu}}{M_{iBu}} = \frac{2454\cdot 10^3}{74\cdot 10^{-3}} = 33{,}16\ MJ\cdot kg^{-1}\ , \quad (9)$$

$$\Delta H^{\circ}_{r/Et} = 2\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/CO_2} + 3\cdot\Delta H^{\circ}_{sl(g)/H_2O} - \Delta H^{\circ}_{sl(l)/Et} = \\ = -2\cdot 393{,}5\cdot 10^3 - 3\cdot 242{,}8\cdot 10^3 + 276\cdot 10^3 = -1239\cdot 10^3\, J\cdot mol^{-1}, \quad (10)$$

$$H_{u/Et} = \frac{\Delta H^{\circ}_{r/Et}}{M_{Et}} = \frac{1239\cdot 10^3}{46\cdot 10^{-3}} = 26{,}93\ MJ\cdot kg^{-1}\ , \quad (11)$$

Pro benzin, jakožto výchozí palivo, je uvažována výhřevnost 43,0 MJ·kg^{-1}.
Při uvažování shodného požadavku na mechanický výkon dodávaný motorem a nezměněné celkové účinnosti motoru, a tím i energetického toku v palivu, je zapotřebí navýšit hmotnostní dávku v případě použití čistého butanolu pro oba jeho izomery o 29,5 %, respektive o 61,1 % v případě použití čistého etanolu.
Je zde tedy jasně patrný přibližně poloviční požadavek na navýšení hmotnostního množství dodávaného paliva při použití butanolu v porovnání s etanolem.

4.2 Porovnání výhřevnosti čistých paliv z hlediska plnicího vzduchu

Při dosažení požadovaného nárůstu dávky paliva, potřebného k zachování potřebné bohatosti směsi, je maximální množství tepla, uvolněného spalováním, limitováno množstvím kyslíku dostupného pro spalovací proces. Při shodném stupni vyhoření směsi a objemovém podílu odpařeného paliva ve směsi je množství uvolněného tepla závislé na zastoupení spalovaných prvků. Množství vyprodukované mechanické práce je pak ještě ovlivněno změnami v účinnosti tepelného oběhu a mechanické účinnosti motoru.
Při doplnění chemických rovnic dokonalého spalování vodíku a uhlíku o molární hmotnosti reagentů a produktů dojdeme, po odečtení množství kyslíku v palivu $\boldsymbol{m_O}$, k následujícímu vyčíslení spotřeby vzdušného kyslíku $\boldsymbol{m_{OV}}$

$$m_{OV} = m_{O/C} + m_{O/H} = \frac{32}{12}m_C + \frac{16}{2}m_H - m_O \quad (12)$$

Při uvažování 1 kg paliva přejdou absolutní hmotnosti v hmotnostní podíly jednotlivých prvků v palivu. Při použití hmotnostních podílů uhlíku, vodíku a kyslíku v benzinu $\boldsymbol{m_{C/Be}}$ = 0,860, $\boldsymbol{m_{H/Be}}$ = 0,132 a $\boldsymbol{m_{O/Be}}$ = 0,008 [5] dojdeme k výsledku, že pro dokonalé spálení 1 kg benzinu je zapotřebí 3,341 kg vzdušného kyslíku.
Pro butanol, jakožto látku s molekulou C_4H_9OH, jsou hmotnostní podíly $\boldsymbol{m_{C/Bu}}$ = 0,649, $\boldsymbol{m_{H/Bu}}$ = 0,135 a $\boldsymbol{m_{O/Bu}}$ = 0,216 a teoretická spotřeba kyslíku tak bude $\boldsymbol{m_{OV/Bu}}$ = 2,595.
Pro etanol, jakožto nejčastěji používané kapalné neropné palivo, s molekulou C_2H_5OH, jsou hmotnostní podíly $\boldsymbol{m_{C/Et}}$ = 0,522, $\boldsymbol{m_{H/Et}}$ = 0,130 a $\boldsymbol{m_{O/Et}}$ = 0,348 a teoretická spotřeba kyslíku tak bude $\boldsymbol{m_{OV/Et}}$ = 2,084.

K množství využitelného tepla vztaženého na 1 kg kyslíku se lze dopracovat vynásobením převrácené hodnoty teoretické spotřeby kyslíku $\boldsymbol{m_{OV/i}}$, představující množství paliva spáleného s využitím 1 kg kyslíku, příslušnou výhřevností paliva $\boldsymbol{H_{u/i}}$. V případě benzinu obdržíme

$$H_{uV/Be} = \frac{Hu_{/Be}}{m_{OV/Be}} = \frac{43{,}0}{3{,}341} = 12{,}87\ MJ \cdot kg^{-1}. \tag{13}$$

Pro butanol tímto postupem obdržíme

$$H_{uV/iBu} \doteq H_{uV/nBu} = \frac{H_{u/Bu}}{m_{OV/Bu}} = \frac{33{,}2}{2{,}595} = 12{,}79\ MJ \cdot kg^{-1} \tag{14}$$

a pro etanol

$$H_{uV/Et} \doteq H_{uV/nEt} = \frac{H_{u/Et}}{m_{OV/Et}} = \frac{26{,}9}{2{,}084} = 12{,}92\ MJ \cdot kg^{-1}. \tag{15}$$

Z těchto výsledků vyplývá, že při dodržení bohatosti směsi by mělo, za předpokladu shodného průběhu hoření a stupně vyhoření, dojít pouze k zanedbatelným změnám v množství uvolněného tepla a tím i dostupného točivého momentu.

4.3 Porovnání výhřevností benzinových, butanolových a etanolových palivových směsí

V praktickém použití se pro označování směsí paliv obvykle využívá objemového vyjádření příměsi, důležité vlastnosti jednotlivých složek jsou však zpravidla vztaženy na hmotnostní množství. Z uvedených důvodů je obsah přidaných složek vyjadřován jako objemový s tím, že důležité vlastnosti jsou přepočteny pomocí vyjádření hmotnostních podílů:

$$m_1 = \frac{m_{p1}}{m_{p1} + m_{p2}} = \frac{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) \cdot V}{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) \cdot V + \rho_{p2} \cdot c_{p2} \cdot V} = \frac{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2})}{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) + \rho_{p2} \cdot c_{p2}} \tag{16}$$

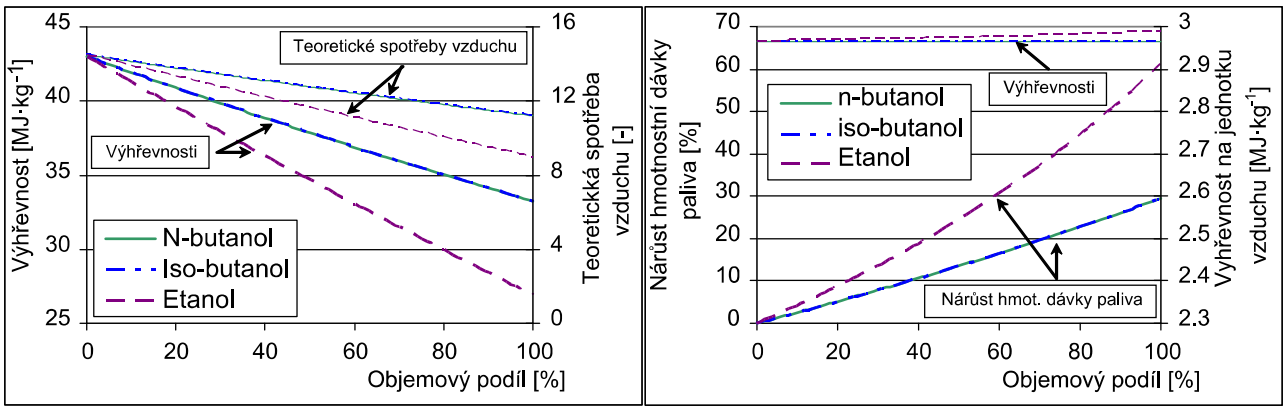
a

$$m_2 = \frac{m_{p2}}{m_{p1} + m_{p2}} = \frac{\rho_{p2} \cdot c_{p2}}{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) + \rho_{p2} \cdot c_{p2}}, \tag{17}$$

kde index ***1*** označuje základní palivo, tedy benzin, a ***2*** přidané, v tomto případě alkoholové, palivo. Hmotnostní podíl i-té složky je značen $\boldsymbol{m_i}$, hmotnost složky paliva $\boldsymbol{m_{pi}}$, její hustota $\boldsymbol{\rho_{pi}}$, objemový podíl složky $\boldsymbol{c_{pi}}$ a celkový objem paliva $\boldsymbol{V}$. Pro obecnou, na hmotnostní bázi paliva založenou, vlastnost $\boldsymbol{I}$ lze pak aplikovat výpočet

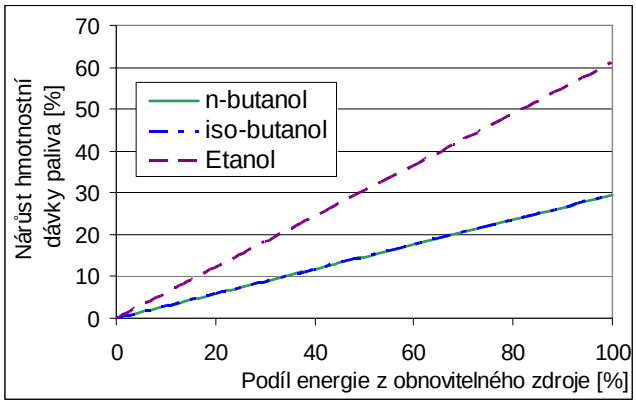
$$I = m_1 \cdot I_1 + m_2 \cdot I_2 = \frac{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2})}{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) + \rho_{p2} \cdot c_{p2}} \cdot I_1 + \frac{\rho_{p2} \cdot c_{p2}}{\rho_{p1} \cdot (1 - c_{p2}) + \rho_{p2} \cdot c_{p2}} \cdot I_2 \tag{18}$$

Aplikujeme-li tento postup na výhřevnost, teplo uvolněné dokonalým spálením paliva při využití 1 kg vzduchu a teoretickou spotřebou vzduchu, získáme pro benzin, n-butanol a iso-butanol, následující závislosti graficky znázorněné na obrázku 2.



Obrázek 2: *Porovnání parametrů alkoholových směsí s benzinem*

Z výše uvedených grafů vyplývá znatelně nižší pokles výhřevností a teoretických spotřeb vzduchu pro směsi obou izomerů butanolu. Při dodržení potřebného nárůstu dávky paliva, a tím i zachování výchozího součinitele přebytku vzduchu směsi, je pak změna v množství dostupného tepla, vztaženého na množství nasávaného vzduchu, zde pokládaného za konstantní, prakticky zanedbatelná. Již z tohoto grafu je patrné, že pro butanolové směsi postačuje výrazně nižší nárůst dávky paliva a tím narůstá i pravděpodobnost úspěšné adaptace řídicí jednotkou, což je lépe patrné z grafu na následujícím obrázku. Podíl energie z obnovitelného zdroje je určen jako podíl energie obsažené v alkoholovém palivu a celkové energie uvolnitelné spálením této směsi.



Obrázek 3: *Potřebný nárůst dávky v závislosti na množství energie z alkoholové příměsi*

Z něj je jasně patrné, že při zachování shodného podílu energie přivedené v alkoholovém palivu bude pro směsi benzin-butanol potřebný nárůst dávky paliva v porovnání s etanolovými směsmi poloviční. Například při uvažování použití směsi, kde je polovina energie přivedena ve formě jednoho ze dvou uvažovaných izomerů butanolu, je potřebný nárůst dávky paliva pouze necelých 15 %, přičemž v případě etanolu je nutný nárůst o 30 %, přičemž nárůsty délek vstřiků jsou očekávány v obdobných hodnotách.

Vzhledem k využití zpětnovazební regulace s využitím informace o bohatosti směsi a zapojení možností kompenzace dávky paliva v závislosti na okolních vlivech, jako jsou atmosférický tlak, napětí palubního zdroje energie, změna průběhu charakteristiky vstřikovače, je u současných zážehových motorů s vnější tvorbou směsi očekávána schopnost udržení nezměněné bohatosti náplně válce při použití směsí obsahujících do 50 % butanolu.

4.4 Zhodnocení tlaku nasycených par a destilační křivky butanolových směsí

Tlak par je jednou z klíčových vlastností určujících startovatelnost motoru a určuje těkavost paliva. Druhým určujícím parametrem startovatelnosti studeného motoru je počáteční část destilační

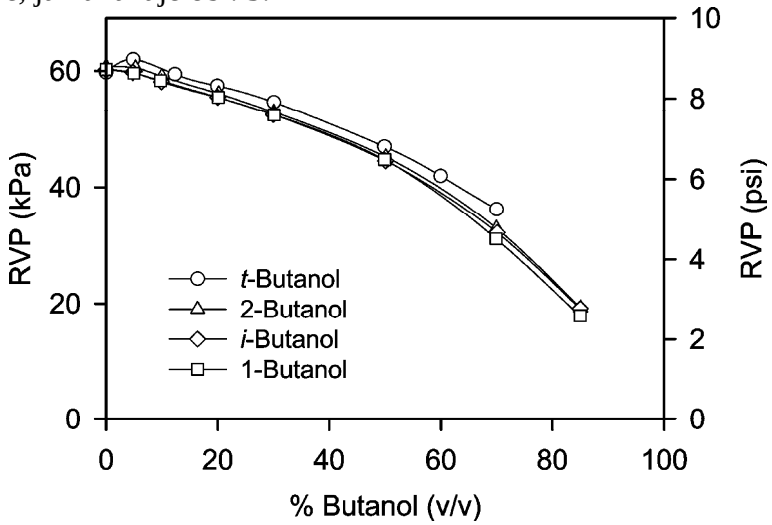
křivky, která ovlivňuje množství paliva, odpařeného při studeném startu motoru a provozu v neprohřátém stavu.
Při přidání alkoholové příměsi, která má jak nízký tlak nasycených par, tak relativně vyšší teplotu varu, dojde ke zhoršení obou těchto parametrů.
Současná norma ČSN EN 228:2012 vyžaduje tlak par v rozsahu 40 až 60 kPa v letním období a 60 − 90 kPa v období zimním. Alkoholy vykazují výrazně nižší tlak nasycených par, než požaduje platná norma , takže lze očekávat zhoršení tohoto ukazatele. Raoultův zákon, uvedený jako rovnice (19), nelze pro určení závislosti tlaku par směsí alkoholu s benzinem $\boldsymbol{P}$ na základě dílčích tlaků par $\boldsymbol{P_i}$ a molárního podílu jednotlivých složek $\boldsymbol{x_i}$ stanovit, protože se nejedná o ideální směs.

$$P = \Sigma P_i \cdot x_i \tag{19}$$

Dokonce ani po rozšíření o aktivitní koeficienty jednotlivých složek $\boldsymbol{\gamma_i}$, viz vztah (20), nelze provést teoretické určení tlaku nasycených par, protože se jejich hodnota pro přidaný alkohol i původní benzinové uhlovodíky s koncentrací alkoholu ve směsi mění [6].

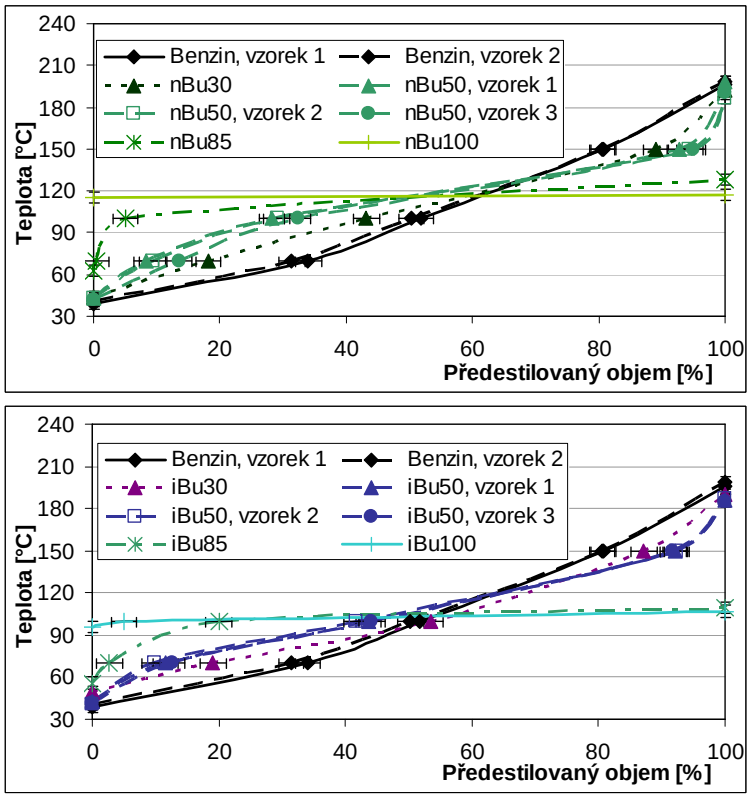
$$P = \Sigma \gamma_i \cdot P_i \cdot x_i \tag{20}$$

Výsledky experimentů, nalezené v dostupné literatuře, potvrdily klesající tendenci tlaku par s nárůstem koncentrace butanolu [6, 7].
Příměsí butanolu pak dochází k citelnému snížení tlaku par již při 30 % objemovém podílu a značné redukci při podílech přesahujících 50 %. Rozdíly mezi jednotlivými izomery butanolu se zdají být malé až zanedbatelné, jak ukazuje obr. 3.



Obrázek 4: *Tlak par směsí benzin-butanol pro různé izomery [6]*

Tlak nasycených par je úzce spjat s počátkem destilační křivky, jejíž celkový tvar má vliv na provozní vlastnosti motoru. Norma vyžaduje, aby v letním období bylo při 70 °C předestilováno alespoň 20 % paliva a 22 % pro benziny s nízkým obsahem kyslíkatých látek.
Z výsledků zkoušek destilačních křivek (dle ČSN EN ISO 3405, provedl SGS ČR s.r.o.), uvedených v grafech na obrázku 4, je patrné, že již při příměsi 30 % butanolu (nBu30 a iBu30) dochází k její citelné změně, která se projevuje zejména posunem objemů předestilovaných při teplotách 70 °C a 100 °C směrem k nižším předestilovaným objemovým podílům.



Obrázek 5: *Porovnání destilačních křivek směsných paliv obsahujících n-butanol a iso-butanol*

Konkrétně již hodnoty pro odpařené množství při 70 °C nedosahují normou stanovené hodnoty 20 % (V/V), respektive 22 % (V/V) pro bezolovnaté benziny s nízkým obsahem kyslíkatých látek. Rovněž pro teplotu 100 °C dochází k poklesu předestilovaného objemového podílu. Pro směs obsahující n-butanol (nBu30) dochází k nedosažení normou požadované hodnoty 46 % (V/V), pro směs s iso-butanolem je změna zanedbatelná. Při nárůstu objemového podílu přidaného butanolu je propad předestilovaného podílu dále prohlouben, přičemž tato změna je patrnější pro n-butanol. Menší odchylky od původní destilační křivky benzinu jsou způsobeny odlišnostmi v teplotě varu jednotlivých izomerů butanolu, jak naznačují teoretické destilační křivky těchto čistých látek. Z tohoto pohledu se butanol jeví jako méně vhodné palivo, v porovnání s etanolem, který vykazuje o něco nižší teplotu varu.

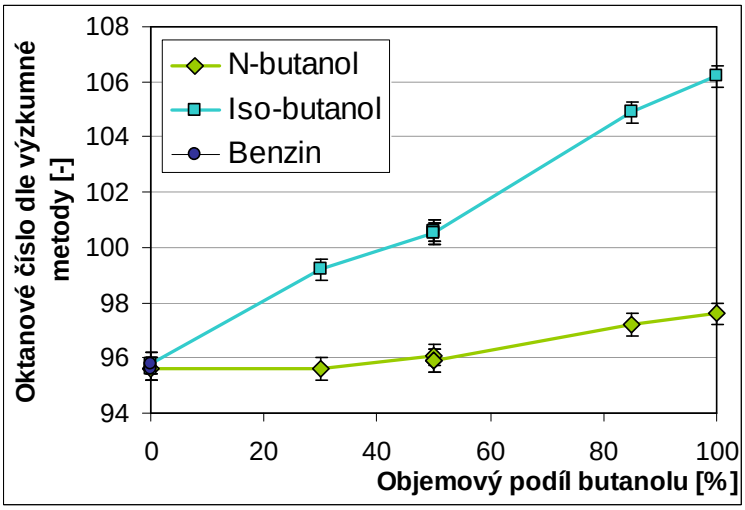
Na druhé straně destilační křivky pak dochází vlivem příměsi alkoholového paliva k nárůstu odpařeného množství paliva při teplotě 150 °C, přičemž požadováno je odpaření alespoň 75 % (V/V).

První část destilační křivky ovlivňuje zejména provoz studeného motoru a jeho chod v neprohřátém stavu a střední část rychlé pokrytí požadovaného nárůstu množství paliva při nárůstu toku nasávaného vzduchu [8]. Nicméně je však nutno dodat, že vyšetřování dopadu průběhu destilační křivky probíhalo na starších motorech vybavených karburátorem a vyhřívaným sacím potrubím. Dále je nižší podíl složek s nízkou teplotou varu z části kompenzován snižováním podílu vysokovroucích látek ve směsi. Lze také očekávat, že změna způsobu přípravy směsi ovlivnila míru dopadu jednotlivých vlivů na zmíněné provozní vlastnosti motoru. Zejména při použití vícebodového vstřikování do sacího kanálu, namísto jednobodového s vyhřívaným sacím potrubím, lze očekávat snížení vlivu střední části destilační křivky na přechodové režimy, protože palivo přichází do kontaktu s plochami o vyšší teplotě, které jsou navíc ve svém úhrnu menší, a proudění vzduchu se vyznačuje vyššími rychlostmi.

Z popisu v předchozích odstavcích lze u směsí benzin-butanol očekávat zhoršenou startovatelnost studeného motoru, zejména přesáhne-li koncentrace butanolu 30 %, a u starších motorů s jednobodovým vstřikováním nelze vyloučit negativní projevy při akceleracích. Vliv na přechodové režimy by se měl uplatnit pro směsi obsahující iso-butanol v o něco menší míře než pro n-butanolové směsi.

4.5 Vliv použití butanolu na oktanové číslo stanovené výzkumnou metodou

Rozdíly ve vlastnostech jednotlivých paliv jsou patrné i u oktanového čísla stanoveného výzkumnou metodou. Alkoholová paliva obecně vykazují vyšší hodnoty oktanového čísla, ale i rozdíl mezi hodnotami zjištěnými výzkumnou a motorovou metodou. Oktanové číslo je do značné míry ovlivněno uspořádáním molekul, kterými je tvořeno palivo. Tímto faktorem lze vysvětlit značné rozdíly mezi n-butanolem a iso-butanolem, kdy je značně nižší oktanové číslo n-butanolu ovlivněno řetězovým charakterem molekuly, a tudíž i vyšší náchylností k vytváření radikálů při působení tlaků a teplot před zónou hoření ve spalovacím prostoru.
Pro zjištění vlivu obou izomerů butanolu na oktanové číslo stanovené výzkumnou metodou (dle ČSN EN ISO 5164, provedl SGS ČR s.r.o.) byly provedeny zkoušky oktanového čísla, jejichž výsledky shrnuje obr. 6.



Obrázek 6: *Porovnání oktanového čísla směsí obsahujících n-butanol a iso-butanol*

Ze zjištěných závislostí vyplývá značně odlišné chování jednotlivých izomerů, kde se projevují jak odlišná oktanová čísla jednotlivých paliv, tak odlišný trend jejich změny s nárůstem podílu butanolu. Zatímco pro čistý n-butanol je oktanové číslo mírně vyšší než pro použitý benzin, v nízkých koncentracích oktanové číslo prakticky neovlivňuje. Oproti tomu pro iso-butanol byl zpočátku zaznamenán vyšší účinek, nežli odpovídá jeho objemovému podílu, který ale postupně mírně klesá.
Z pohledu oktanového čísla jsou pro použití ve stávajících zážehových motorech vhodné oba izomery butanolu, přičemž vyšší oktanové číslo iso-butanolu skýtá potenciál pro navýšení kompresního poměru a tím i zvýšení účinnosti motoru.

4.6 Posouzení vlivu butanolu na adiabatický exponent

Při využití alkoholových paliv obecně dochází ke změně molárního zastoupení paliva ve směsi a zároveň je v průběhu řešení práce očekáváno vyhodnocování průběhu tlaku ve válci a uvolňování tepla, je proto vhodné posoudit ovlivnění adiabatického koeficientu.
Nejjednodušším způsobem zjištění adiabatického koeficientu κ je jeho vyjádření jako poměru měrných tepelných kapacit za konstantního tlaku c_p a objemu c_v:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \tag{21}$$

Experimentálně zjištěnou měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku jako funkci teploty lze pro atmosférický tlak snadno nalézt na webových stránkách Národního institutu standardů a technologie [4]. Určení měrné tepelné kapacity za konstantního objemu je možné provést několika způsoby.
Jednak je možné považovat rozdíl tepelných kapacit na jednotku molárního množství za konstantní, a to rovný univerzální plynové konstantě R, nebo je možné využít jeden ze vztahů vzniklých při odvozování Mayerova vztahu:

$$cp - cv = -T \cdot \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V^2}{\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T}. \tag{22}$$

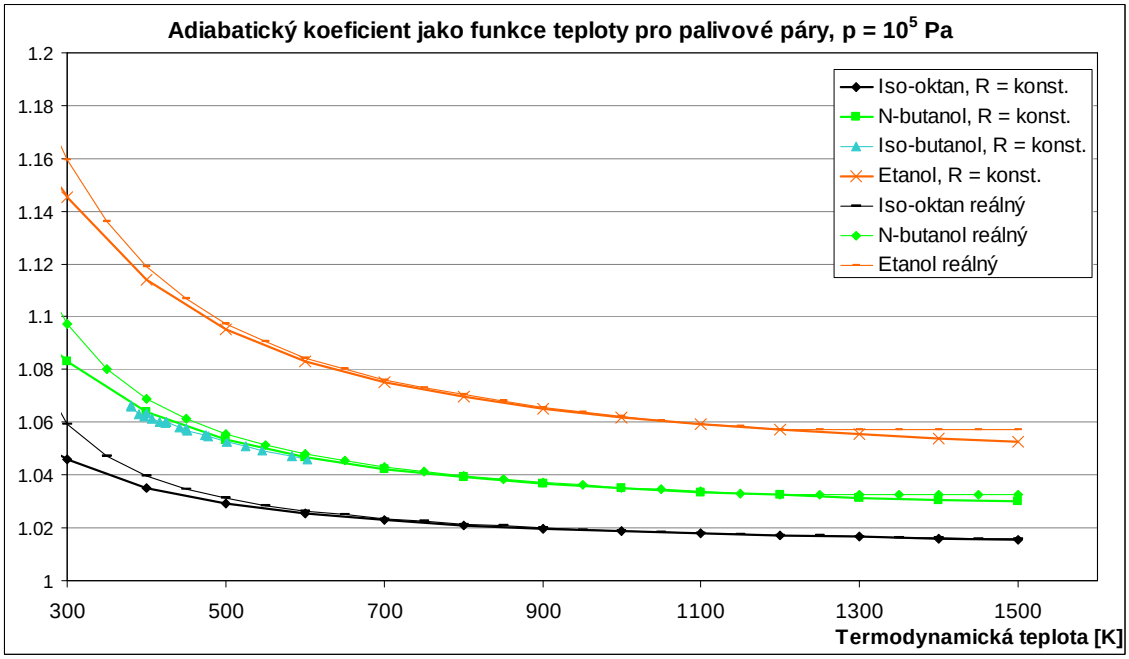
K určení této derivace i všech ostatních v této kapitole byla využita Redlich-Kwongova rovnice, pro kterou byly získány konstanty a a b rovněž z [4].

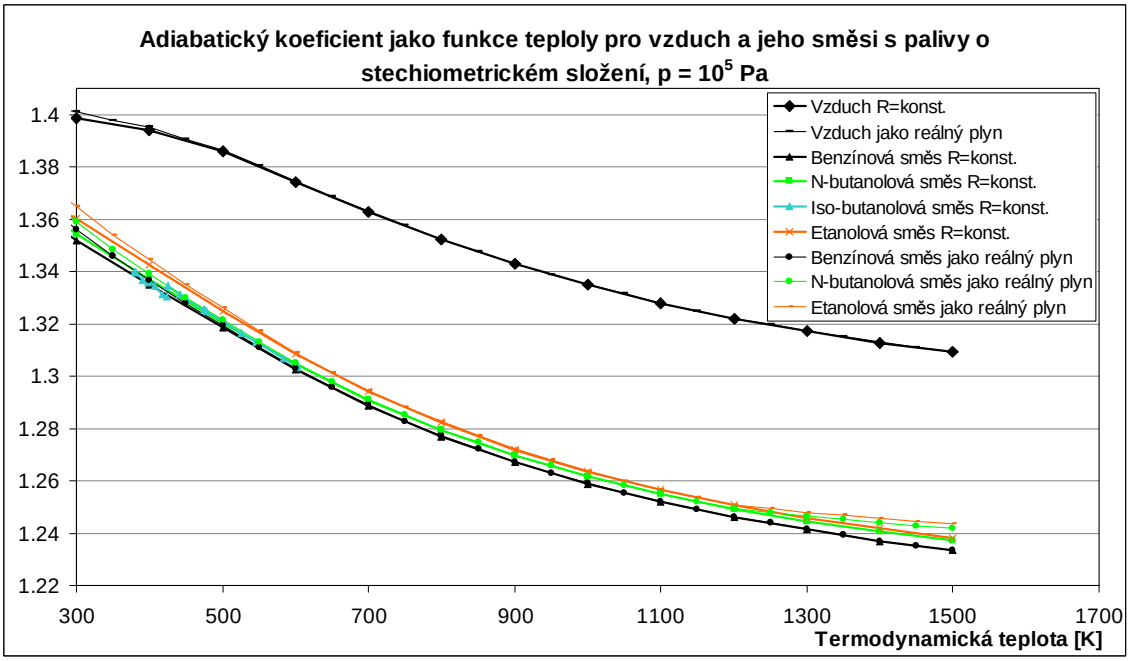
$$p = \frac{R \cdot T}{(V_m - b)} - \frac{a}{\sqrt{T} \cdot V_m \cdot (V_m + b)} \tag{23}$$

S využitím tepelných kapacit jednotlivých složek a jejich molárních koncentrací x_i lze již snadno dospět k vlastní hodnotě adiabatického koeficientu nejprve vzduchu a pak i palivové směsi podle:

$$\kappa = \frac{\sum x_i \cdot c_{pi}}{\sum x_i \cdot c_{vi}} \tag{24}$$

Z grafického vyjádření pak vyplývá nejprve značný rozdíl mezi adiabatickým koeficientem jednotlivých paliv a následně, díky odlišnému molárnímu zastoupení ve směsi, pouze malý vliv na celkový koeficient směsi. Kromě velmi nízkých teplot pak vykazují oba způsoby stanovení relativně shodné výsledky.



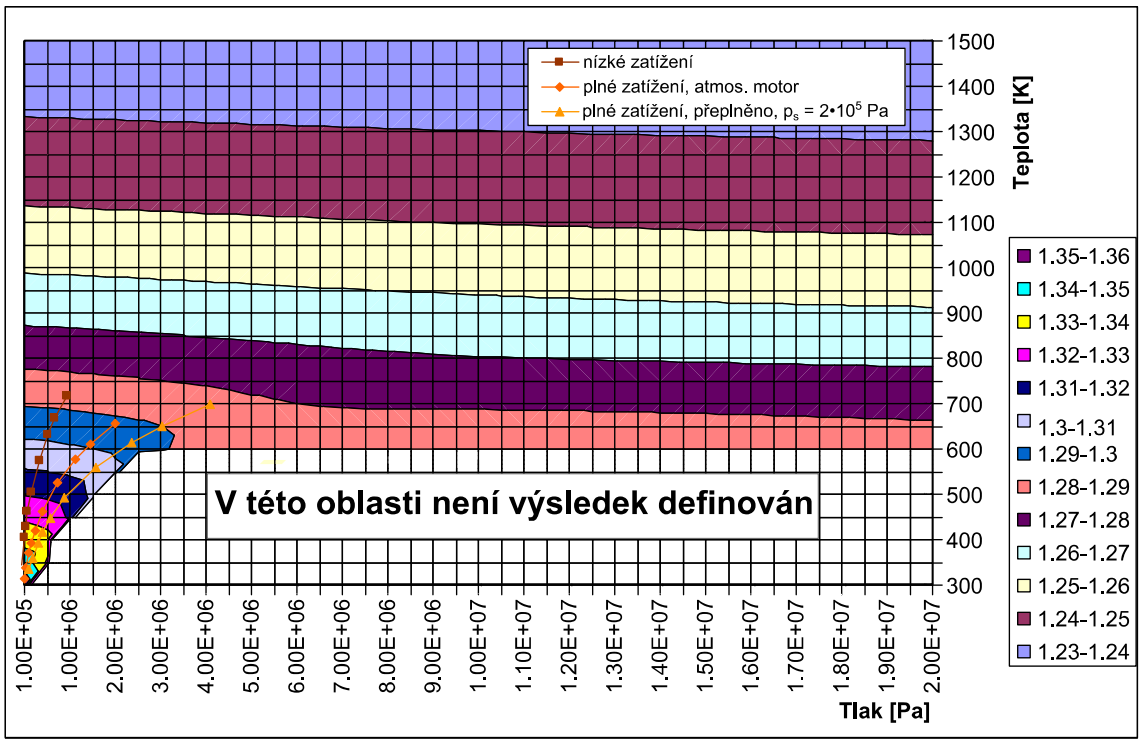


Obrázek 7: *Adiabatické koeficienty palivových par (nahoře) a vzduchu a palivových směsí (dole)*

Nicméně ve spalovacích motorech dochází rovněž k značnému nárůstu tlaku. Tento lze podchytit například vztahem 3.63 z Breviáře fyzikální chemie [9]

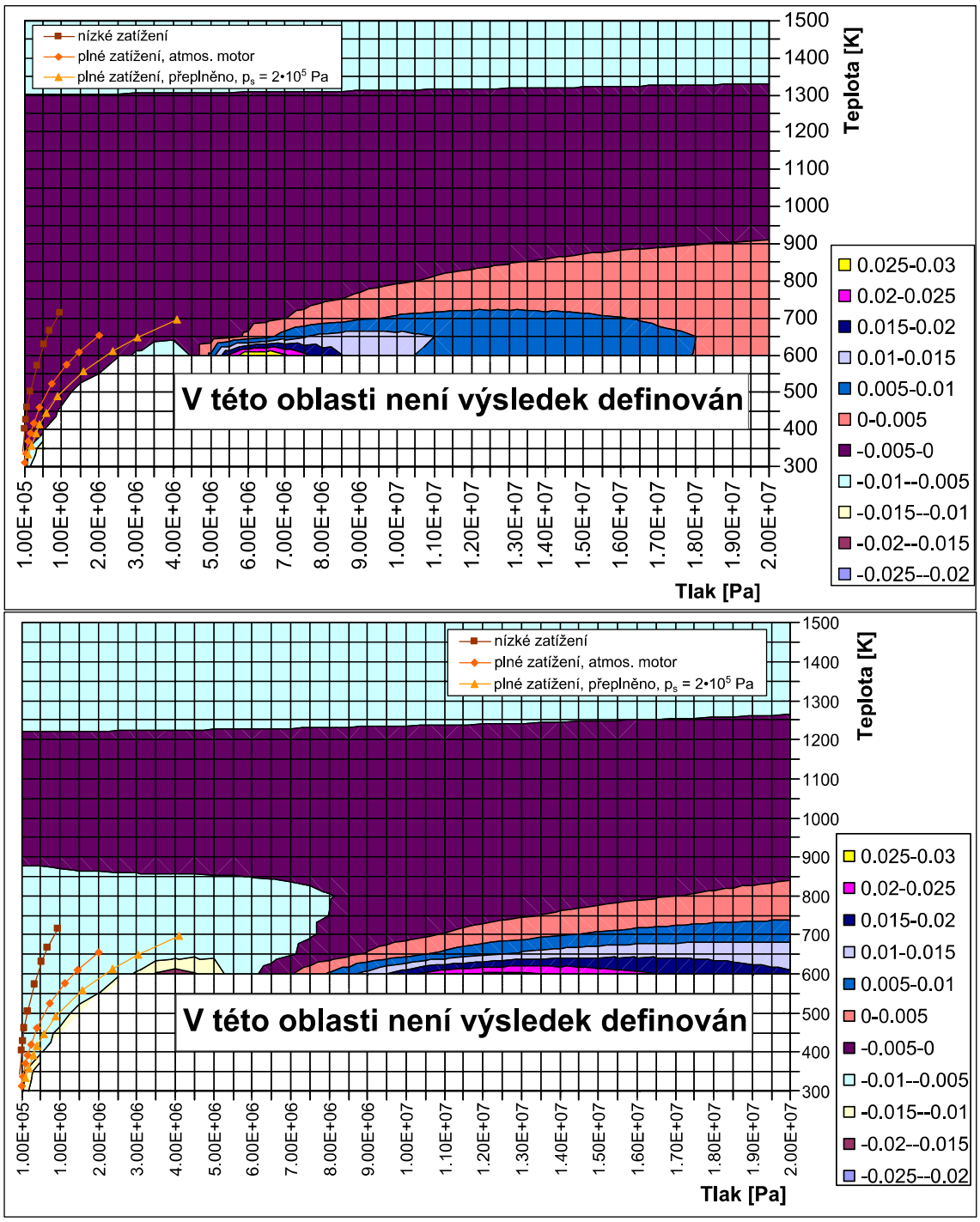
$$c_p(T, p_2) = c_p(T, p_1) - \int_{p1}^{p2} T\left(\frac{\partial_2 V}{\partial T^2}\right)_p dp\,. \tag{25}$$

Po vypočtení adiabatického koeficientu a jeho zanesení do grafu pro výchozí směs 2,2,4-trimetyl-pentanu (iso-oktan, použit pro přiblížení benzinu) se vzduchem o stechiometrickém složení pak získáme závislost vyobrazenou na obr. 8. Pro lepší ilustraci je do grafu zaneseno i zjednodušené stlačení směsi v zážehovém motoru při několika možnostech provozu za konstantní hodnoty adiabatického koeficientu (κ = 1,32; ε = 10,0).



Obrázek 8: *Závislost adiabatického koeficientu směsi iso-oktanu a vzduchu na tlaku a teplotě*

Následují grafická vyjádření rozdílů směsi iso-oktanu a vzduchu a směsí s využitím alkoholových paliv. Avšak pro iso-butanol byly nalezeny pouze nedostačující údaje o závislosti měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku na teplotě, takže byl z vyšetřování tlakové závislosti vypuštěn, nicméně je očekáváno obdobné chování jako pro ostatní alkoholy.



Obrázek 9: *Závislost změny adiabatického koeficientu při náhradě iso-oktanu n-butanolem (nahoře) a etanolem (dole) pro různé tlaky a teploty*

Z výše vyobrazeného zřetelně vyplývá, že palivové páry ve směsi díky víceatomovým molekulám značně snižují adiabatický koeficient. Dále je pak, navzdory rozdílům mezi jednotlivými odpařenými paliv, viditelný pouze malý rozdíl u jednotlivých směsí. Pro obě alkoholové směsi se vzduchem lze pak očekávat malý nárůst adiabatického koeficientu, který je pak pro etanol o něco málo výraznější. Zpravidla je používán adiabatický koeficient v průběhu komprese jako konstantní a zaokrouhlený na dvě desetinná místa je možné při využití butanolu změnu zanedbat, nicméně pro případné použití etanolu je vhodné zvážit použití hodnoty 1,33.

4.7 Porovnání dalších vlastností paliv

Všechna tři alkoholová paliva, porovnávaná v této části, vykazují výrazně vyšší viskozitu než v současnosti používaný benzin pro zážehové motory. Toto může zkomplikovat jednak úspěšné navýšení dávky paliva na potřebnou hodnotu a jednak úspěšnou tvorbu směsi, zejména v motorech s přímým vstřikováním.
Praktické použití alkoholových paliv je rovněž omezeno jejich účinky na součásti palivového systému. V tomto ohledu se butanol, vzhledem ke své nižší chemické agresivitě, jeví vhodnější než etanol [10].
Další nevýhodou etanolu je jeho hygroskopické chování, které komplikuje využití stávající distribuční sítě [11]. Navíc směsi do 16 % iso-butanolu je možné úspěšně a bezpečně skladovat a vydávat za použití stávajícího vybavení, splňujícího současné platné standardy [12].

5 Přehled experimentů provedených jinými autory

Do současné doby bylo provedeno větší množství experimentů, zaměřených na spalování butanolu ve směsích s benzinem. Tato kapitola přináší jejich stručný výčet, jakožto shrnutí současného stavu poznání a vodítka k jeho doplnění.

Szwaja [13] zjistil rychlejší rozvoj plamene v jeho počáteční fázi, celkově rychlejší průběh hoření s narůstajícím podílem n-butanolu ve směsi s benzinem a mírné snížení variability středního indikovaného tlaku při spalování čistého n-butanolu. Další výzkumníci zjistili také kratší průtah vznícení, rychlejší šíření plamene a lepší stabilitu hoření [14, 15].

Nárůst produkce nespálených uhlovodíků (HC), a to mírný pro nízké koncentrace n-butanolu a vysoký pro čistý n-butanol a směsi s jeho velkým obsahem. Změny v produkci oxidu uhelnatého (CO) se zdály být nevýznamné a koncentrace oxidů dusíku (NO_x) narůstaly i klesaly jen mírně [14, 16, 17]. Aleiferis [18] a Merola [19] prováděli spektroskopická vyšetřování spalování při klepání a zjistili horší atomizaci n-butanolu vzhledem k benzinu. Tornatore [20] spaloval n-butanol v přeplňovaném motoru se vstřikováním do sacího kanálu (PFI) a zjistil lehce zrychlený průběh hoření a snížení produkce pevných částic. Walner dále odhalil vyšší produkci formaldehydu a acetaldehydu před průchodem třísložkovým katalytickým reaktorem i za ním před dosažením jeho provozní teploty [17].

Použití čistého n-butanolu může být problematické u zážehových motorů s přímým vstřikem paliva v případě studeného startu motoru následkem zhoršené atomizace paliva, dopadání paliva na stěny válce a zředění mazacího oleje [21], na druhou stranu Smith úspěšně provozoval motor s přímým vstřikem paliva a vrstvenou směsí (spray-guided) [22]. He a kol. rovněž úspěšně provozovali přeplňovaný motor s přímým vstřikem a přidáním iso-butanolu docílili snížení počtu pevných částic [23].

Karavalakis [24] zjišťoval složení neregulovaných znečišťujících látek a pozoroval konzistentní nárůst produkce butyraldehydu bez významného vlivu na množství vzniklého formaldehydu a acetaldehydu. Naopak Ratcliff [25] pozoroval mírné zvýšení produkce formaldehydu a acetaldehydu při využití obou izomerů butanolu. Série experimentů provedl na jednoválcovém motoru, určeném pro výzkumné účely Alasfour [26–28].

Podmínky spalování však neodpovídaly podmínkám, za jakých jsou provozovány současné vozidlové motory. Nejčastěji byl použit motor pro výzkumné účely, či jinak upravený motor, s nereprezentativními parametry, byla použita odchylná bohatost směsi a nebylo zahrnuto řízení motoru odpovídající vozidlovým motorům. Dále obvykle nebylo aplikováno zařízení pro dodatečnou úpravu výfukových plynů a testům byl podroben pouze jeden izomer butanolu.

Z obecného úhlu pohledu existuje několik principů působení na díly, které jsou vystaveny vlivům paliva. Mezi nejčastější lze zařadit chemickou korozi za přítomnosti mechanického namáhání, změnu objemu a změnu tvrdosti.

Ohledně koroze při mechanickém napětí se nepodařilo z dostupných pramenů získat informace o porovnání působení benzinu a alkoholů. Navíc obvykle tuhé plastové součásti palivového systému nebývají výrazně mechanicky namáhány, takže je možné, že nenastávají vhodné podmínky pro výskyt tohoto jevu.

Změna objemu, tedy bobtnání, postihuje zejména pružné pryžové materiály, které slouží jako těsnicí prvky. Kupříkladu často využívaný materiál NBR (nitrilová pryž) může vykazovat nevhodnost pro využití při kontaktu s alkoholy [29]. Některé druhy NBR nejsou vhodné ani při použití benzinu, přičemž užití akrylnitrilu je vhodným řešením [30]. Při porovnávání polyuretanu, neoprénu, SBR a silikonu byla zjištěna obdobné či nižší ovlivnění vlastností elastomerů (bobtnání, změna tvrdosti, teplota zeskelnění), přičemž v některých případech byla změna srovnatelná s použitým ekvivalentem benzinu (směs benzenu a toluenu v objemovém poměru 1:1) [31]. Rovněž pro elastomery chlorovaný polyetylén, epichlorohydrid, Hypalon a Viton B byly zaznamenány bobtnání a tvrdosti s jedinou výjimkou menší při vystavení iso-butanolu ve směsi s benzinem nežli po

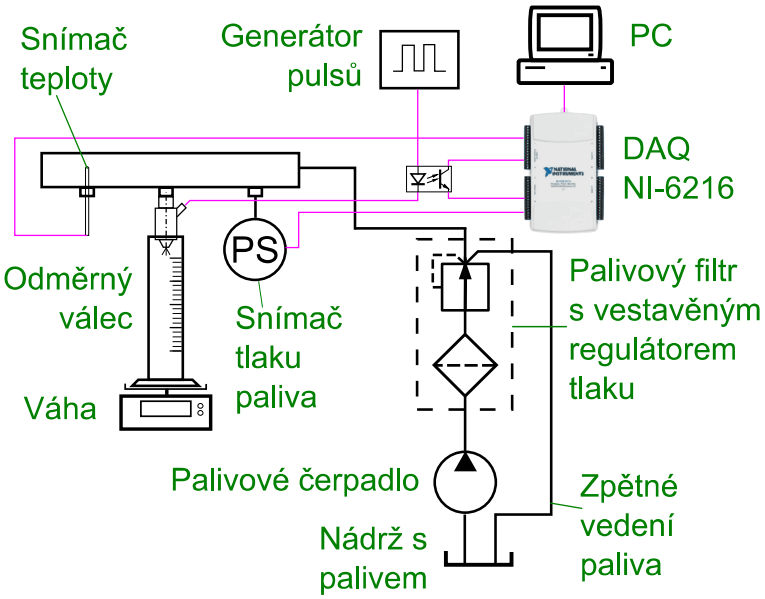
působení směsi se shodným objemovým množstvím etanolu [32]. Rovněž přidání n-butanolu v objemové koncentraci 20 % do benzinu se nezdá být problematické z hlediska bobtnání elastomerů [10].

6 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je shrnutí a rozšíření současného stavu poznání ohledně použití butanolu jakožto paliva pro různé zážehové motory. Rozšíření současného stavu poznání je podmíněno aktuálností prováděného výzkumu, pročež je nutné zjistit aktuální stav poznání využití butanolu. Z tohoto důvodu je mezi cíle práce zahrnuta rovněž rešerše dostupné literatury. Výsledkem rešerše má být výběr izomerů butanolu, vykazujících potenciál k použití v zážehových motorech coby obnovitelná paliva, a způsobu experimentálního vyšetření aspektů jejich využití. Cílem je stanovení koncentrací butanolu, kdy dojde k negativním dopadům jeho použití v závislosti na použitém druhu motoru a míře jeho úprav. Tyto budou následně vyhodnoceny a podle možností provedeny úpravy motorů za účelem jejich potlačení a nebo alespoň ke zvýšení použitelné koncentrace butanolu. Dalším očekávaným výsledkem je porovnání jednotlivých izomerů butanolu se zhodnocením vhodnější varianty. Z důvodu že standardní testovací procedury spalovacích motorů mnohdy vykazují odlišnosti oproti způsobu reálného použití, bude upřednostňováno zkoušení motorů za jejich reálného provozu či způsobem se jemu blížícím. Vzhledem k zaměření pracoviště bude kladen důraz na změny spalovacích procesů v motoru a produkce znečišťujících látek a na úpravy motorů k zajištění bezproblémového provozu při co nejvyšší koncentraci butanolu, přičemž chemické účinky na konstrukční materiály motorů budou upozaděny a omezeny na souhrn poznatků získaných z literatury. Podle možností budou dále vyšetřovány a vyhodnocovány produkce neregulovaných znečišťujících látek. Samozřejmou součástí práce je rovněž široké publikování získaných výsledků.

7 Porovnání charakteristik vstřikovače při použití benzinu a butanolu

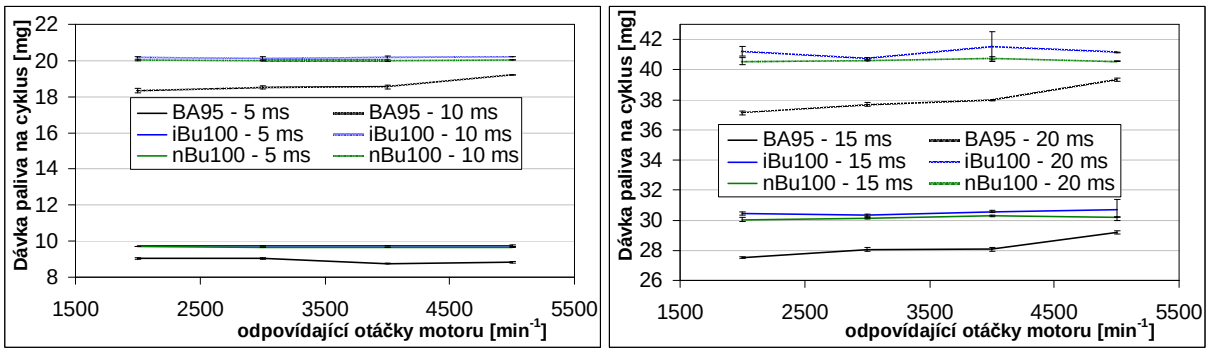
Za základní předpoklad úspěšného použití libovolného paliva, nahrazujícího automobilový benzin, je dodržení nezměněného součinitele přebytku vzduchu ve válci spalovacího motoru. Dalším předpokladem je odpaření paliva a vytvoření homogenní směsi připravené k zážehu.
Z důvodu vyššího poměru hmotnosti paliva a plnicího vzduchu pro teoretické dokonalé spálení alkoholových paliv obecně je nutné tento rozdíl kompenzovat navýšením dávky paliva. Toto lze realizovat více způsoby: záměnou vstřikovače za provedení s větším průřezem vstřikovacích otvůrků, zvýšením vstřikovacího tlaku a prodloužením doby vstřikovacího pulzu. Zatímco první dva způsoby znamenají fyzickou modifikaci, poslední je v nižší míře realizován samotnou řídicí jednotkou motoru a v případě potřeby většího prodloužení využitím jednotky přídatné.
Vzhledem k nižšímu obsahu kyslíku v butanolu, v porovnání s běžněji používaným etanolem, je poměr paliva a vzduchu bližší k benzinu, z čehož vyplývá nižší míra prodloužení vstřikovacích pulsů.
Za účelem stanovení potřebného prodloužení pulsů při použití butanolu a jeho směsí s benzinem bylo provedeno experimentální zjištění množství vstřikovaného paliva v závislosti na nezměněné délce aktivačního pulzu vstřikovače a frekvenci těchto pulsů, které bylo publikováno [33]. Uspořádání experimentálního zařízení je schematicky vyobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10: *Schéma sestavy pro určení cyklové dávky paliva*

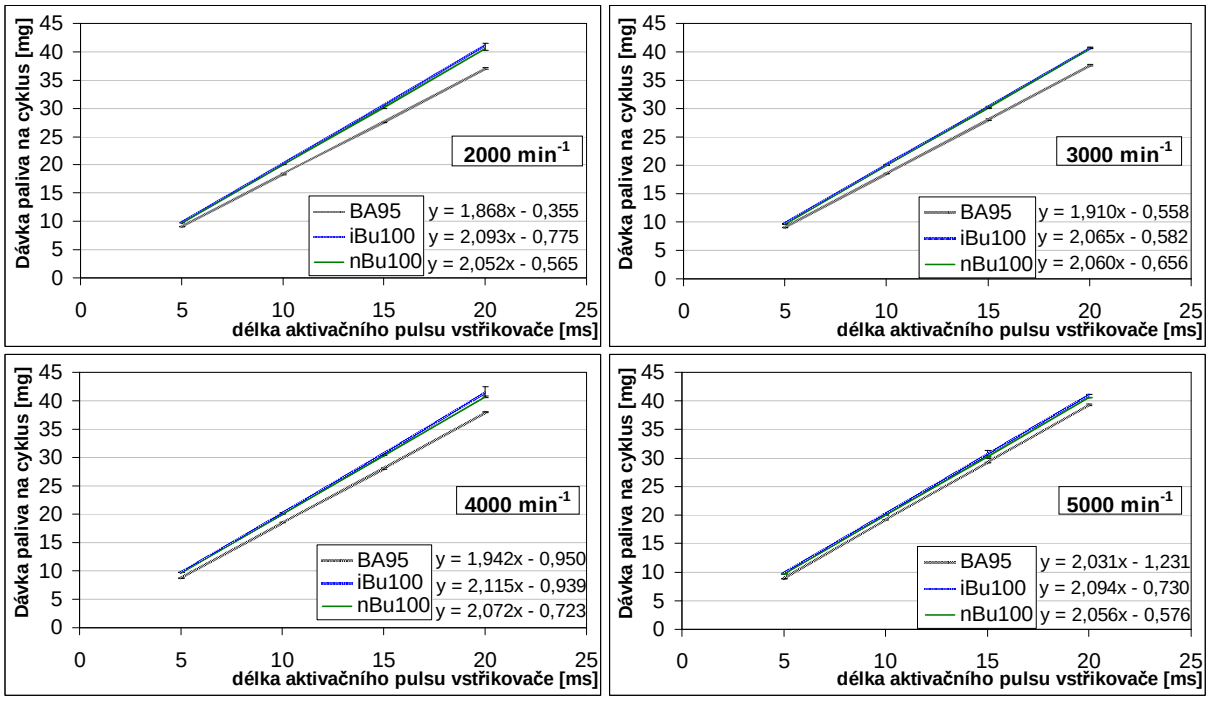
Testované palivo je nasáváno čerpadlem z nádrže, přivedeno do palivového filtru s integrovaným regulátorem tlaku (přetlak přibližně 400 kPa vzhledem k atmosférickému tlaku), odkud je přivedeno do zásobníku paliva (railu) a přebytek paliva vracen zpět do nádrže. Pro detekci nežádoucího ohřevu paliva, vlivem cirkulace přebytečného a průchodem čerpadlem částečně zahřátého paliva zpět do nádrže, byl do nevyužitého portu pro vstřikovač zastavěn snímač teploty a pro detekci změny vstřikovacího tlaku do druhého neosazeného portu snímač tlaku. Jako čerpadlo paliva, filtr s tlakovým regulátorem, zásobník paliva a vstřikovač jsou komponenty běžného zážehového motoru s vícebodovým vstřikem paliva (rodina EA111, 1.2 HTP).
V průběhu experimentu bylo vstřikováno palivo do naplnění odměrného válce, přičemž byl sledován přírůstek hmotnosti pomocí váhy s rozlišením 0,1 g (Bartolini Europe 3000). Pro minimalizaci ztrát odparem byla volná plocha mezi pláštěm vstřikovače a okrajem odměrného válce zakryta a pro posouzení opakovatelnosti měření byla všechna měření provedena celkem třikrát.

Určení dávky paliva bylo provedeno vydělením hmotnostního přírůstku odměrného válce s palivem počtem vstřikovacích pulsů. Tento počet byl získán vyhodnocením počtu sestupných hran u přivedených vstřikovacích pulsů (vzorkovací frekvence záznamu 50 kHz, připojen k AD převodníku NI-6216 s využitím optočlenu v neinvertujícím zapojení).
Vstřikování probíhalo při frekvenci pulsů odpovídajících 2 000, 3 000, 4 000 a 5 000 otáčkám za minutu. Délky vstřikovacích pulsů byly měněny tak, aby reprezentovaly zatížení motoru od nízkých až po vysoká, tedy 5, 10, 15 a 20 ms. Dále byla přidána kombinace 3 ms délky a frekvence odpovídající 1 000 otáčkám za minutu přibližně odpovídající podmínkám při volnoběhu.
V následujících grafech jsou zobrazena množství vstříknutého paliva při vybraných kombinacích frekvence odpovídající otáčkám a délce aktivačního napěťového pulsu přivedeného na svorky vstřikovače včetně střední směrodatné odchylky zjištěných hodnot.



Obr. 11: *Závislost dávky paliva na cyklus v závislosti na frekvenci pulsů a době aktivace vstřikovače*

Z grafů uvedených na obr. 12 vyplývá nízká závislost vstříknuté dávky na otáčkách motoru, zejména pokud je vstřikován butanol. V případě vstřikování benzinu lze značnou část změny přičíst odparu paliva v důsledku vyššího tlaku nasycených par, čemuž odpovídá nižší vážením zjištěná dávka při nižších otáčkách v důsledku delší doby potřebné k naplnění odměrného válce.



Obr. 12: *Závislost dávky na cyklus za konstantní frekvence v závislosti na době aktivace vstřikovače*

Dále ze zjištěných charakteristik vyplývá velmi dobrá opakovatelnost dávkování paliva i linearita množství dodaného paliva podle délky aktivačního pulsu (nejnižší výběrový korelační koeficient $R^2 = 0{,}998$) pro všechna zkoušená paliva. Zároveň je možné extrapolací z lineárních aproximačních rovnic za použití metody nejmenších čtverců určit dobu aktivačního pulsu, kdy dochází ke vstřiku právě nulového množství paliva. Tato se pohybovala v okolí 0,33 ms bez zřetelného vlivu paliva

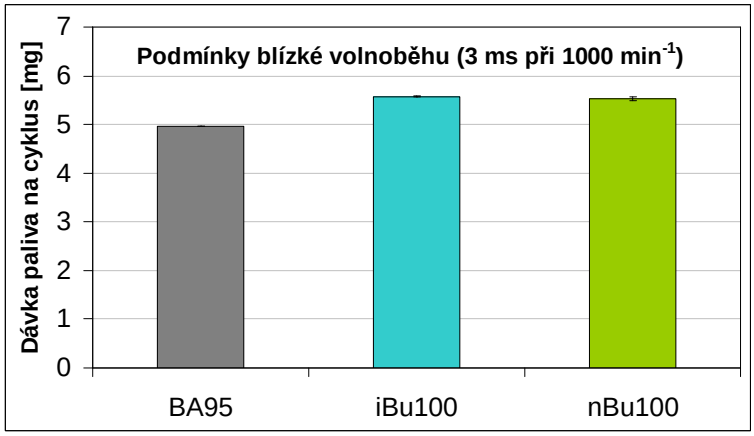
a frekvence pulsů.
Rozdíl v dávce paliva pro jednotlivé izomery butanolu byl zaznamenán o necelé jedno procento vyšší pro iso-butanol než pro n-butanol.
Uvažujeme-li o nejjednodušším případu teoretické výtokové rychlosti butanolu výstřikovými otvory podle Bernoulliho rovnice

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{RAIL} - p_S)}{\rho}}, \tag{26}$$

je možné stanovit i teoretické hmotnostní a objemové poměry při uvažování shodného vstřikovacího tlaku a skutečné doby výtoku paliva:

$$\frac{V_{Bu}}{V_{benz}} = \sqrt{\frac{\rho_{benz}}{\rho_{Bu}}}; \frac{m_{Bu}}{m_{benz}} = \sqrt{\frac{\rho_{Bu}}{\rho_{benz}}}. \tag{27}$$

Použitím této hypotézy vycházejí hmotnostní poměr vstříknutého iso-butanolu 1,047 a 1,050 pro n-butanol, přičemž experimentálně zjištěné poměry nabývají hodnot 1,084 a 1,074.
Při objemovém dávkování paliva by byla změna hmotnostní dávky daná pouze poměrem hustoty příslušného butanolu a benzinu a nabývala by hodnoty 1,096 pro iso-butanol a 1,088 pro n-butanol. Z porovnání poměrů hustot a nárůstu hmotnosti vstříknutého paliva (průměr všech bodů při stejné době aktivace 1,084 a 1,074) je zřejmé, že dávkování paliva může být zjednodušeno jako objemové při akceptování chyby kolem 1 % celkového vstříknutého množství.



Obr. 13: *Změna hmotnostní dávky paliva za podmínek blízkých volnoběhu*

Za podmínek blízkých volnoběhu byly zjištěny o něco vyšší nárůsty hmotnostní dávky paliva při náhradě benzinu butanolem a to nárůsty o 12,5 % a 11,4 % pro n-butanol a iso-butanol při perfektní opakovatelnosti.

Na základě teoretické spotřeby vzduchu pro teoretické dokonalé spálení paliva při náhradě benzinu butanolem dojdeme k výsledku, že při zanedbání změny objemu odpařeného paliva je pro oba izomery butanolu nutné navýšit hmotnostní dávku o 31,3 %. V návaznosti na zjištěné nárůsty hmotnostní dávky pro iso-butanol 8,4 % a 7,4 % pro n-butanol zbývá navýšit dobu, po kterou dochází ke vstřikování, tj. po odečtení aktivační doby vstřikovače cca 0,33 ms, o 21,1 % pro iso-butanol a o 22,2 % pro n-butanol. Pro zachování shodné bohatosti směsi by, za stejných předpokladů, bylo zapotřebí pro čistý etanol navýšit hmotnostní dávku o 63,3 %, přičemž za předpokladu objemového dávkování je pak nutné prodloužit dobu výtoku paliva o 52,0 %.
Důležitými výsledky z předchozích experimentů jsou jednak vysoce lineární charakteristiky množství dodaného paliva podle doby aktivace vstřikovače, které navíc vykazují vysokou opakovatelnost. Následně pak obdobné charakteristiky pro oba izomery butanolu, přičemž změna hmotnostní dávky naznačuje, že z praktického hlediska lze dávkování paliva považovat za objemové. Pro použití čistého butanolu by mělo být dále postačující prodloužení délky vstřiku o přibližně 21–22 %.

8 Výsledky experimentů na motoru s otevřeným řízením

V této části práce jsou popsány experimenty a jejich výsledky experimentů spalování butanolů a jejich směsí s benzinem v motoru s otevřeným řízením, tj. bez náhodných vlivů způsobených adaptačními a řídícími algoritmy běžných řídicích jednotek motorů.

8.1 Porovnání spalování vybraných izomerů butanolu s benzinem

Obecně lze pro jiné použité palivo předpokládat jiný průběh hoření vlivem změněné délky průtahu zážehu a následně rozdílného šíření plamene v porovnání s benzinem. Rešerší dostupné literatury [14, 34] bylo zjištěno rychlejší šíření plamene za stechiometrického složení v klidném prostředí pro iso-butanol a zejména pro n-butanol než pro benzin. Tyto poznatky však nelze snadno aplikovat na provoz ve spalovacích motorech z důvodu výrazného rozvíření palivové směsí a proměnných tlakových a teplotních poměrů. Z tohoto důvodu bylo přikročeno ke zjištění parametrů spalování experimentální cestou s cílem získat náhled na nutnost a míru změny předstihu zážehu, je-li benzin nahrazován butanolem.

Řídicí jednotky běžných zážehových motorů, z důvodů prevence klepání, nastavují hodnotu předstihu v závislosti na interní charakteristice korigované podle signálu z piezoelektrického snímače zrychlení. Tímto zanáší do experimentálního spalování libovolného paliva náhodnou proměnnou. Z tohoto důvodu bylo využito zkušebního motoru s otevřeným řízením se základními parametry uvedenými v následující tabulce. Brzdové stanoviště, umístěné na Berner Fachhochschule, Department Technik und Informatik (Biel, Švýcarsko), bylo vybaveno vířivým dynamometrem, širokopásmovou lambda sondou, termočlánky pro zjišťování teplot výfukových plynů, vysokotlakou indikací a otevřeným řízením spalovacího motoru.

Tabulka 2: *Základní parametry spalovacího motoru s otevřeným řízením*

Označení motoru	Lombardini LGW 523
Počet válců	2
Zdvihový objem [dm^3]	0,505
Vrtání [mm]	72
Zdvih [mm]	62
Kompresní poměr [-]	8,7
Délka ojnice [mm]	107
Tvorba směsi	Vícebodová, vnější
Chlazení motoru	Kapalinové
Vstřik paliva	Sekvenční

8.1.1 Vliv použití butanolu na průběh hoření a polohu optimálního předstihu

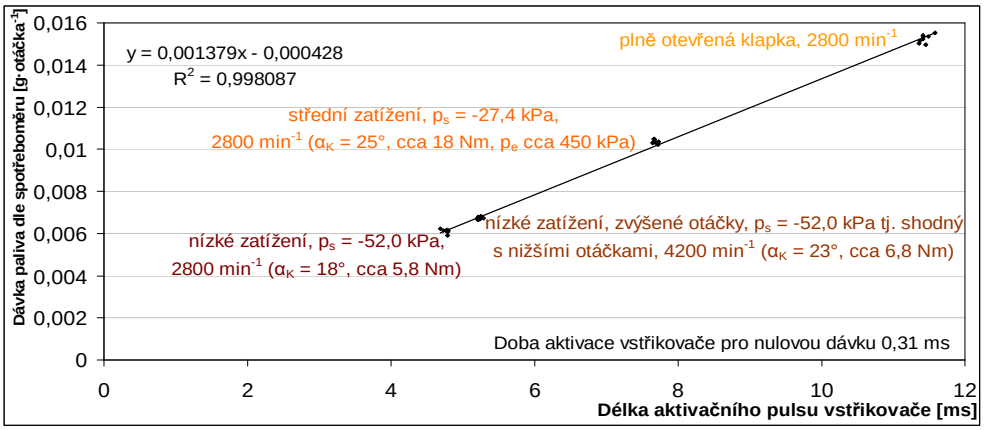
Za účelem nalezení náhledu na potřebné změny optimálního předstihu, jakožto předpokladu pro zachování provozu motoru s vysokou účinností a zároveň bez nebezpečí klepání, u běžných motorů byly provedeny experimenty při částečné či úplné náhradě benzinu oběma izomery butanolu.

Zvolené ustálené provozní režimy zahrnují jak nízká zatížení za nižších i zvýšených otáček, stejně i střední a vysoké zatížení za nižších otáček. Pro umožnění pozorování samotného vlivu paliva bylo nutné zachovávat pro všechny kombinace předstihu a použitých paliv v co nejvyšší míře konstantní podmínky pro spalování. Proto byl provozní režim definován jako kombinace tlaku v sacím potrubí a otáček při stechiometrickém složení náplně válce. Proměnnou veličinou pak byl předstih zážehu.

Sledovanou veličinou byl výstupní točivý moment motoru, který by měl pro ideální nastavení s maximální účinností nabývat maximální hodnoty. Z praktického hlediska však byly pozorované změny točivého momentu v blízkosti optima poměrně nízké a ovlivněné nejistotou jeho měření a pro zvýšení vypovídací hodnoty bylo tedy přikročeno k přidání dalších hodnotících kritérií.

Prvním z nich byl střední efektivní tlak získaný vypočtením z indikovaného tlaku ve válci z 250 po sobě jdoucích cyklech a dále pak celková účinnost motoru, u které bylo předpokládáno nižší

ovlivnění teplotou nasávaného vzduchu, která kolísala až o 2 °C. Použitý spotřeboměr paliva však rovněž vykazoval variabilitu hodnot přibližně 1 % pro vyšší zatížení a okolo 2 % pro nízká zatížení. Při předešlých experimentech byla zjištěna velmi přesná závislost dodané dávky paliva na době otevření vstřikovače. Tohoto bylo využito tak, že pro každé jednotlivé palivo byla zkombinována data ze všech testovaných provozních režimů, kdy v rámci každého z nich byl měněn pouze předstih zážehu. Následkem použité zpětnovazební regulace stechiometrického složení směsi a prakticky neměnného tlaku v sání bylo možné považovat objemový tok nasávaného vzduchu za téměř konstantní a hlavně tok paliva s ním za pevně svázaný. Při dostatku hodnot spotřeby paliva a známé době otevření vstřikovače lze předpokládat, že průměrná hodnota je očištěna od náhodných vlivů teploty a obecné variability měření spotřeby paliva.
Při zkombinování naměřených spotřeb paliva a délky napěťového pulsu přivedeného na svorky vstřikovače pro jednotlivá použitá paliva získáme závislost vyobrazenou na obr. 14 pro benzin.



Obrázek 14: *Hmotnostní dávka paliva v závislosti na délce aktivačního pulsu vstřikovače*

Pro ostatní paliva byly zjištěny podobné závislosti, grafy jsou připojeny v příloze A. Z tohoto grafu je dále patrná slabá korelace mezi spotřebou paliva a aktivační dobou vstřikovače v rámci jednoho provozního režimu při vysokých zatížení a žádná korelace pro nízká zatížení. Proložením této charakteristiky lineární funkcí s využitím metody nejmenších čtverců byly získány koeficienty lineární funkce popisující dávku paliva na pracovní cyklus $\boldsymbol{m_c}$ a válec pro jednotlivá paliva, což umožnilo z dávky paliva na cyklus $\boldsymbol{m_c}$, výstupního momentu $\boldsymbol{M}$ a výhřevnosti paliva $\boldsymbol{Hu}$ určit celkovou účinnost motoru $\boldsymbol{\eta_c}$ podle vztahu 28.

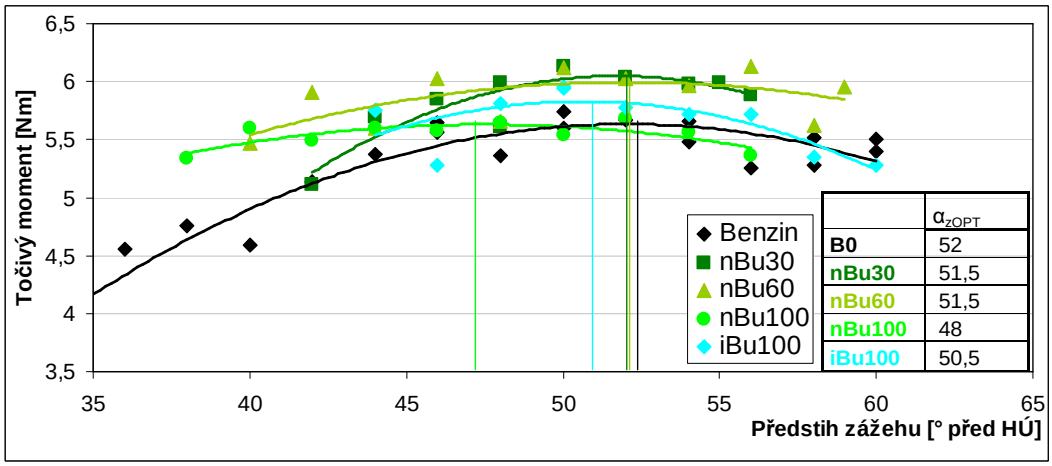
$$\eta_c = \frac{P}{Hu \cdot \dot{m}_{pal}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M \cdot n}{Hu \cdot m_c \cdot n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{Hu \cdot m_c}. \tag{28}$$

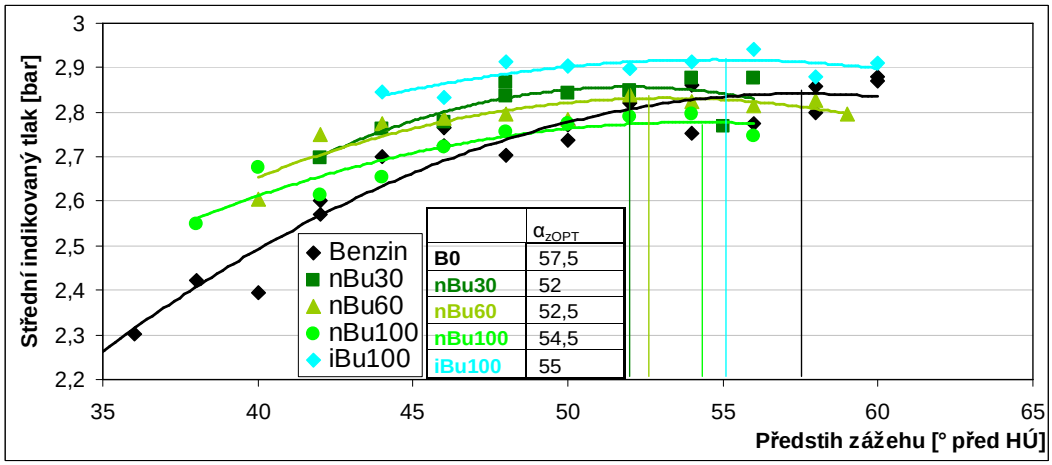
Současně je vhodné při určování optimálního okamžiku zážehu přihlédnout k variabilitě středního indikovaného tlaku.
Následující tabulka zprostředkovává náhled na důležité parametry zkoušených provozních režimů.

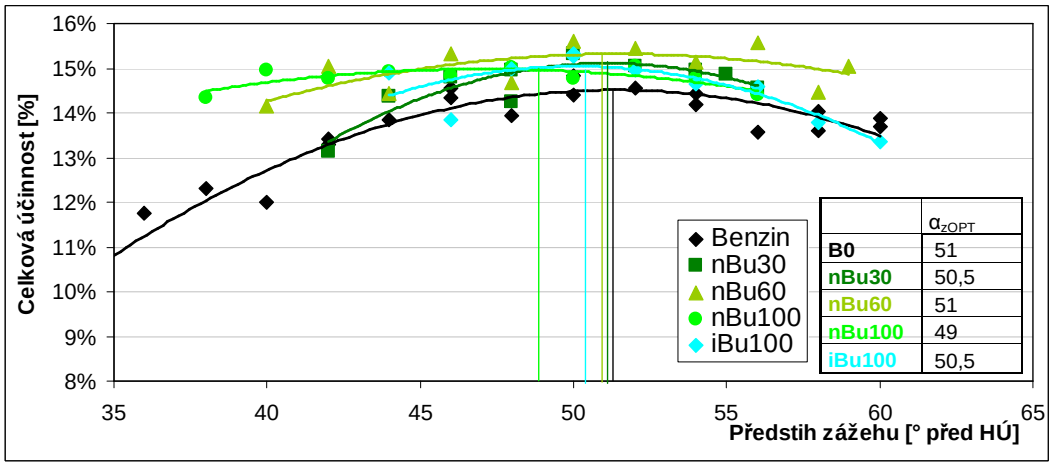
Tabulka 3: *Základní parametry testovaných režimů motoru*

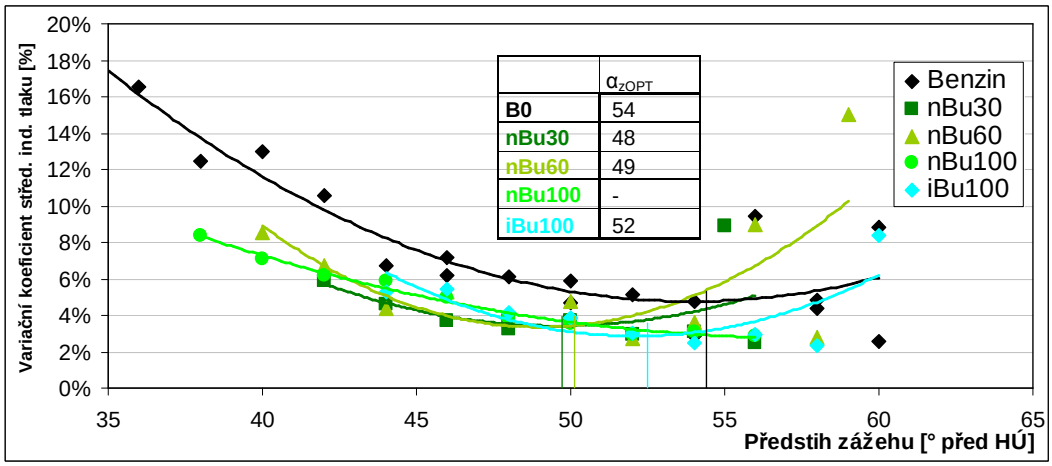
Slovní označení	Úhel škrticí klapky $\boldsymbol{\alpha_K}$ [°]	Otáčky $\boldsymbol{n}$ [min^{-1}]	Přibližný $\boldsymbol{M_{tmax}}$ [Nm]	Přibližný $\boldsymbol{IMEP_{max}}$ [kPa]
Nízké zatížení	18	2800	5,8	145
Nízké zatížení, zvýšené otáčky	23	4200	6,8	170
Střední zatížení	25	2800	18	450
Vysoké zatížení	90 (plně otevřená)	2800	31	770

Na následujících stranách jsou vyobrazeny zjištěné závislosti točivého momentu, středního indikovaného tlaku, vypočtené účinnosti motoru a variability středního indikovaného tlaku s následným přehledem hodnot optimálních předstihů zážehů pro všechna zkoušená paliva a režimy.



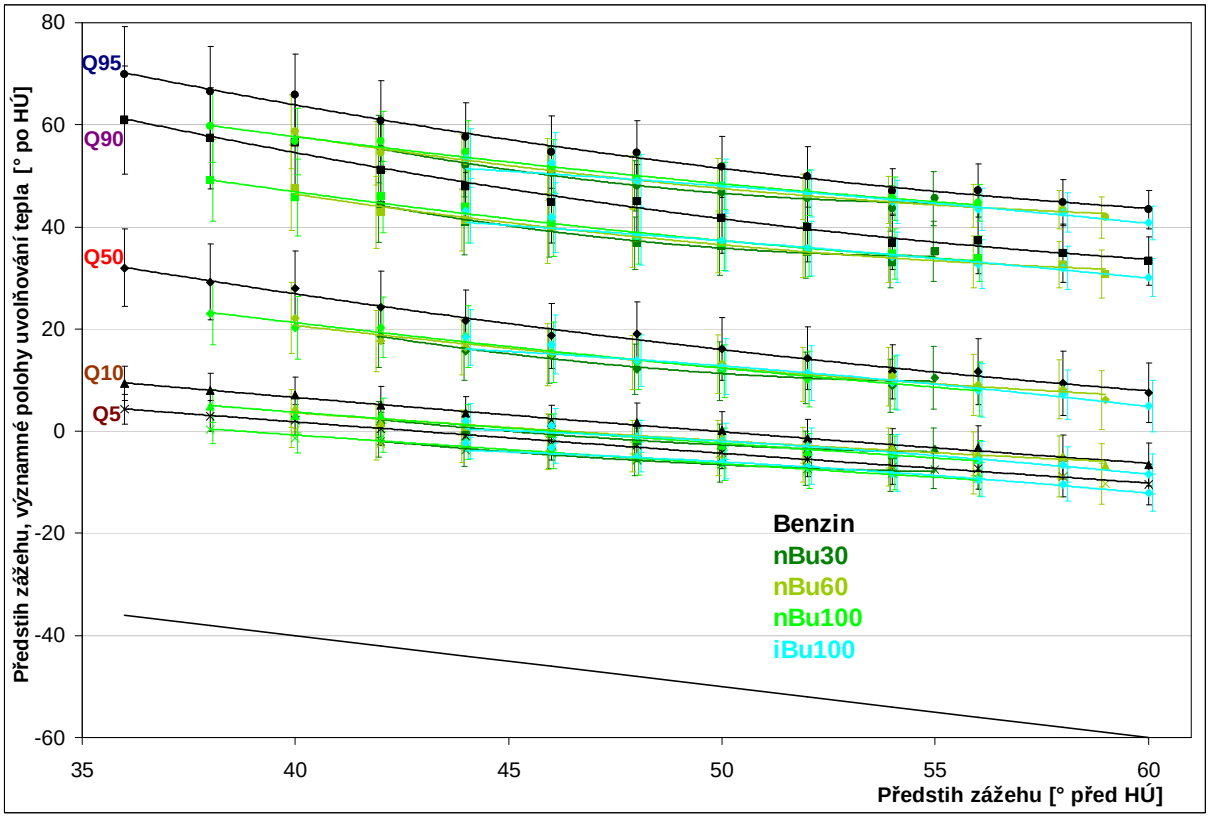






Obrázek 15: *Hodnotící kritéria v závislosti na předstihu zážehu za nízkého zatížení*

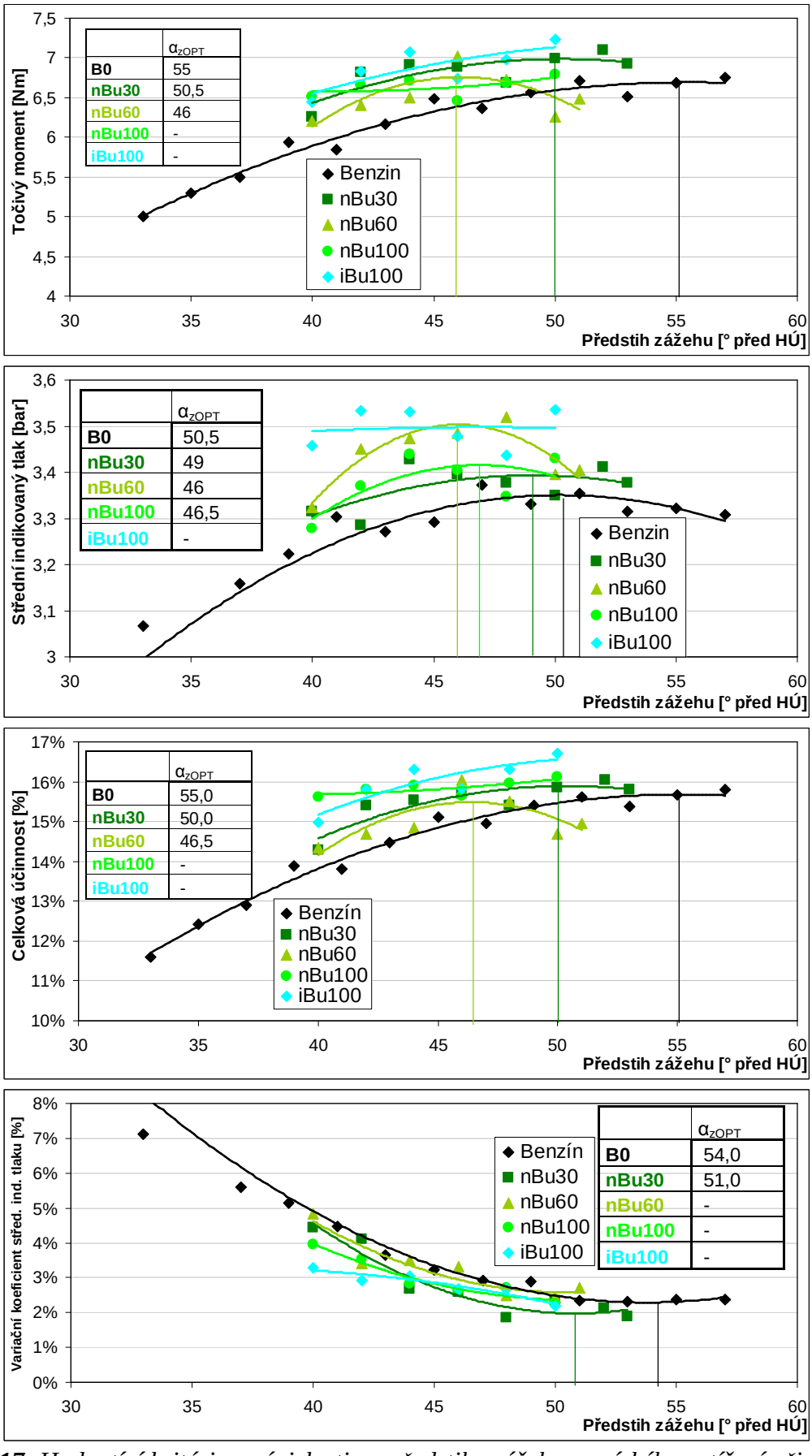
Předchozí hodnoty optimálního předstihu podle jednotlivých hledisek byly relativně nejednoznačné. Zprůměrováním zjištěných hodnot pro jednotlivá paliva byly získány hodnoty předstihů pro jednotlivá paliva, které lze pokládat za optimální. Z této tabulky č. 4 pro toto nízké zatížení je možné vyčíst, že při náhradě benzinu n-butanolem je vhodné v závislosti na podílu butanolu snížit předstih o cca 3 stupně pootočení klikového hřídele. Efekt iso-butanolu je oproti n-butanolu v tomto režimu přibližně poloviční. Ponechání předstihu zážehu na výchozí hodnotě v tomto režimu by však nemělo způsobit potíže při chodu motoru.
Dále navržené změny v předstihu zážehu ukazují na rychlejší šíření plamene v případě použití n-butanolu a menší vliv iso-butanolu. Veškeré změny předstihu jsou pro všechny režimy a paliva shrnuty v tabulce 4.
Následující graf zachycuje významné okamžiky uvolňování tepla při částečné či úplné náhradě benzinu n-butanolem a při spalování čistého iso-butanolu. Z něj je jasně patrné rychlejší šíření plamene, přičemž zaznamenané rozdíly oproti benzinu zjištěné touto metodou nevykazují jednoznačný trend v závislosti na koncentraci butanolu.



Obrázek 16: *Charakteristické body hoření pro různé koncentrace butanolu za nízkého zatížení*

Přestože jsou změny v průtahu zážehu i dalším rozvoji plamene jednoznačně patrné, při uvažování mezicyklové variability, která je v předchozím grafu vynesena ve formě střední směrodatné odchylky jednotlivých význačných bodů hoření, se změny jeví jako mírné. Pro lepší čitelnost byly tzv. chybové úsečky, znázorňující střední směrodatnou odchylku, horizontálně posunuty, poloha vlastních datových bodů nebyla měněna. Není-li uvedeno jinak, znázorňují chybové úsečky i v jiných částech této práce střední směrodatnou odchylku zobrazovaných hodnot.

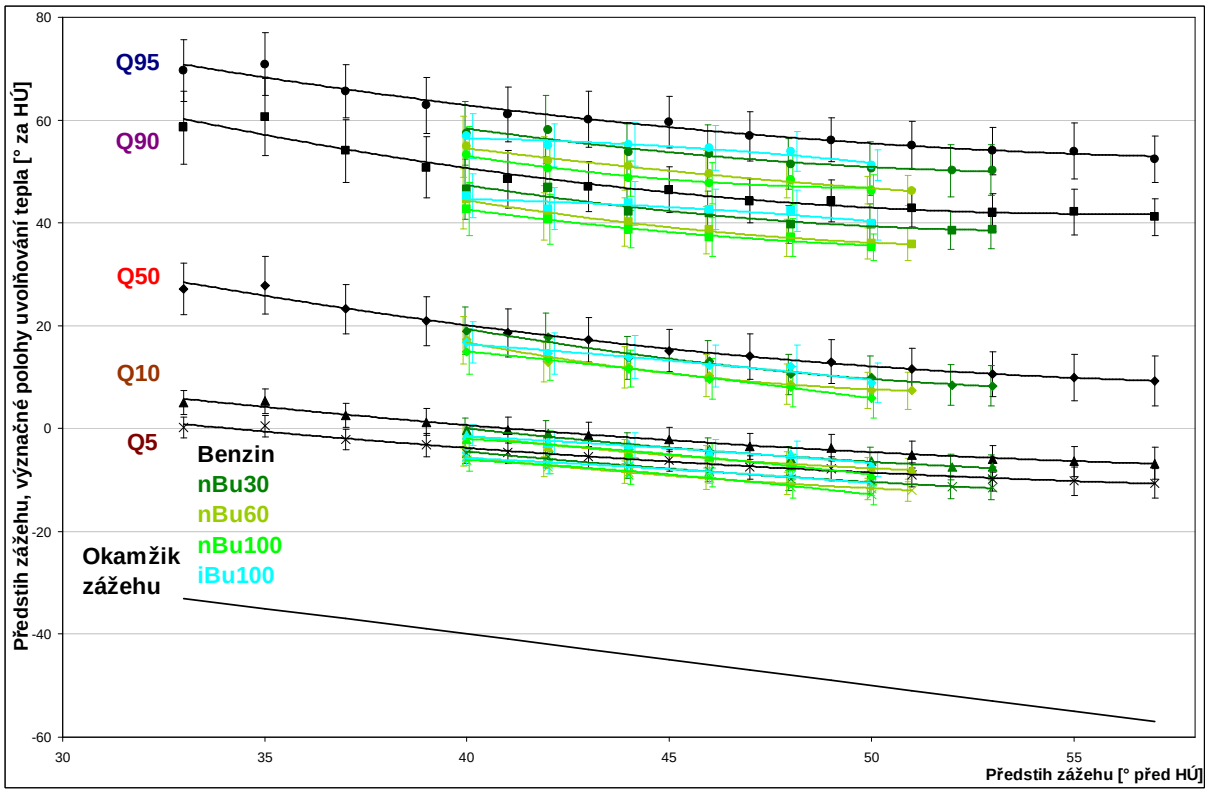
Dalším vyšetřovaným režimem byla kombinace shodného plnicího tlaku za zvýšených otáček. Hodnoty optimálních předstihů dle jednotlivých metod i celkového optimálního předstihu zážehu byly získány shodným způsobem jako u předcházejícího režimu.



Obrázek 17: *Hodnotící kritéria v závislosti na předstihu zážehu za nízkého zatížení při zvýšených otáčkách*

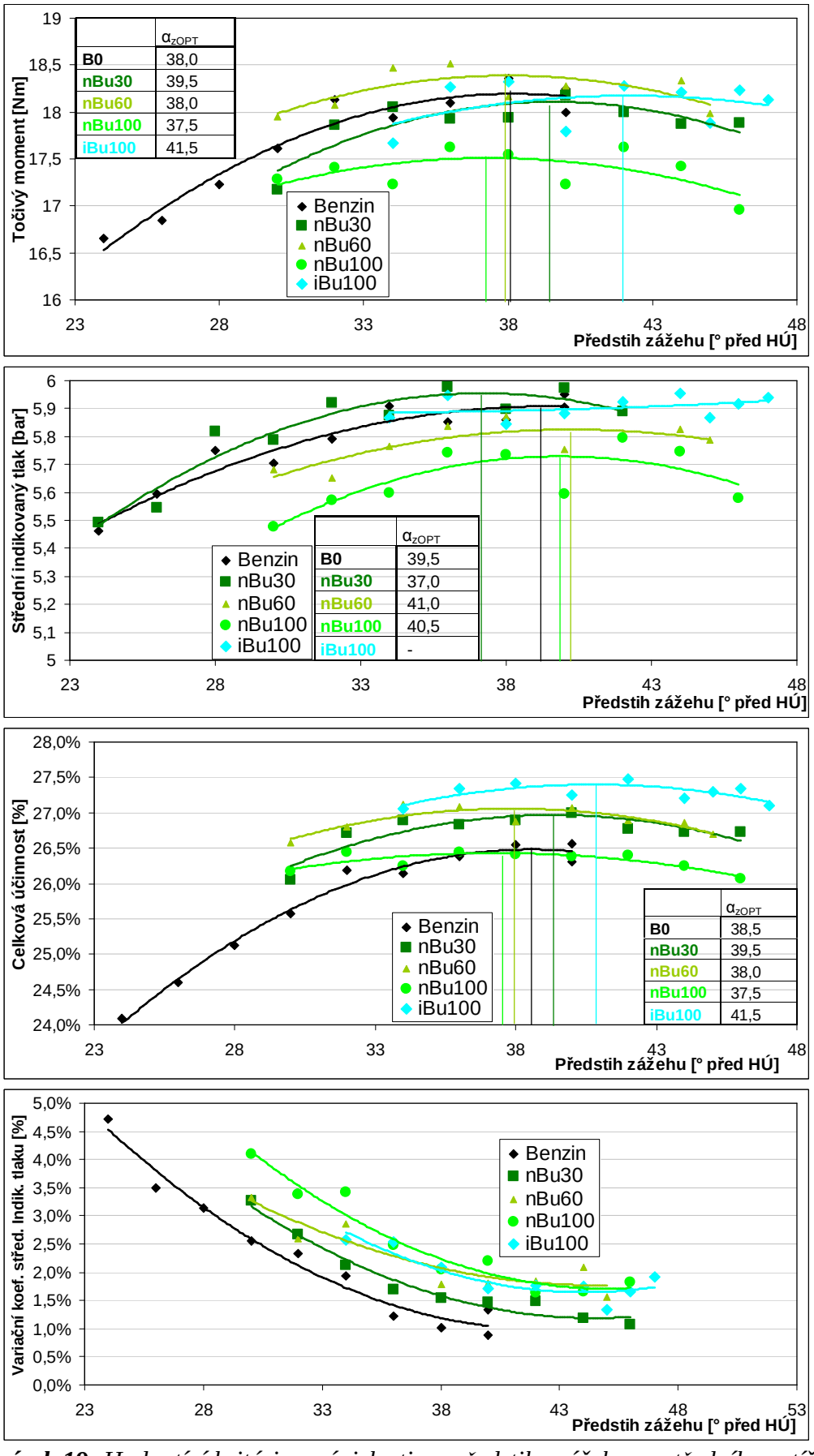
I zde je patrný vliv n-butanolu na urychlení hoření, což ukazuje jak navrhovaný pokles předstihu zážehu, který nabývá nemalé hodnoty 7,5°, tak i vliv na polohu význačných bodů hoření na

následujícím grafu. V tomto případě je patrné postupné zrychlování hoření s podílem n-butanolu s nižším rozdílem mezi nBu60 a čistým n-butanolem.
Pro iso-butanol nebylo možné zjistit polohu žádnou z použitých metod. Z následujícího je patrné, že průběh hoření čistého iso-butanolu je podobný hoření nBu30. Proto byl navržen i shodný předstih 50,0° před HÚ.



Obrázek 18: *Charakteristické body hoření pro různé koncentrace butanolu za nízkého zatížení a zvýšených otáček*

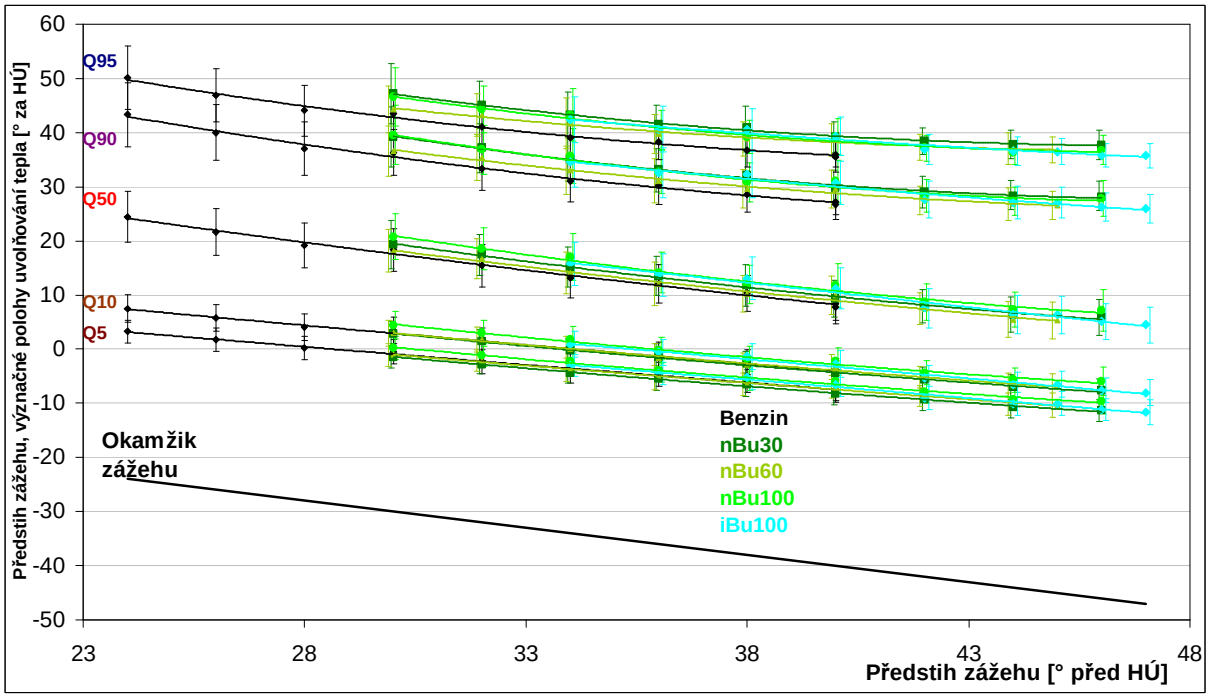
Pro střední zatížení byly získány následující charakteristiky pro točivý moment, střední indikovaný tlak, celkovou účinnost a variační koeficient středního indikovaného tlaku.



Obrázek 19: *Hodnotící kritéria v závislosti na předstihu zážehu za středního zatížení*

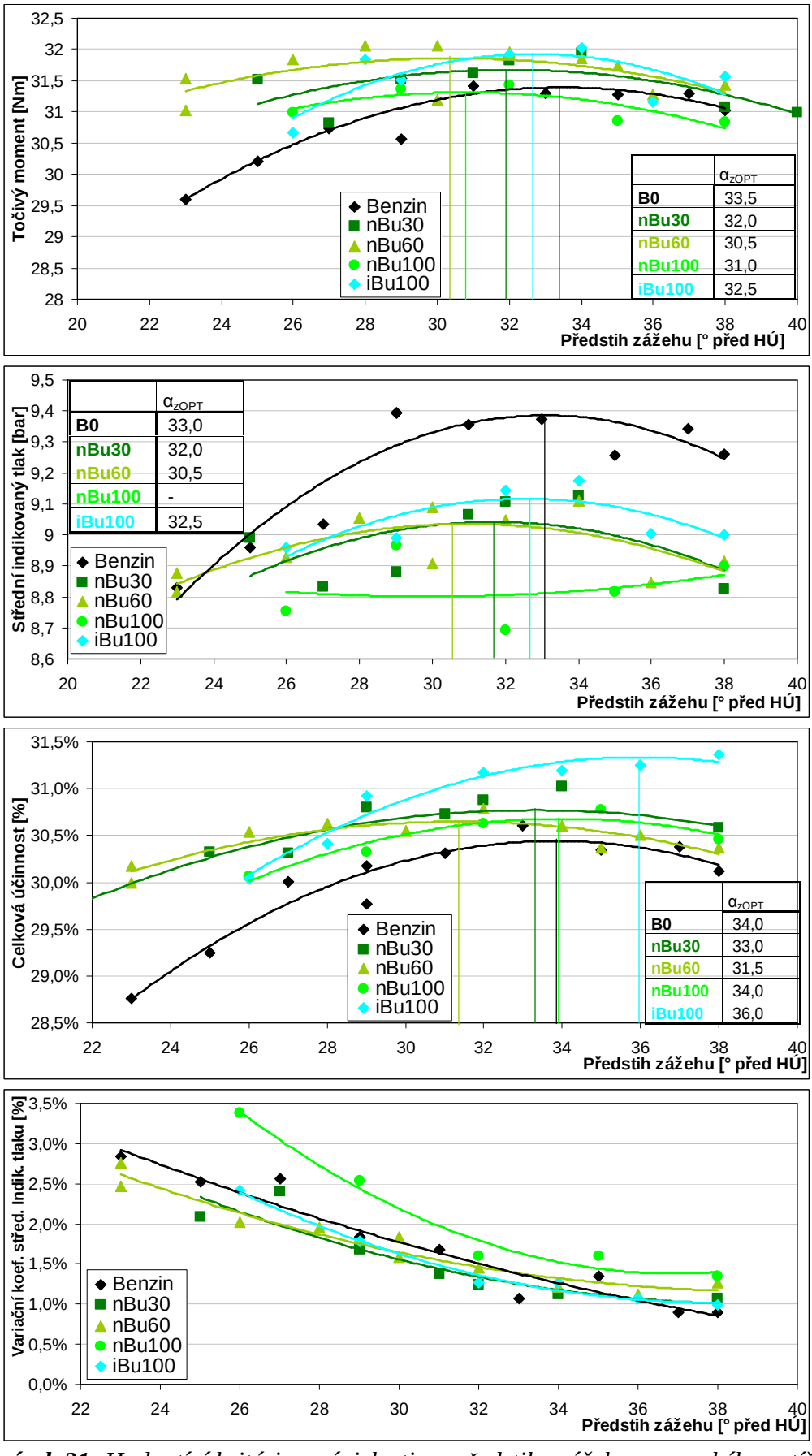
V režimu středního zatížení se již neprojevil efekt přidání n-butanolu na rychlost šíření plamene, o čemž svědčí jednak prakticky nezměněný okamžik zážehu, tak následující graf uvolňování tepla

v závislosti na použitém palivu a předstihu zážehu. Kritérium variability středního indikovaného tlaku bylo z hodnocení vypuštěno, protože pro většinu paliv nedošlo k projevení spolehlivého minima. Překvapivě vychází optimum zážehu i s přihlédnutím k průběhu hoření pro iso-butanol opožděné o cca 3° pootočení klikového hřídele. Tento posun je způsoben zejména výrazným propadem točivého momentu při předstihu zážehu 40° pootočení klikového hřídele před horní úvratí. Ze zaznamenaných dat však nebylo možné stanovit příčinu této odchylky. Vzhledem ke značně ploché charakteristice všech použitých kritérií v okolí optima, od celkového trendu, odchylným hodnotám pro předstih 40° před HÚ a variabilitě spalovacího procesu nepovažuji tuto změnu za významnou a navrhuji zachovat předstih zážehu totožný s benzinem. Dále výsledky v tomto jediném režimu naznačují nárůst variability spalování v důsledku použití butanolu.



Obrázek 20: *Charakteristické body hoření pro různé koncentrace butanolu za středního zatížení*

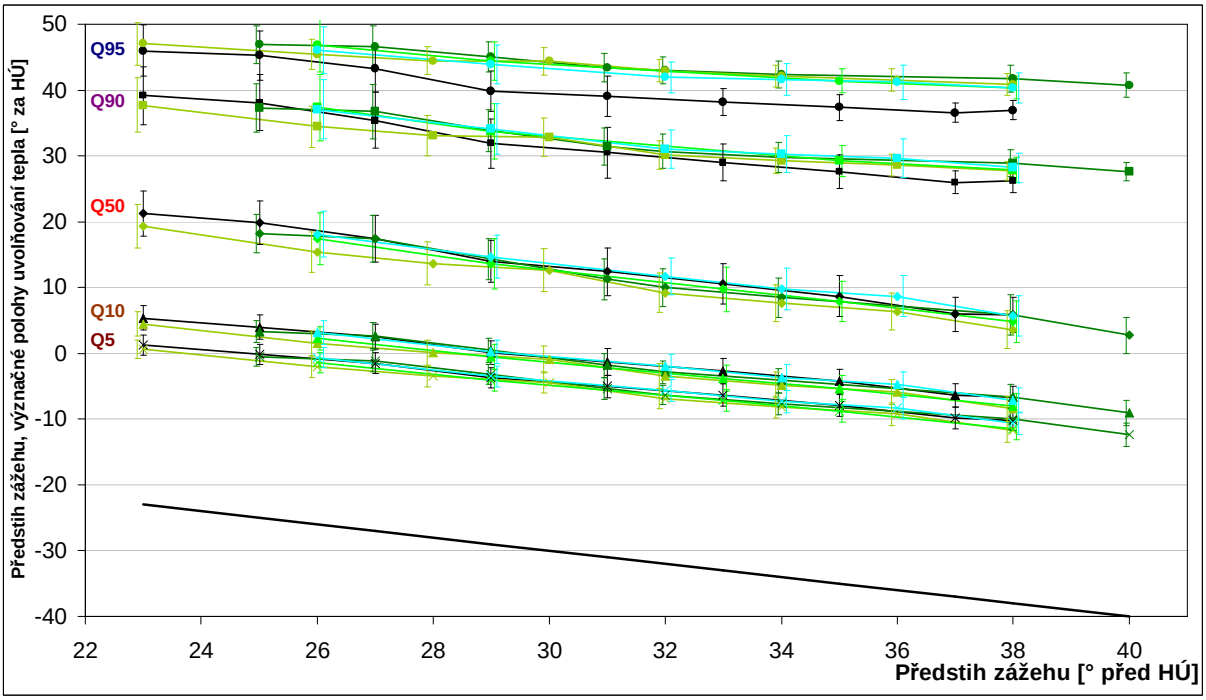
Oproti tomu porovnání průběhu uvolňování tepla ukazuje poměrně konzistentní zpomalení hoření při narůstající koncentraci butanolu, a to o téměř dva stupně pootočení klikového hřídele v případě, že je benzin plně nahrazen butanolem. Celkově lze však, s přihlédnutím k rozptylu hodnot, bez zhoršení užitných parametrů motoru ponechat nezměněný předstih zážehu.
Posledním testovaným režimem pak byl režim plně otevřené škrticí klapky.



Obrázek 21: *Hodnotící kritéria v závislosti na předstihu zážehu za vysokého zatížení*

Plné zatížení vykazovalo podobné charakteristiky jako zatížení střední. Příměs n-butanolu se téměř neprojevila, optimum pro iso-butanol bylo obdobné k benzinu. Variabilita středního indikovaného

tlaku v okolí optimálního předstihu nedoznala výrazných změn u žádného z paliv.
Ani průběh poloviny uvolněného tepla nedoznal změn hodných zřetele. Pouze polohy pro 90 % a 95 % uvolněného tepla byly posunuty dále do expanze vlivem pomalejšího dohořívání bez vlivu koncentrace butanolu.



Obrázek 22: *Charakteristické body hoření pro různé koncentrace butanolu za vysokého zatížení*

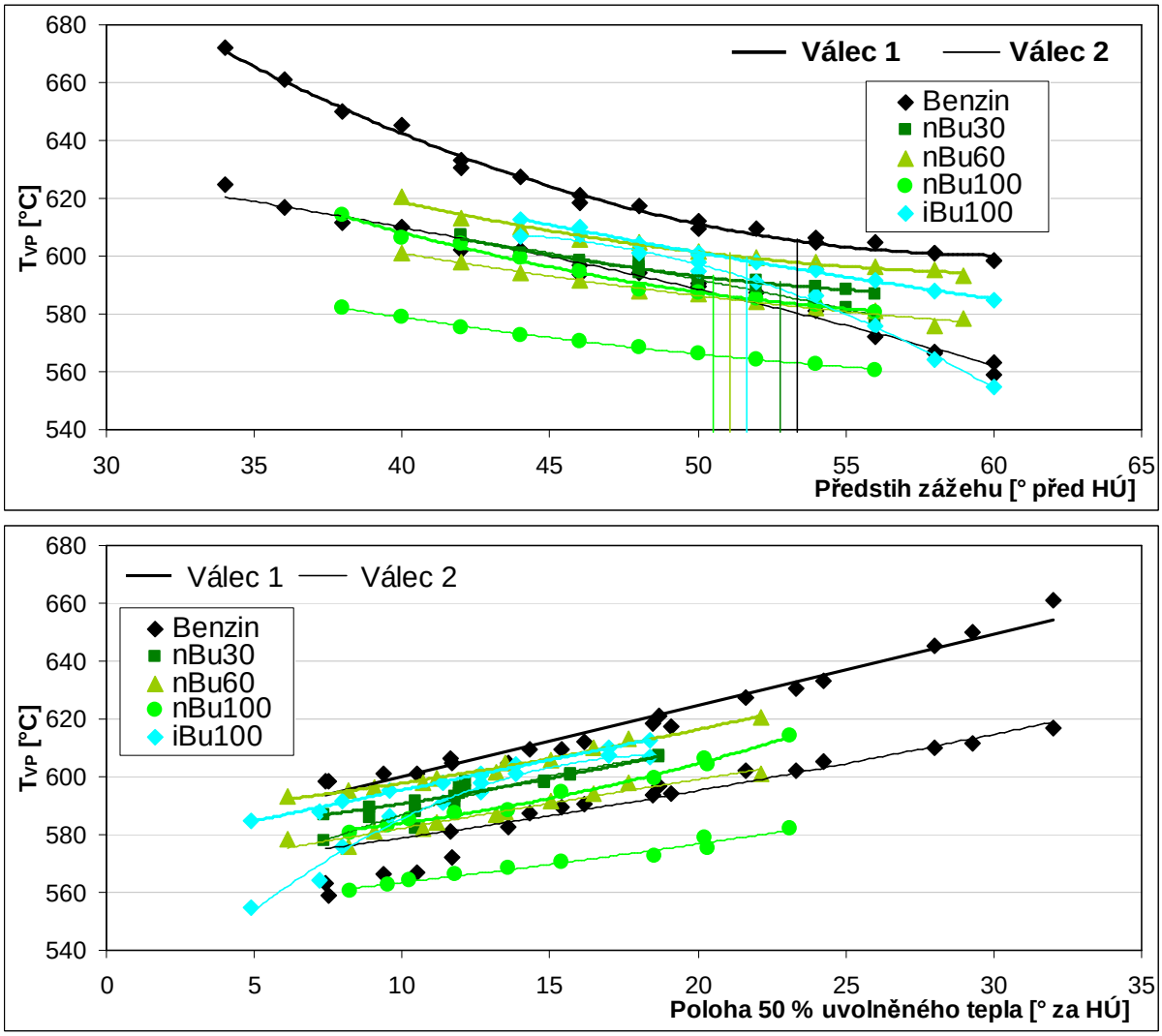
Tabulka 4: *Výsledné hodnoty předstihu pro jednotlivá paliva a provozní režimy motoru*

α_{zOPT}	Nízké zatížení	Nízké zatížení a zvýšené otáčky	Střední zatížení	Vysoké zatížení
Benzin	53,5	53,5	38,5	33,5
nBu30	53,0	50,0	38,5	32,5
nBu60	51,0	46,0	39,0	31,0
nBu100	50,5	46,5	38,5	32,5
iBu100	52,0	-	38,5	34,0

Vliv n-butanolu se tedy projevil zejména při nízkých zatíženích, kde díky nízké intenzitě rozvíření hraje laminární rychlost šíření plamene nezanedbatelnou roli. Důsledkem toho byl rychlejší postup hoření při využití n-butanolu jako paliva, přičemž vliv iso-butanolu byl nižší v souladu s [14, 15].
Celkově lze pak celkové požadavky na změnu předstihu shrnout na nutnost snížení předstihu za nízkých zatížení zejména při vyšších otáčkách. Pro střední a vysoká zatížení jsou optimální otáčky pro benzin prakticky vyhovující i při náhradě benzinu butanolem.

8.1.2 Vliv použití butanolu na teploty výfukových plynů

Dále byly pro jednotlivé provozní režimy sledovány teploty výfukových plynů, jakožto důsledek měněného předstihu zážehu a použitého paliva. Protože byla zjištěna závislost průběhu hoření, který ovlivňuje teplotu výfukových plynů, i na použitém palivu, jsou data prezentována i v závislosti na okamžiku, kdy je uvolněna polovina tepla. V grafech teplot výfukových plynů, jakožto funkce předstihu zážehu, jsou dále vyznačeny hodnoty pro optimální okamžik zážehu.

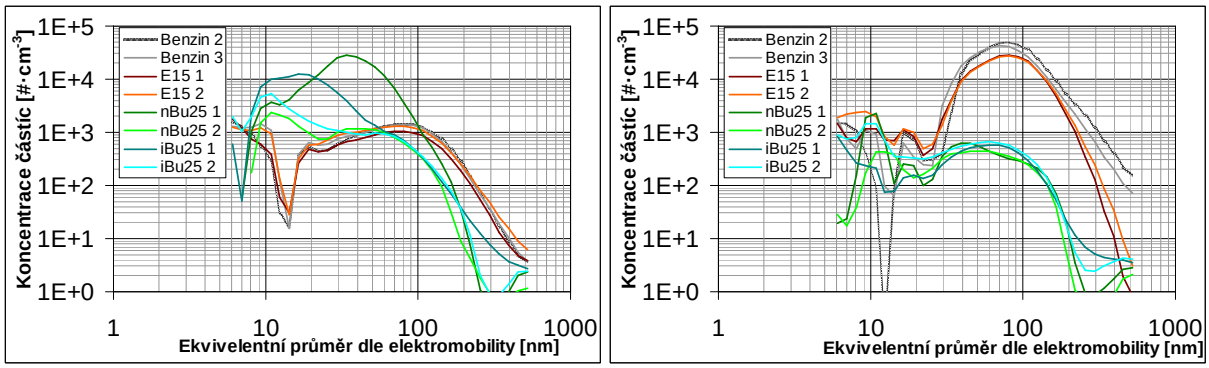


Obrázek 23: *Grafy teplot výfukových plynů pro nízké zatížení*

Experimentálně zjištěná data vykazují nemalý rozdíl mezi jednotlivými válci. Mezi možné příčiny tohoto rozdílu lze zařadit jednak vliv odlišných parametrů indikační svíčky, umístěné v prvním válci vzhledem k druhému válci (poloha jiskřiště, vzdálenost elektrod), odlišný průběh hoření daný rozdílnou intenzitou rozvíření náplně či odlišné naplnění válců. Ze závislosti teplot výfukových plynů je patrné, že při navyšování koncentrace n-butanolu dochází při konstantní poloze zážehu ke snížení teploty výfukových plynů s nižším efektem iso-butanolu.

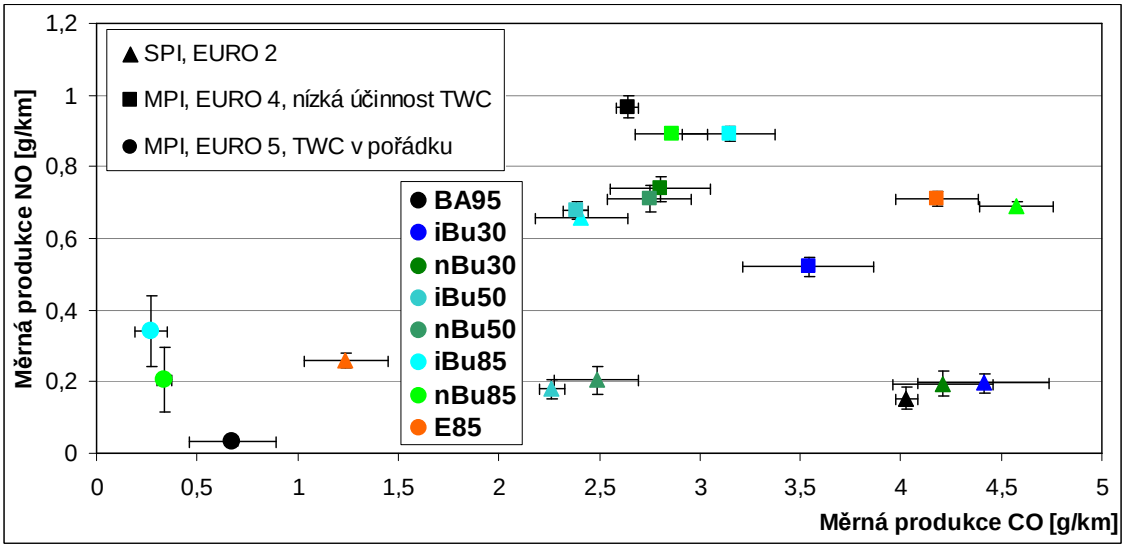
Při vynesení teplot výfukových plynů v závislosti na poloze klikového hřídele, kdy je uvolněna polovina tepla, lze vliv odlišného průběhu hoření minimalizovat. Při optimálním předstihu zážehu byly v souladu s teorií detekovány polohy v oblasti 8−10° za horní úvratí. Uvažujeme-li v této oblasti teplotu výfukových plynů jako průměr z hodnot pro oba válce, dojdeme pouze k nepříliš konzistentním a malým změnám. Jedinou výjimkou je zde čistý n-butanol, u kterého byl zjištěn pokles teplot výfukových plynů o přibližně 10 °C.

k celkové produkci již tvoří přibližně polovinu celkové produkce.
Situaci lépe ilustruje následující graf, který porovnává průměrná velikostní spektra částic mezi desátým a třicátým kilometrem (vlevo) a v úseku vysokého zatížení (31,5 až 33,5 km, vpravo).



Obrázek 74: *Porovnání velikostních spekter pevných částic pro vybrané úseky*

Z výše zobrazeného je při mimoměstské jízdě patrná jen malá změna velikostních spekter při náhradě 15 % etanolem, přičemž změny v rozsahu pod i nad 23 nm jsou prakticky zanedbatelné. Při náhradě 25 % benzinu libovolným izomerem butanolu lze pozorovat výrazný pokles velikosti v tzv. akumulační bázi. Navíc ale dochází k nárůstu produkce menších částic pod 40 nm.
V průběhu dálniční akcelerace při stoupání se již přídavek 15 % etanolu projevil viditelným a opakovatelným poklesem koncentrace pevných částic ve výfukových plynech o velikostech nad 40 nm bez zjevného vlivu na částice menší. Náhrada 25 % benzinu libovolným izomerem butanolu pak přinesla nad 40 nm pokles koncentrací výrazně převyšující jeden řád. V oblasti menších částic byl vyhodnocen vliv jako nejednoznačný a z hlediska celkového počtu nevýrazný.
Oproti motorům s vnější tvorbou směsi nebyl zjištěn zaznamenatelný vliv přídavku butanolu v koncentraci 25 % na startovatelnost studeného motoru.



Obrázek 75: *Porovnání měrných produkcí NO a CO pro vozidla s vnější tvorbou směsi*

Porovnáme-li množství vypuštěných plynných znečišťujících látek ve výchozím stavu při spalování benzinu, dojdeme k závěru, že kromě emisního standardu vozidla více záleží na stavu zařízení pro úpravu výfukových plynů, a to zejména při pohledu na produkci oxidů dusíku. Získaný soubor dat pak, i přes svůj omezený rozsah, naznačuje, že při vyřešení startovatelnosti a provozu ohřívajícího se motoru nedojde k negativnímu ovlivnění tvorby směsi a zhoršení emisních parametrů, nepřesáhne-li koncentrace butanolu 50 % (V/V). Při zapojení přídatné jednotky pro prodloužení vstřiků by u motorů s vícebodovým vstřikem paliva nemělo působit problémy spalování vyšších koncentrací butanolu, s přihlédnutím k výsledkům na zkušebním stanovišti ani čistého butanolu bez viditelného vlivu použitého izomeru.

U motorů s přímým vstřikem paliva pak pro koncentrace 25 % (V/V) butanolu nebyly zjištěny negativní vlivy, naopak byl zjištěn výrazný pokles produkce pevných částic.
Poznatky jiných autorů i zkušenosti autora této práce však upozorňují na nutnost pečlivého přístupu k vyřešení problematiky provozu studeného motoru, kdy může docházet k ředění mazacího oleje vedoucího v extrémním případě až k poškození motoru.

11 Malé motory při provozu na butanolová paliva

Použití zážehových motorů není omezeno pouze na automobily, ale jejich menšími variantami je poháněna řada dalších dopravních prostředků a strojů. Pro některé z nich byla otestována možnost použití butanolu v menší či větší míře podle možnosti úprav daného motoru.
Motivace pro tyto úpravy však již nebyla ani tak v náhradě benzinu jiným palivem s cílem posoudit možnosti snížení jeho spotřeby, protože se na jeho celkové spotřebě podílí jen malou měrou, ale spíše v průzkumu možného snížení dopadů negativních vlivů použití těchto motorů. Obecně je na menší motory, ať už využité pro pohon dvoustopých vozidel či drobných strojů, nahlíženo jako na zdroj energie, který má být jednoduchý, lehký a levný. Z tohoto důvodu jsou tyto motory, zejména z hlediska přípravy palivové směsi a dodatečné úpravy výfukových plynů, poněkud primitivně řešené, což má zpravidla za následek výrazně vyšší měrnou produkci znečišťujících látek. Použití alkoholových paliv může být, díky přivedení kyslíku do reakce v samotném palivu, vhodné ke snížení nedokonalosti spalování a tak i ke snížení produkce s ním spojených znečišťujících látek.

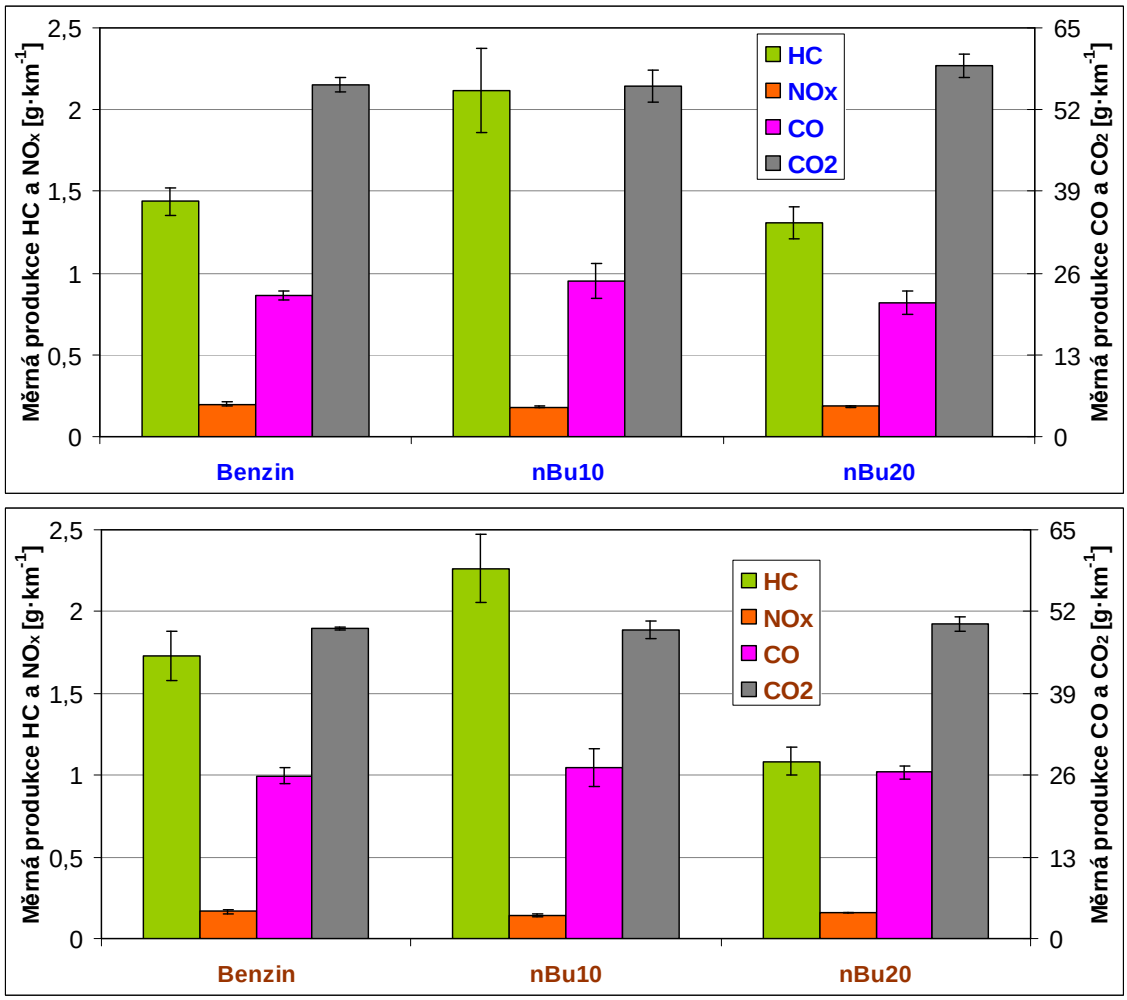
11.1 Výsledky použití benzin-butanolové směsi v jednostopém vozidle

Prvním takovýmto motorem byl čtyřdobý vzduchem nuceně chlazený motor umístěný ve skútru Parvisa Myspace 125, jehož důležité parametry shrnuje tabulka 12.

Tabulka 12: *Základní parametry motoru poháněnjícího testovaný skútr*

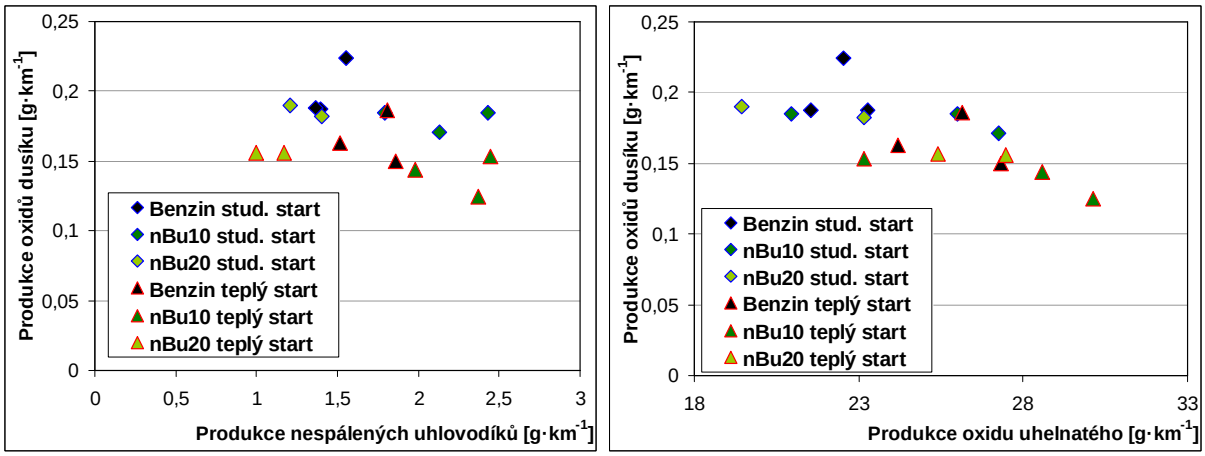
Označení motoru	Baotian 152QMI-B
Počet válců	1
Zdvihový objem [dm^3]	0,125
Vrtání [mm]	52,4
Zdvih [mm]	57,8
Kompresní pomer [-]	1:9,2
Druh rozvodů	OHC
Tvorba směsi	Plovákový karburátor

U tohoto vozidla byly provedeny zkoušky na válcové zkušebně pro jednostopá vozidla (Istituto Motori, Neapol, Itálie) při použití 10 % a 20 % koncentrací n-butanolu ve směsi. Zkoušky probíhaly bez úprav karburátoru, pouze byla změněna poloha škrticí klapky pro volnoběh, protože při aplikaci libovolné ze dvou koncentrací butanolu narostly volnoběžné otáčky nad přípustnou mez a docházelo k částečnému sepnutí volnoběžné spojky. Po přechodu zpět na benzin bylo nutné klapku opět lehce pootevřít z důvodu příliš nízkých volnoběžných otáček a nespolehlivého chodu motoru na volnoběh.
Vozidlo bylo zkoušeno za použití první části World Motorcycle Test Cycle (WMTC, part 1), a to při dvou po sobě následujících jízdách, přičemž první byla provedena se studeným startem (předchozí odstávka alespoň 3 hodiny). Uvedené dvojice jízdních cyklů byly opakovány třikrát pro každé palivo. Vyšetřovány byly produkce běžných plynných znečišťujících látek a z nich vypočtená celková energie přivedená v palivu. Výsledky jsou shrnuty graficky na obr. 76 (jízdy se studeným startem v horním grafu).



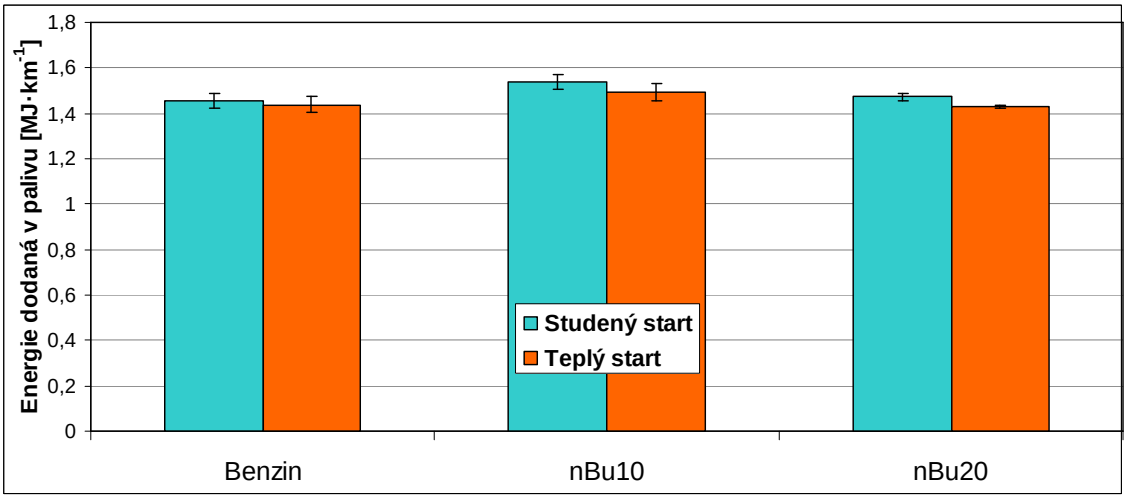
Obrázek 76: *Porovnání produkce plynných znečišťujících látek na různá paliva při cyklu WMTC se studeným (nahoře) a teplým startem (dole)*

Z výsledků je patrný překvapivý průběh závislosti produkce nespálených uhlovodíků na koncentraci přidaného n-butanolu, kdy nejvyšší množství bylo produkováno pro nBu10. Oproti tomu koncentrace oxidů dusíku vykazovala velmi malé změny opačného charakteru, což naznačuje změny v bohatosti palivové směsi. Navíc byla zaznamenána o něco vyšší produkce nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého při jízdách začínajících studeným startem.
Z porovnání produkce nespálených uhlovodíků, oxidu uhelnatého a oxidů dusíku (obr. 77) vyplývá změna bohatosti směsi mezi palivy, která však nekoresponduje se změnami vlastností směsi, na jejichž základě by mělo docházet k malému a konzistentnímu posunu k méně obohaceným směsím.



Obrázek 77: *vzájemné porovnání produkce CO, HC a NO_x*

Dále pak lépe ilustruje změnu produkce CO a HC na jedné straně a NO_x na druhé, ze které lze usuzovat na nižší obohacení v případě jízdy po studeném startu, které se projeví nižšími koncentracemi oxidu uhelnatého a vyššími koncentracemi oxidů dusíku.



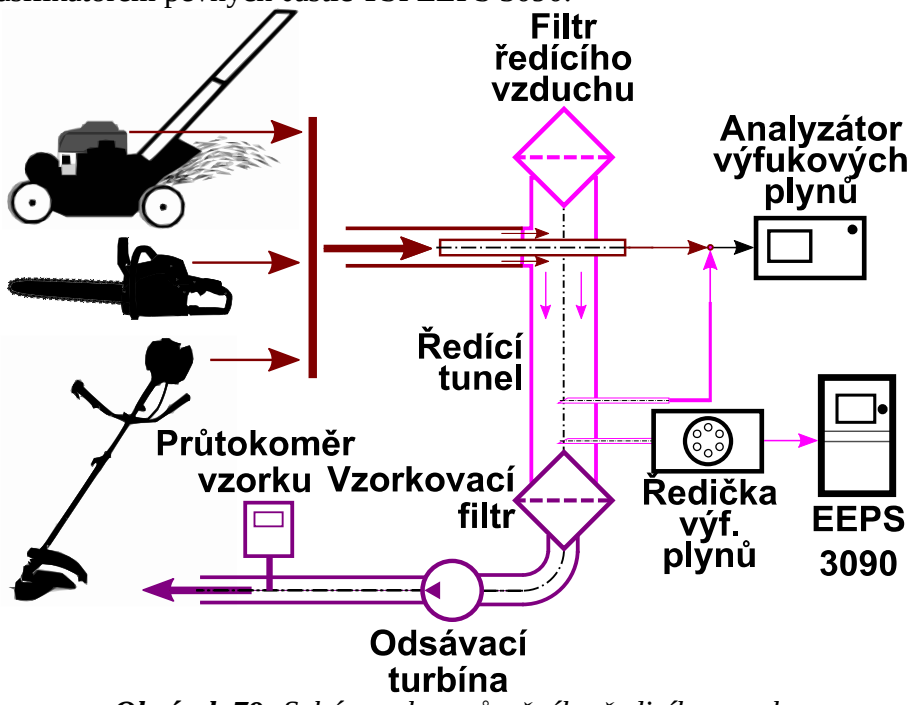
Obrázek 78: *Vliv jízdy se studeným startem na množství spotřebované energie*

I přesto však byla zaznamenána vyšší spotřeba paliva, a tím i vyšší energie přivedená v palivu, jak je ilustrováno na obrázku 78, byť se jedná změnu pod hranicí statistické významnosti.
Celkově lze však na základě dosažených výsledků konstatovat, že n-butanol může být bez následků ve formě zvýšené produkce regulovaných plynných znečišťujících látek použit v neupravených karburátorových motorech ve skútrech. Navíc díky dostatečnému obohacení nedošlo ke změně startovatelnosti motoru za běžných teplot.

11.2 Výsledky použití butanolu v elektrické centrále

V tomto případě se jednalo o malou přenosnou elektrocentrálu Kipor IG 2000 osazenou jednoválcovým čtyřdobým zážehovým motorem o zdvihovém objemu 105 cm^3 (IG 105, vrtání 58 mm, zdvih 40 mm, kompresní poměr 8,5, vzduchem chlazený) a tvorbě palivové směsi pomocí karburátoru (běžné plovákové provedení) bez dodatečné úpravy výfukových plynů. Celé soustrojí je schopno dodávat elektrický výkon 2 kW. Zkušební procedura byla inspirována homologačním emisním předpisem pro drobnou přenositelnou mechanizaci (dle klasifikace ES 97/68/ES třída SN:3) pracující při jmenovitých otáčkách ISO 8178 G2. Tento se sestává ze všech možných ustálených režimů se stupni zatížení odstupňovanými po 25 %, dále zatížení 10 % a volnoběhu. Nejnižší zatížení bylo vyjmuto jako velmi neobvyklé pro typický provoz elektrocentrály. Zátěž byla realizována kombinací běžných elektrických spotřebičů s aktuální spotřebou kontrolovanou spotřeboměrem průběžně při jednotlivých režimech zatížení. Nicméně však nebylo možné dosáhnout zatížení odstupňovaného přesně po 25 %, ale pouze 24 %, 49,5 %, 72 % a 92,5 %.
Za účelem dosažení úspěšného provozu spalovacího motoru a pro zajištění shodných podmínek pro jednotlivé porovnávané směsi s vyšším podílem butanolu bylo nutné provést opatření k udržení výchozí bohatosti směsi s co možná nejmenšími odchylkami. Tohoto bylo dosaženo experimentálním způsobem, kdy byla bohatost směsi stanovována pro jednotlivé režimy výpočtem (Brettschneiderův vztah) a porovnávána s výchozí hodnotou. Nejlepší shody bylo dosaženo, pokud byla výchozí dávkovací tryska karburátoru, používaná pro benzin o průměru 0,60 mm, nahrazena tryskou s průměrem otvoru 0,64 mm pro směs s 30 % n-butanolu (dále označena jako nBu30) a 0,72 mm pro směsi s 70 % butanolu (nBu70 a iBu70). Nelineární závislost je pravděpodobně zapříčiněna vlivem narůstající viskozity protékajícího paliva s rostoucí koncentrací butanolu a dále přítomností dalších prvků s poměrně malým průřezem ve vlastní trysce karburátoru.
K vyhodnocení produkce regulovaných i neregulovaných znečišťujících látek bylo využito plnoprůtočného ředicího tunelu s měřeným průtokem, jehož principiální schéma je znázorněné

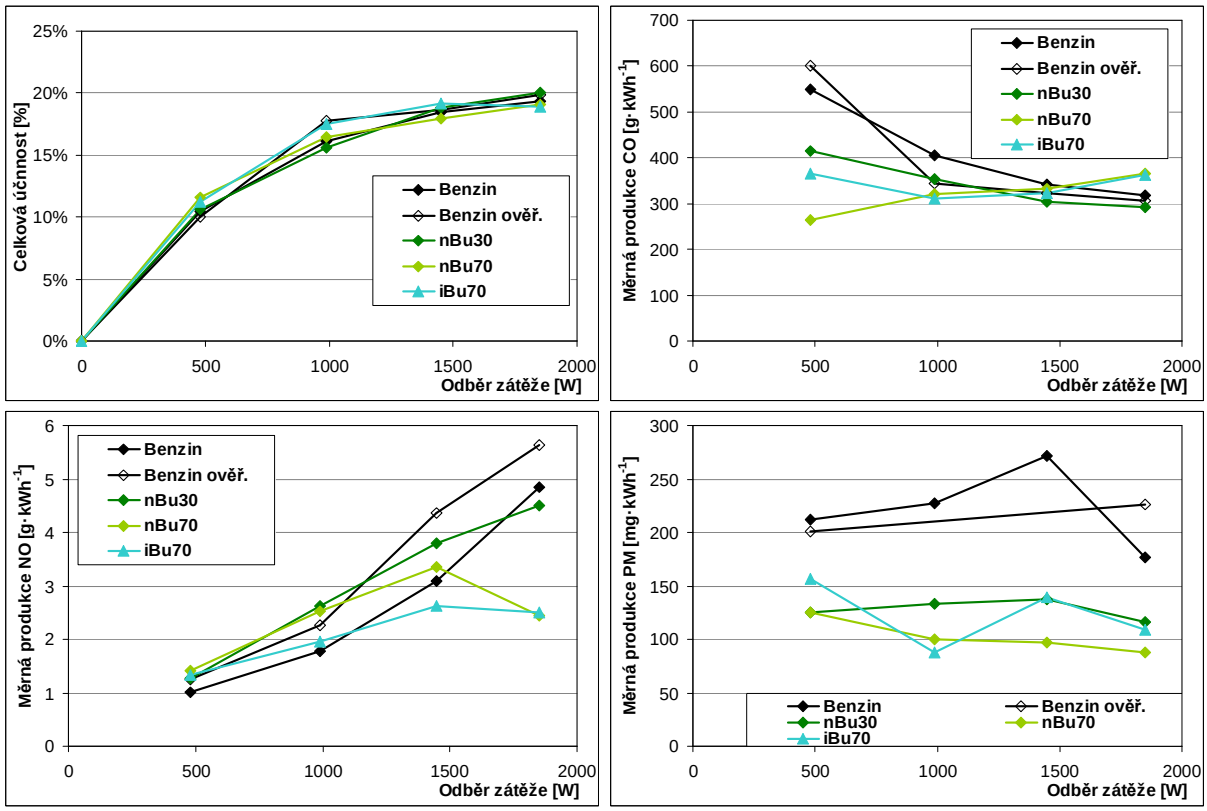
na obr. 79 a blíže popsané v [50]. Toto zařízení je dále uzpůsobeno ke vzorkování pevných částic, kdy jsou veškeré produkované výfukové plyny prosávány přes filtr. Zařízení dále umožňuje odběr ředěného i neředěného vzorku výfukových plynů a samozřejmostí je měření průtoku naředěných výfukových plynů. Koncentrace sledovaných plynných látek byly v ředěném vzorku měřeny shodným analyzátorem výfukových plynů jako při jízdních zkouškách vozidel. Navíc byly pomocí velikostního klasifikátoru částic vyšetřovány koncentrace a celkové počty částic (včetně volatilních) velikostním klasifikátorem pevných částic TSI EEPS 3090.



Obrázek 79: *Schéma plnoprůtočného ředicího tunelu*

Toto uspořádání umožňuje z koncentrace plynných znečišťujících látek a průtoku zředěného vzorku určit tok uhlíku, přivedeného v palivu, z něj pak spotřebu a po vztažení na poskytovaný výkon pak také celkovou účinnost elektrocentrály. Pro sledované znečišťující látky (zde CO a NO_x) pak také měrnou produkci.

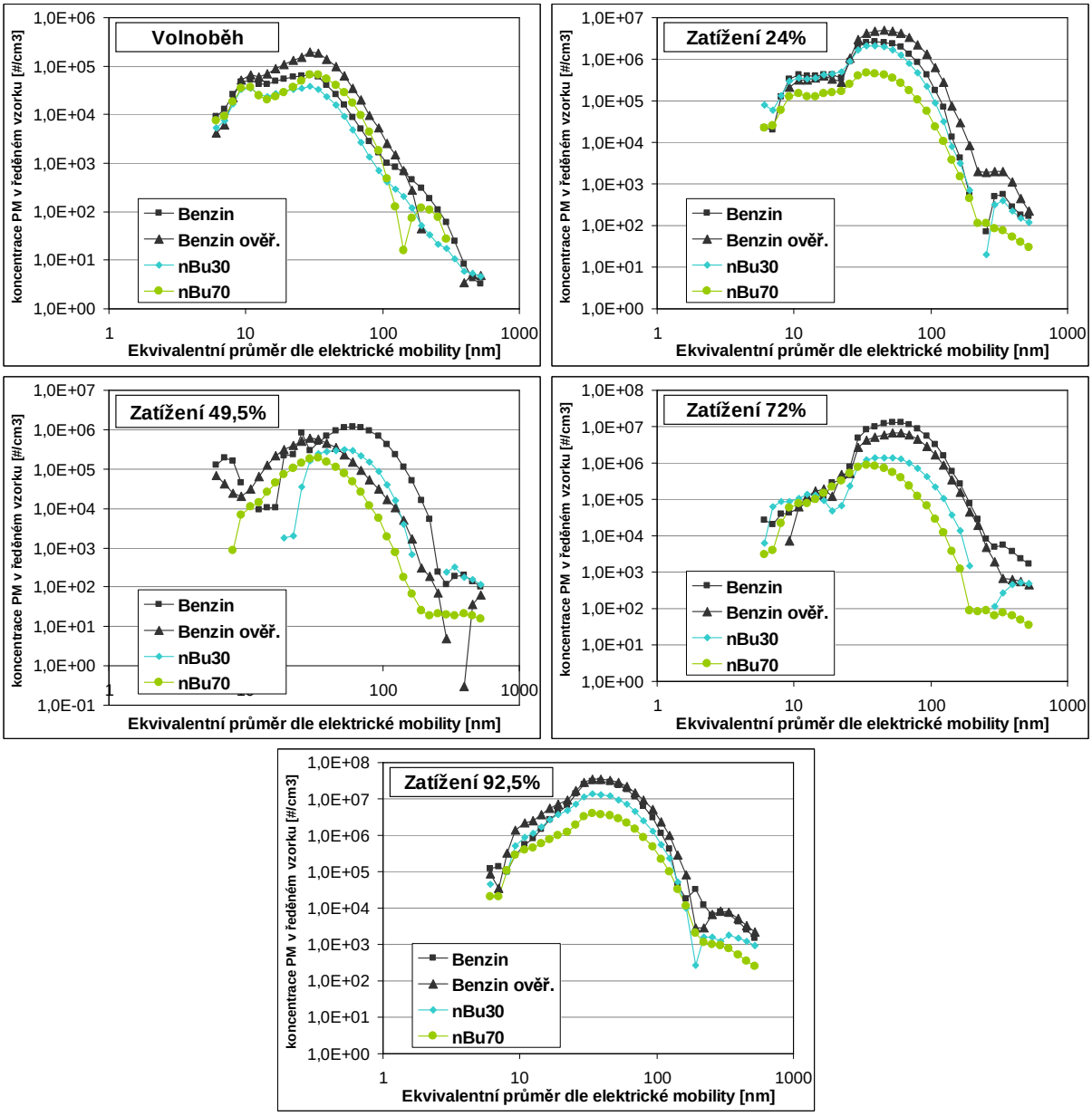
Z výsledků pak vyplývá nevysoká celková účinnost tohoto zdroje elektrické energie, přičemž případná její změna je menší nežli obecná opakovatelnost měření.



Obrázek 80: *Měrná produkce znečišťujících látek jako funkce odebíraného výkonu*

Jediným slabým náznakem změny bohatosti směsi je čtvrtinové zatížení, kde došlo k současnému velmi malému nárůstu účinnosti, provázenému citelným poklesem měrné produkce oxidu uhelnatého jakožto důsledku nižšího podílu nespáleného paliva s nárůstem koncentrace butanolu. U ostatních bodů jsou změny malé a nebo nekonzistentní.

Výrazně vyšší změny však byly zaznamenány v produkci pevných částic. Hmotnostní produkce byla přidáním alespoň 30% butanolu snížena o třetinu až polovinu. Vyšší poklesy byly zaznamenány pro počty pevných částic, kde celková koncentrace převážně klesala s koncentrací n-butanolu (vliv iso-butanolu nezjišťován, ale očekáván obdobný trend).

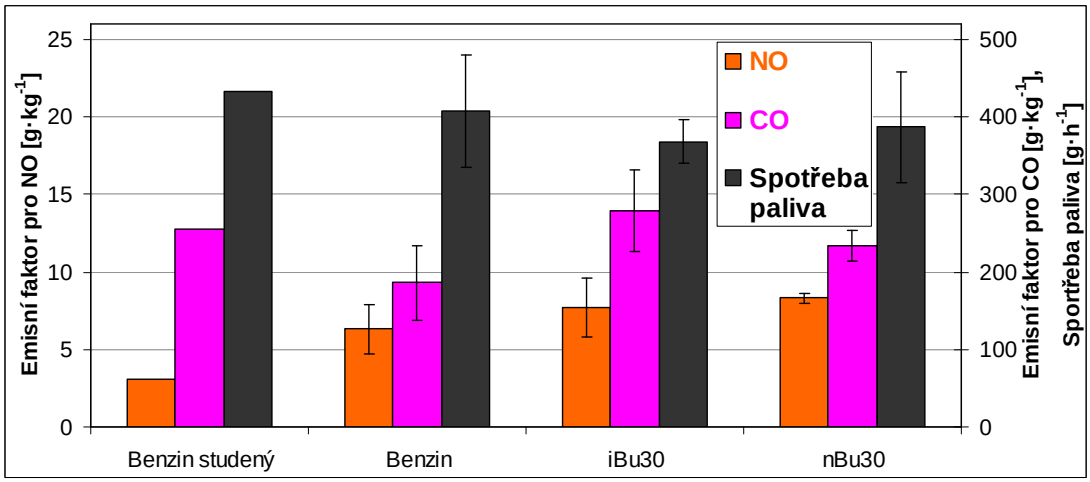


Obrázek 81: *Velikostní spektra pevných částic v závislosti na zatížení a koncentraci n-butanolu*

Jednoznačnou výhodou je tedy snížení produkce pevných částic, je-li významná část benzinu nahrazena butanolem, avšak daní za to je jednak možný nárůst produkce aldehydů a u směsí s alespoň polovičním podílem butanolu i zhoršená strartovatelnost studeného motoru.

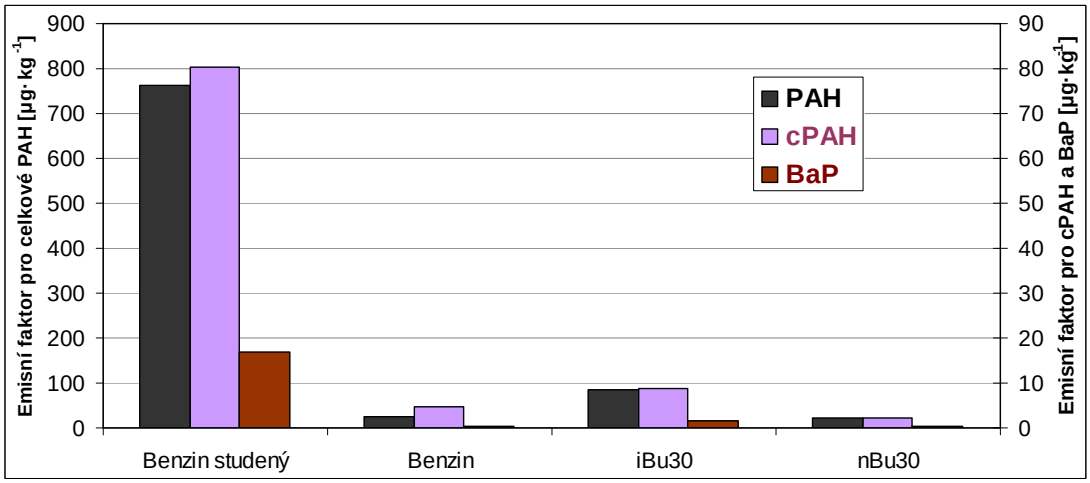
11.3 Použití benzin-butanolových směsí v zahradní sekačce trávy

Dále byl experimentálně ověřován provoz neupraveného čtyřdobého motoru v běžné sekačce. Testům podrobená sekačka byla Wolf Garden modelový rok 2012, vybavená motorem Briggs and Stratton 09P7 o zdvihovém objemu 0,140 dm^3 (vrtání 63,4 mm, zdvih 44,45 mm) bez dodatečné úpravy výfukových plynů.
Sekačka byla provozována na rovinatém pozemku s homogenní hustotou a vzrůstem trávníku. Vlastní sekání se sestávalo ze čtyř na sebe navazujících průjezdů sousedních pásů trávníku o délce přibližně 45 m. Pro každé zkoušené palivo, s výjimkou provozu s neprohřátým motorem na benzin, byly provedeny čtyři sady průjezdů, čímž byl zajištěn dostatek dat k vyhodnocení opakovatelnosti postupu. Kromě toho byly pro jednotlivé sady jízd vzorkovány pevné částice, což umožnilo analýzu množství polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU), nicméně vzhledem k nízkému navzorkovanému množství částic bylo nutné jednotlivé filtry sloučit a k dispozici je tak pouze jeden údaj pro jedno palivo.
Z porovnání produkce běžně sledovaných plynných znečišťujících látek nevyplývá velký rozdíl mezi sekáním po studeném startu a s ohřátým motorem, byť po startu se zdá směs o něco bohatší. Ani při použití 30 % butanolu nedošlo vzhledem k opakovatelnosti k výrazným odchylkám, avšak data naznačují lehký nárůst produkce CO a NO.



Obrázek 82: *Porovnání běžných plynných znečišťujících látek a spotřeby paliva*

Diametrálně odlišná situace nastává pro polycyklické aromatické uhlovodíky, kdy je jejich produkce ve všech kategoriích dvacetkrát až padesátkrát vyšší, nežli pro ohřátý motor. Toto nemusí být způsobeno pouze nižšími teplotami spalovacího prostoru, ale svoji roli pravděpodobně sehrálo i výraznější obohacení pro zajištění startu a provozu studeného motoru.



Obrázek 83: *Porovnání produkce celkových PAH, karcinogenních PAH dle EPA a benzo(a)pyrenu*

11.4 Butanol v malém čtyřdobém motoru pro křovinořez

Dále byl zkoušen malý motor, určený k pohonu strunových sekaček a křovinořezů Honda GX-35, jehož základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce 13.

Tabulka 13: *Základní parametry použitého čtyřdobého motoru pro křovinořez*

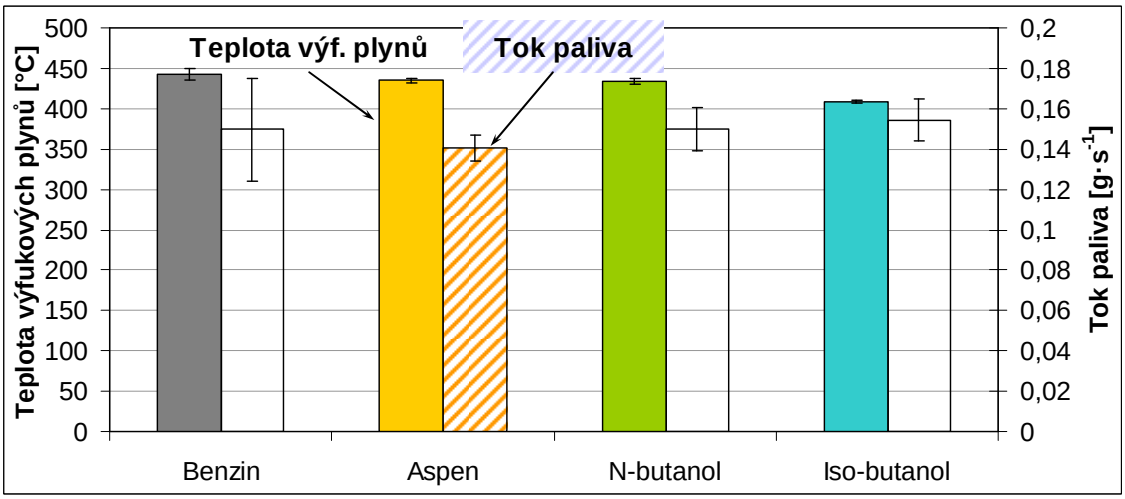
Označení motoru	Honda GX35
Počet válců	1
Zdvihový objem [dm^3]	0,0358
Vrtání [mm]	39
Zdvih [mm]	30
Kompresní pomer [-]	8,0
Druh rozvodu	OHC
Katalytický reaktor	Ne
Tvorba směsi	Membránový karburátor

Vlastní zkoušky byly prováděny dle homologační procedury 8178 G3, která se sestává z třikrát opakované posloupnosti režimu jmenovitého výkonu (na základě údajů dodaných výrobcem) a volnoběhu. V průběhu experimentů byly, kromě koncentrací sledovaných složek ve výfukových plynech, sledovány i další veličiny, konkrétně okamžitá spotřeba paliva a teplota výfukových plynů. Měřené veličiny byly průměrovány pro každý provozní režim z jeho poslední minuty. Chybové úsečky pak ukazují střední směrodatnou odchylku prezentované veličiny z jednotlivých opakování daného provozního režimu, přičemž celý testovací cyklus byl pro každé palivo několikrát opakován. Zkoušen byl jak běžný benzin, jakožto referenční palivo, tak alkylátové palivo ([51], dále označován jako Aspen) a dále pak samozřejmě oba izomery butanolu.
Základní parametry této alternativy k benzinu pro malé motory, která by podle údajů výrobce měla vyznačovat výrazně menší produkcí rizikových uhlovodíků, shrnuje tabulka 14:

Tabulka 14: *Základní vlastnosti alkylátového paliva [51]*

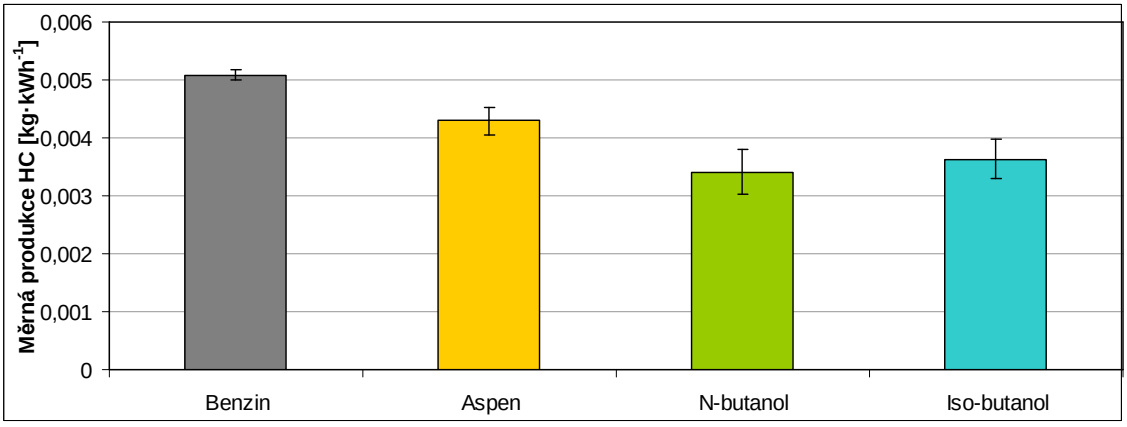
Oktanové číslo VM	95
Oktanové číslo MM	92
Tlak par [kPa]	55−65
Obsah aromatických uhlovodíků [%]	0,1
Obsah benzenu [%]	0,01
Obsah olefínů [%]	0,1
Hm. obsah C [%]	81,8
Hm. obsah H [%]	18,2
Hm. obsah O [%]	0,0

Aby bylo možné oddělit účinky jednotlivých směsí, byla testována pouze čistá paliva. Spalování alkylátového paliva nevyžadovalo žádnou úpravu motoru, nicméně pro spalování butanolu bylo nutné, obdobně jako v případě ostatních karburátorem osazených motorů, zaměnit odměřovací trysku jinou o větším průměru. Konkrétně bylo experimentální cestou zjištěno jako vyhovující zvětšení z 0,37 mm na 0,50 mm. Samozřejmostí byl v tomto případě nutný přídavek malého množství benzinu do sacího traktu motoru za účelem jeho nastartování.
V průběhu experimentů nebyly pozorovány změny v dostupném výkonu (data nezobrazena), dále byly při jmenovitém výkonu zaznamenány pro všechna paliva lehké a poměrně opakovatelné poklesy teplot výfukových plynů v porovnání s benzinem, nejvíce pro iso-butanol.



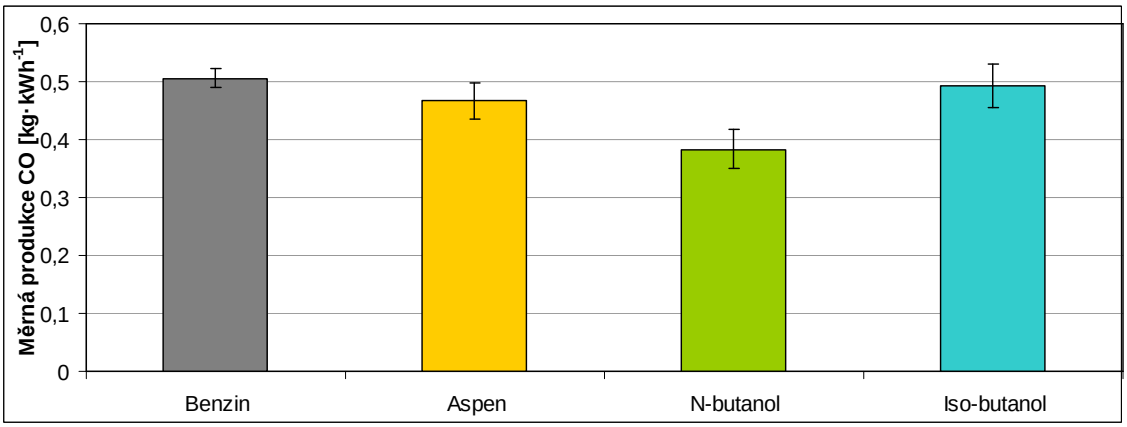
Obrázek 84: *Porovnání teploty výfukových plynů a toku paliva napříč zkoušenými palivy*

Dále byl sledován tok paliva, který sice vykázal pro oba butanoly viditelný nárůst, ale tento byl výrazně nižší nežli rozdíl ve výhřevnostech paliv. Z tohoto vyplývá zvýšená celková účinnost motoru při použití čistého butanolu.
Měrná produkce plynných znečišťujících látek pak byla stanovena z koncentrací jednotlivých sledovaných složek, respektive jejich poměru k obsahu uhlíku z paliva, spotřeby paliva a jeho vlastností a aktuálních výkonových parametrů. Celý výpočet byl navržen tak, aby při předpokládané dokonalé linearitě analyzátorů nedocházelo k ovlivnění výsledků mírným zředěním výfukových plynů, ke kterému docházelo při volnoběhu motoru vlivem nižšího průtoku nasávaného vzduchu v porovnání s použitými analyzátory složení výfukových plynů. Způsob výpočtu je naznačen v příloze I.



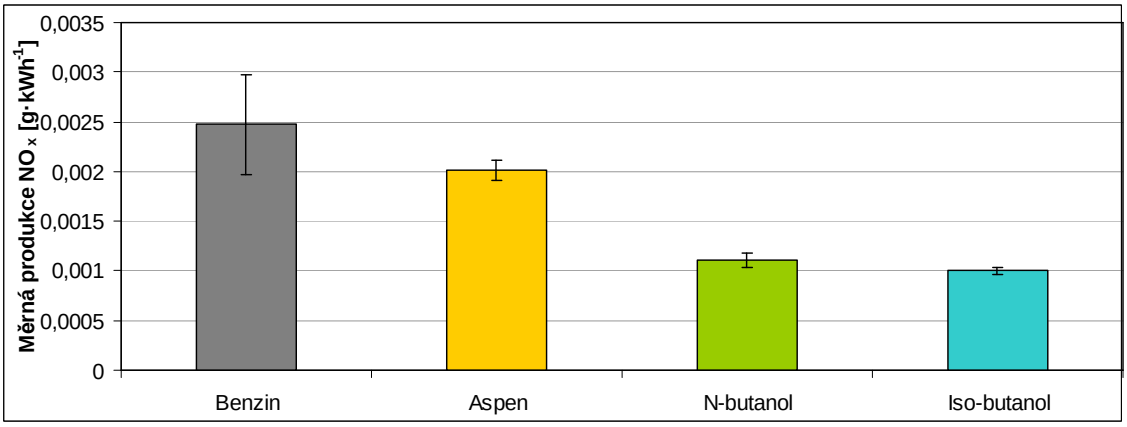
Obrázek 85: *Porovnání měrné produkce nespálených uhlovodíků napříč palivy*

Z výsledků je patrný pokles měrné produkce nespálených uhlovodíků při použití butanolu, avšak tento údaj je ovlivněn nižší odezvou FID analyzátoru na kyslíkaté uhlovodíky, která může být snížena až o 25 %. Při uvažování tohoto jevu se produkce nespálených uhlovodíků jeví jako srovnatelná s alkylátovým palivem a mírně nižší oproti benzinu.



Obrázek 86: *Porovnání měrné produkce oxidu uhelnatého napříč palivy*

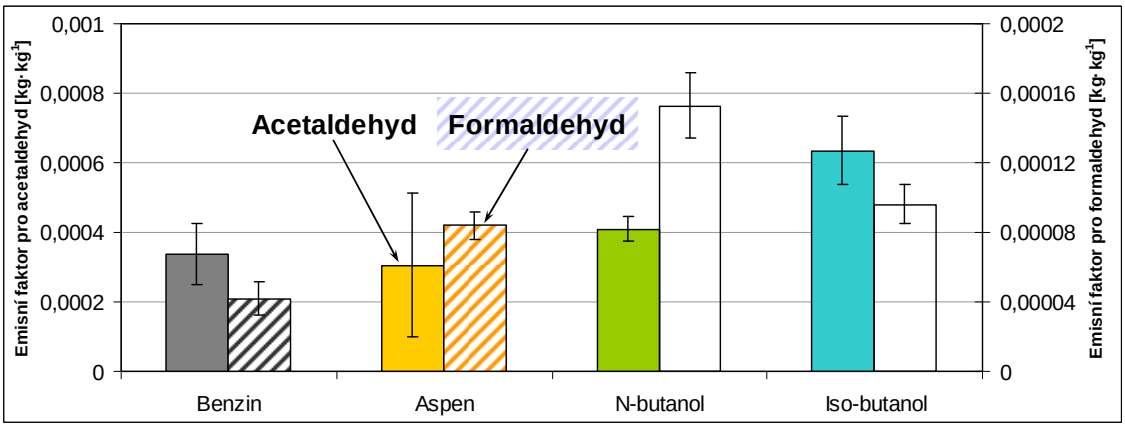
Měrná produkce oxidu uhelnatého pak nedoznala přílišných změn, pouze u n-butanolu byla zaznamenatelně nižší. Oproti tomu u oxidů dusíku byly zaznamenány značné rozdíly mezi palivy. Nejvyšší produkce byla zaznamenána pro benzin, o něco nižší pro alkylátové palivo a nejnižší a prakticky shodná pro oba dva butanoly.



Obrázek 87: *Porovnání měrné produkce oxidů dusíku pro různá paliva*

Protože je při praktickém použití těchto motorů obtížné stanovit množství vyprodukované práce, je vhodné vztáhnout měrnou produkce sledovaných látek na množství spotřebovaného paliva, jak je provedeno v grafech v příloze J.

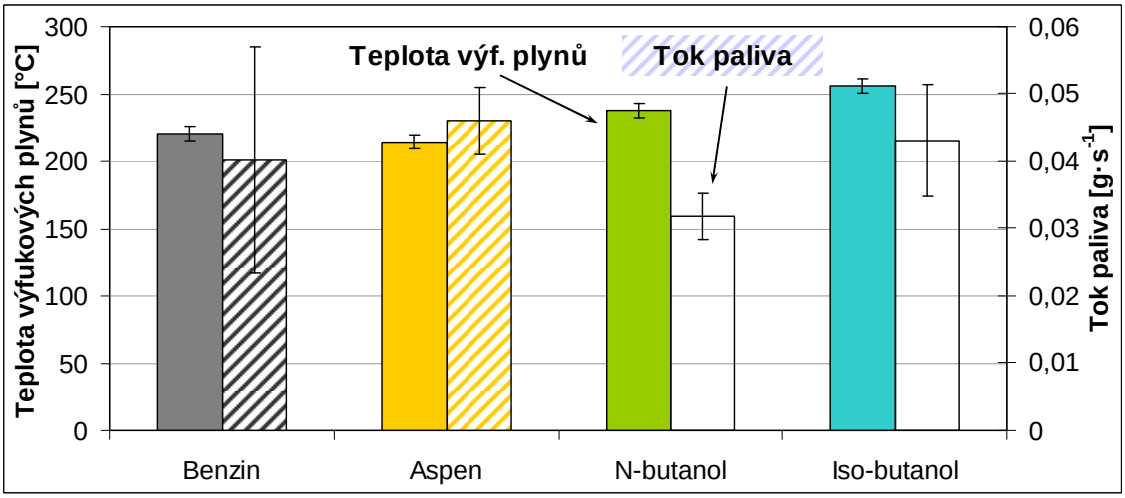
Kromě běžně sledovaných plynných znečišťujících látek byly pomocí infračerveného analyzátoru s fourierovou transformací (MIDAC I1801-E, optická délka 5,5 m, rozlišení 0,5 cm^{-1}) sledovány rovněž koncentrace aldehydů, konkrétně acetaldehydu a formaldehydu. Měrné produkce jsou představeny na obr. 88 (pouze emisní faktory vztažené na jednotku paliva).



Obrázek 88: *Měrná produkce sledovaných aldehydů vztažená na množství spotřebovaného paliva*

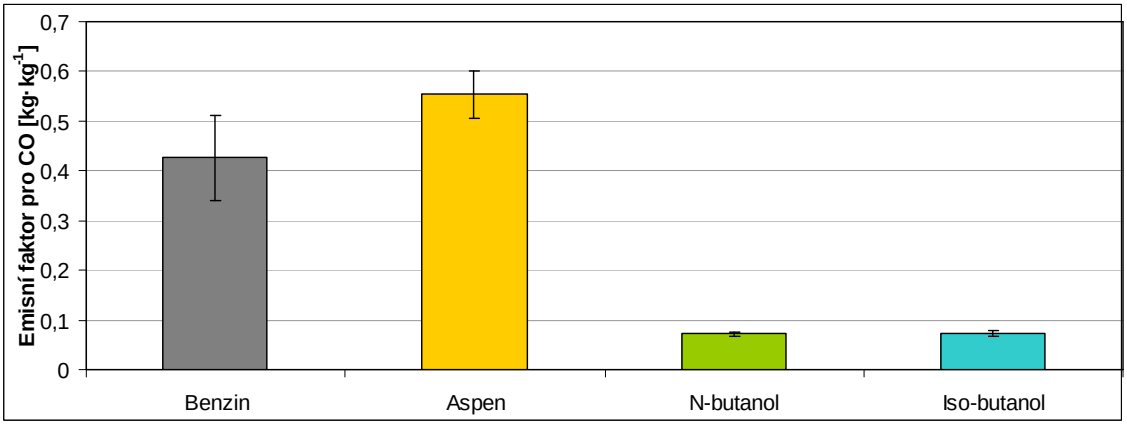
Zde byly pozorovány výrazné rozdíly mezi jednotlivými palivy, kde produkce aldehydů byla pro alkoholová paliva až dvojnásobná. Bez zajímavosti není také porovnání benzinu a alkylátového paliva, kde se zdá být produkce srovnatelná s benzinem a zatížena špatnou opakovatelností. U alkylátového paliva byla ve všech případech zjištěna několikanásobně vyšší koncentrace acetaldehydu při prvním režimu jmenovitého výkonu oproti ostatním. Reálný podíl ne zcela prohřátého motoru je nižší, proto lze uvažovat produkci acetaldehydu rovněž nižší (celkově s přehledem nejnižší z porovnávaných paliv).

Za volnoběhu byl u obou alkoholů zjištěn mírný nárůst teploty výfukových plynů. Dále je i přes nízkou opakovatelnost toku paliva patrné, že nedošlo ke zvýšení množství dodávané energie v palivu, což naznačuje zvýšenou účinnost přeměny chemické energie v mechanickou práci při volnoběhu.



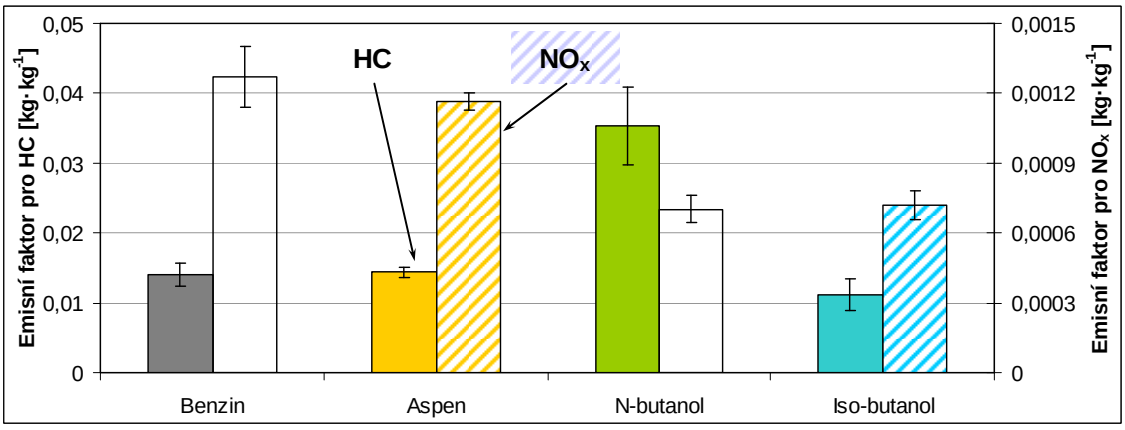
Obrázek 89: *Porovnání teploty výfukových plynů (vlevo) a toku paliva (vpravo)*

Z důvodu přítomnosti odstředivé spojky nicméně nebylo možné tuto hypotézu potvrdit přímo porovnáním otáček při použití jednotlivých paliv. Nicméně díky výrazně nižší koncentraci oxidu uhelnatého lze usuzovat na kompletnější spalování v případě obou butanolů.



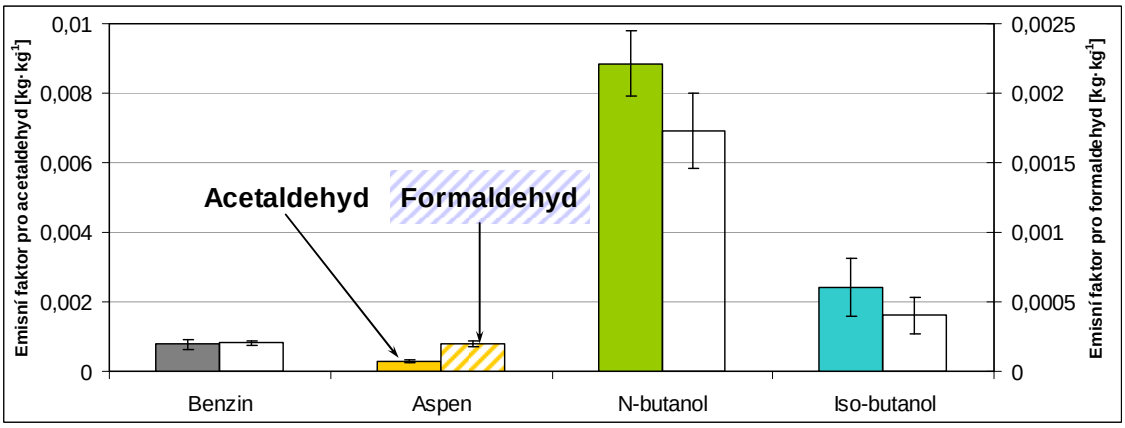
Obrázek 90: *Porovnání produkce oxidu uhelnatého z jednoho kilogramu paliva*

Bez zajímavosti dále nejsou ani koncentrace nespálených uhlovodíků, které byly výrazně vyšší pro n-butanol v porovnání se srovnatelnými hodnotami pro ostatní paliva. Překvapivě však byla zaznamenána nižší produkce oxidů dusíku.



Obrázek 91: *Porovnání nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku pro jednotlivá paliva*

Pro aldehydy byly, kromě alkylátového paliva, zjištěny obdobné poměry acetaldehydu a formaldehydu. Téměř řádový nárůst byl zjištěn pro n-butanol, iso-butanol byl přibližně dvojnásobný. U alkylátového paliva byl detekován výrazný relativní pokles produkce acetaldehydu.



Obrázek 92: *Porovnání produkce aldehydů napříč palivy na jednotku spotřebovaného paliva*

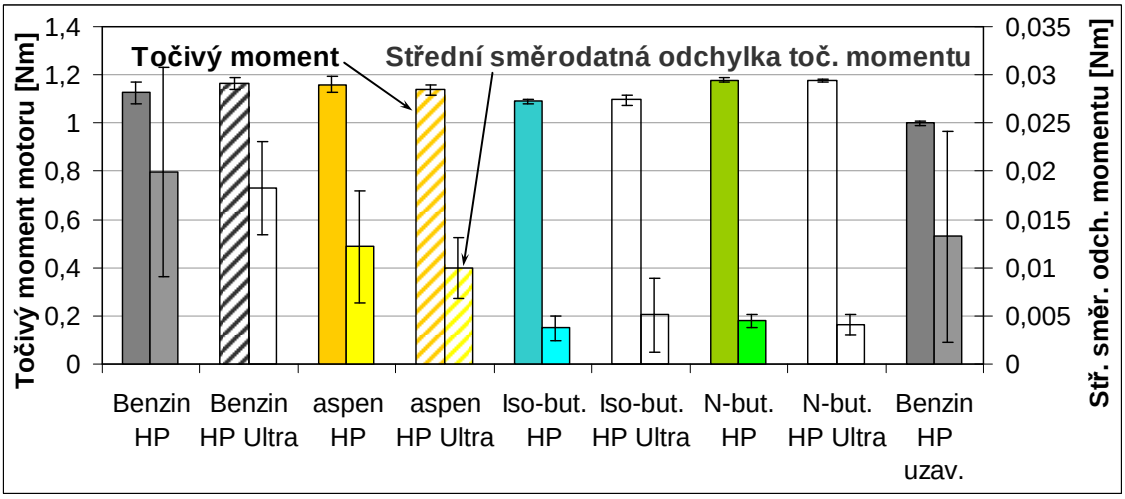
11.5 Butanol v malém dvoudobém motoru pro křovinořez

Posledním zkoušeným malým motorem a zároveň jediným dvoudobým motorem byl EMAK z produktové řady Multimate, který je v rámci modulárního systému využíván pro pohon různé drobné nesené mechanizace a jehož základní parametry jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15: *Základních parametry zkoušeného dvoudobého motoru*

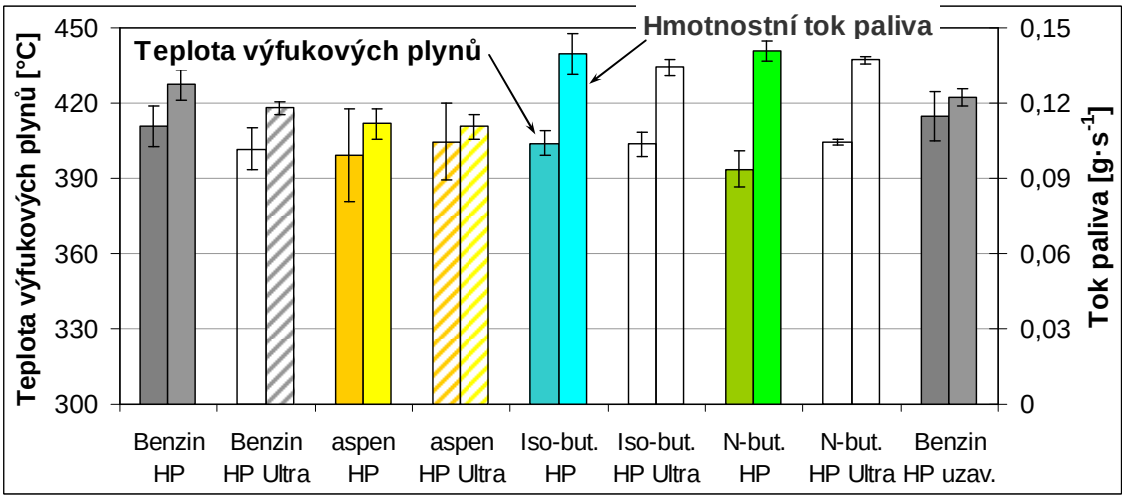
Označení motoru	Emak e1*97/68sh2-iia*2004/26*04729*00
Počet válců	1
Zdvihový objem [dm^3]	0,0305
Vrtání [mm]	36
Zdvih [mm]	30
Jmenovitý výkon [kW]	0,8
Tvorba směsi	Membránový karburátor
Katalytický reaktor	Ano
Způsob chlazení	Vzduchové, nucené proudění

Narozdíl od všech ostatních zkoušených malých motorů je tento vybaven karburátorem, kde je průtok paliva nastavován pomocí dvou jehlových ventilů. Přestože se nastavení průtoků přes oba ventily (pro volnoběh a plně otevřenou klapku) vzájemně ovlivňuje, bylo přizpůsobení motoru pro provoz na oba alkoholy při využití průběžně měřených koncentrací produktů spalování, zejména CO, poměrně snadné.
Zároveň se však, díky značnému objemu v klikové skříni, stala startovatelnost motoru i při aplikaci benzinu do sacího traktu značně obtížnou. Bez vyřešení této obtíže není možné butanol aplikovat při jeho běžném provozu ve větších koncentracích.
Pro úspěšný provoz motoru bylo dále výrobcem předepsána aplikace oleje pro dvoudobé motory v objemovém poměru 1:50. V rámci porovnání byl motor, z důvodu vyhodnocení dopadu na produkci znečišťujících látek, provozován na směsi olejů Stihl HP a Stihl HP Ultra v kombinaci se všemi palivy. Postup testu byl jinak shodný se čtyřdobým motorem Honda GX-35.



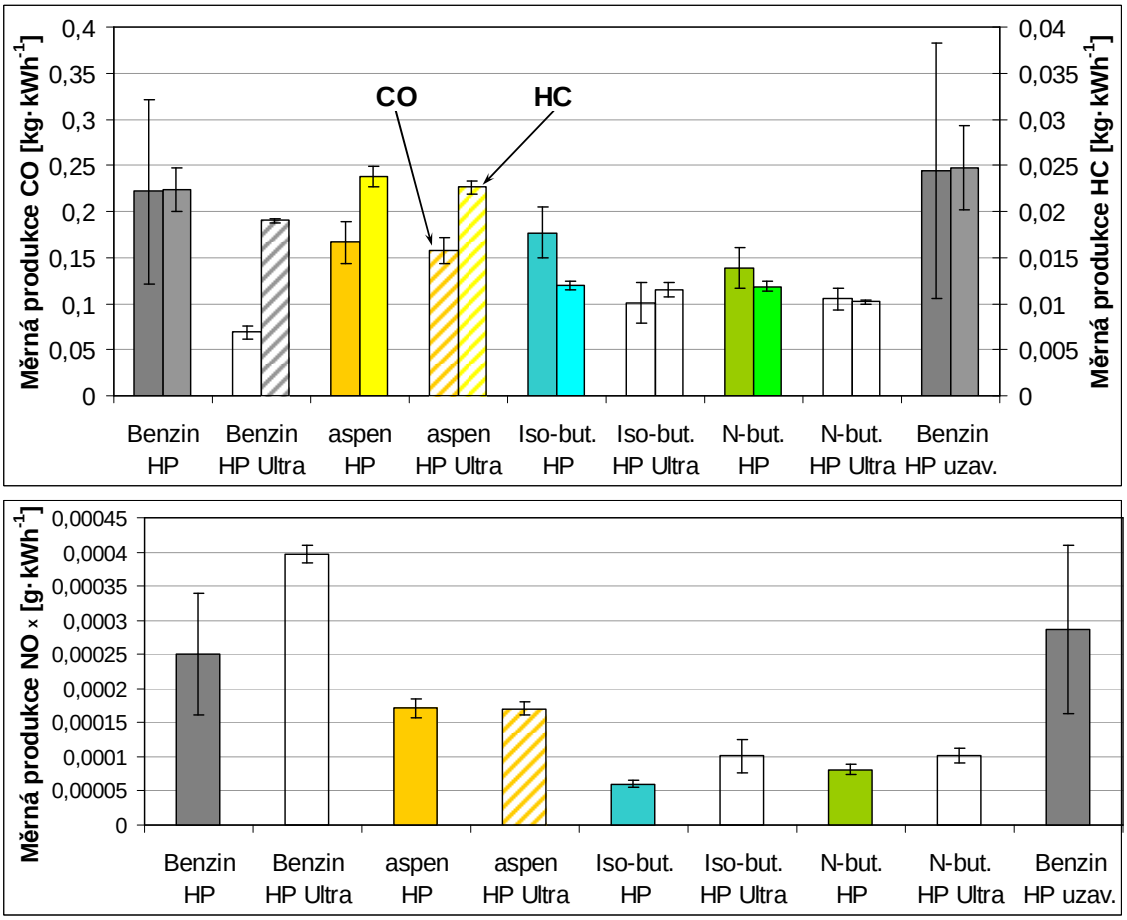
Obrázek 93: *Točivý moment a jeho střední směrodatná odchylka*

Z výsledků nelze dovodit dopad použitého paliva na změnu točivého momentu, protože odchylky jsou relativně malé a navíc nižší než při porovnání s kontrolním provozem na benzin v závěru experimentální kampaně. Avšak ze zjištěných průběhů točivého momentu v průběhu minutového průměrovacího intervalu lze jasně vyčíst nižší variabilitu točivého momentu motoru. Toto je s největší pravděpodobností způsobeno nižší variabilitou spalování, pokud je použito alkylátového paliva či výrazněji při použití libovolného z butanolů.



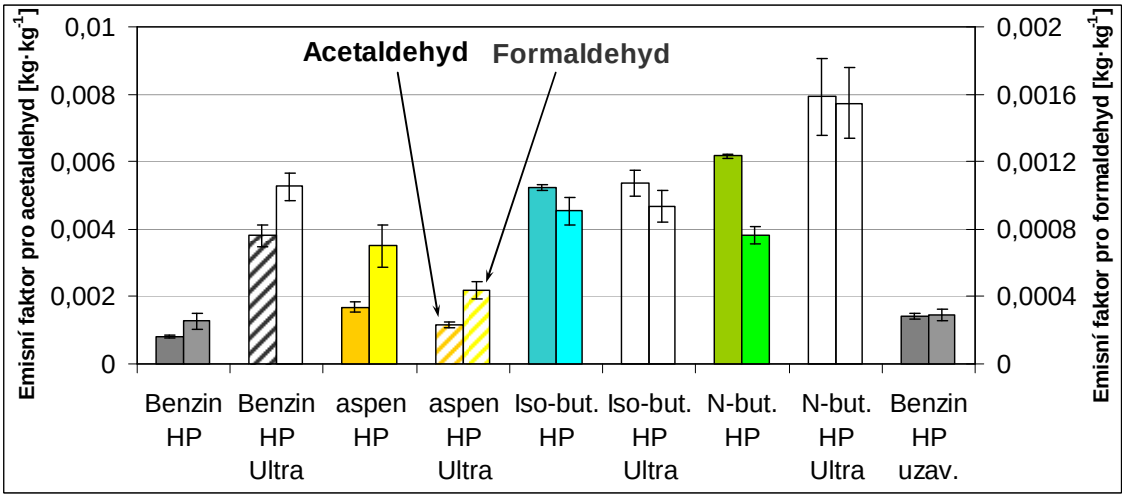
Obrázek 94: *Porovnání teplot výfukových plynů a toku paliva*

Dále došlo k malému poklesu teplot výfukových plynů při použití alkylátového paliva i obou butanolů. Vliv použitého oleje je malý a nejednoznačný. Zároveň byl pozorován nárůst hmotnostního toku paliva v případě použití libovolného izomeru butanolu, avšak míra změny neodpovídá odchylce výhřevnosti butanolu. Z tohoto jednoznačně vyplývá nárůst účinnosti zkoušeného motoru. Není bez zajímavosti, že pro dvoudobý motor se celková účinnost za jmenovitého výkonu pohybovala od cca 16 % při použití benzinu po 18 % při využití butanolu, zatímco pro předchozí čtyřdobý motor Honda GX-35 ležela v rozmezí přibližně 13,5 až 15 %.



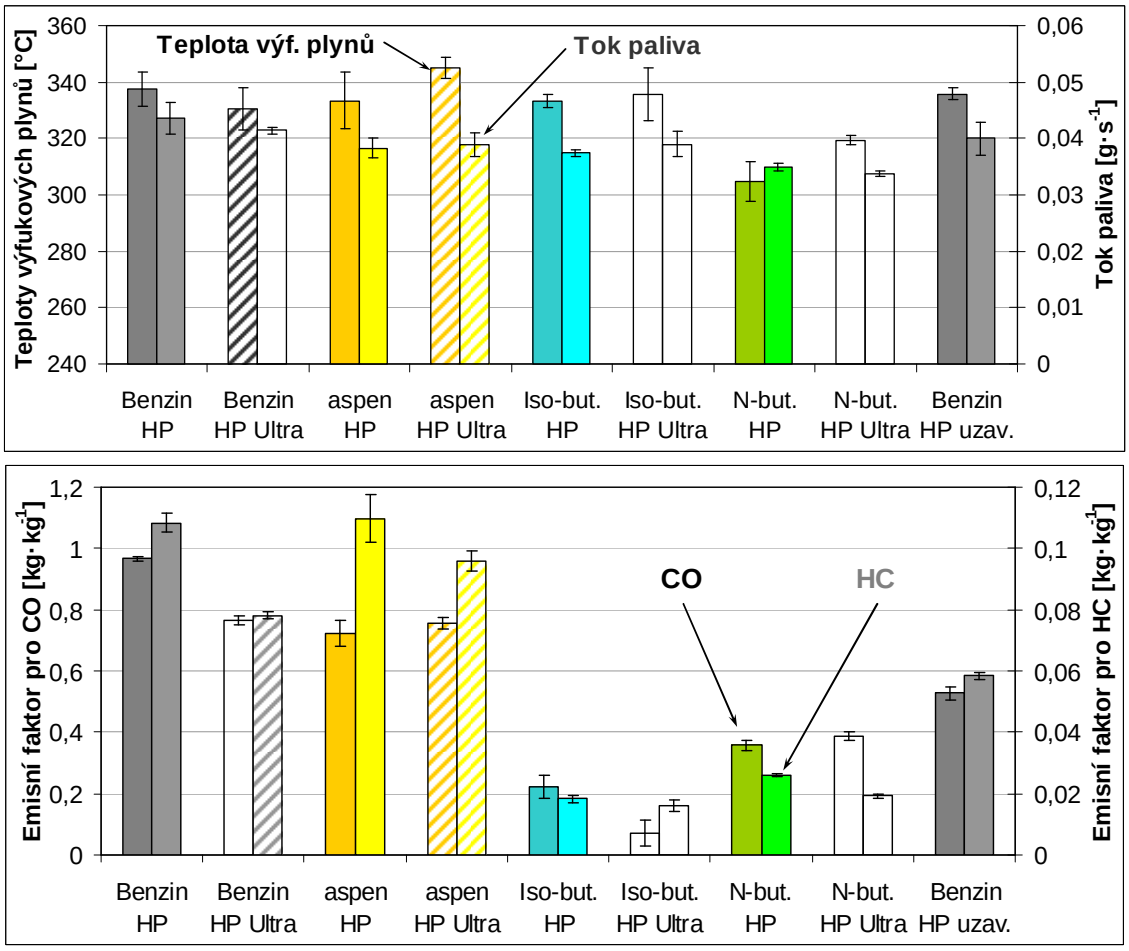
Obrázek 95: *Měrná produkce plynných znečišťujících látek*

Rovněž v tomto případě došlo, vlivem použití butanolu, k citelnému poklesu produkce oxidů dusíku za srovnatelného množství produkovaného oxidu uhelnatého.
Z důvodu ochrany FTIR analyzátoru bylo nutné vzorkovat výfukové plyny zředěné pomocí plnoprůtočného ředicího tunelu (popsán v kapitole 11.2). V důsledku tohoto byly měřeny přibližně desetinové koncentrace sledovaných látek, v důsledku čehož nebylo zaručena detekce aldehydů pod 0,002 $kg \cdot kg^{-1}$ a problematická pod 0,001 $kg \cdot kg^{-1}$. Z výsledků je patrné, že vliv použitého oleje byl patrný pouze pro benzin a v menší míře pro n-butanol a alkylátové palivo. Pro alkylátové palivo byl zjištěn nárůst produkce aldehydů, pokud byl použit běžnější olej Stihl HP, ale díky vyšším výchozí hodnotám pro benzin pokles u oleje Stihl HP Ultra. U iso-butanolu byly produkce zhruba pětkrát vyšší, nebo srovnatelné dle použitého oleje, nicméně n-butanol vykazoval vždy nárůst a to pětinásobný a dvojnásobný. Porovnáním hodnot z úvodního a závěrečného provozu na benzin a olej HP lze usuzovat na dobrou opakovatelnost produkce aldehydů. Dále zůstal zachován poměr acetaldehydu a formaldehydu velmi přibližně 5:1, a to s výjimkou alkylátového paliva, které vykazovalo produkci zhruba dvojnásobného množství formaldehydu na stejné množství acetaldehydu v porovnání s ostatními palivy.



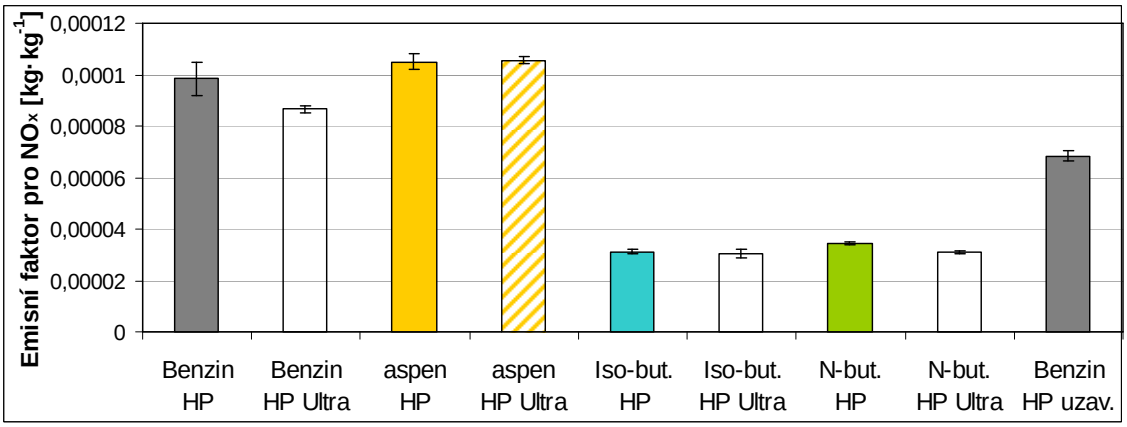
Obrázek 96: *Porovnání produkce aldehydů napříč palivy*

Pro volnoběhy byly opět porovnávány teploty výfukových plynů a hmotnostní tok paliva. Patrné je pouze mírné snížení pro teplot n-butanol bez převládajícího vlivu použitého oleje. Tok paliva doznal pokles pro alkylátové palivo a u butanolů návrat na hodnoty lehce nad výchozím průtokem pro benzin, což opět ukazuje na nárůst účinnosti konverze tepla přivedeného v palivu na mechanickou práci je-li použit butanol.



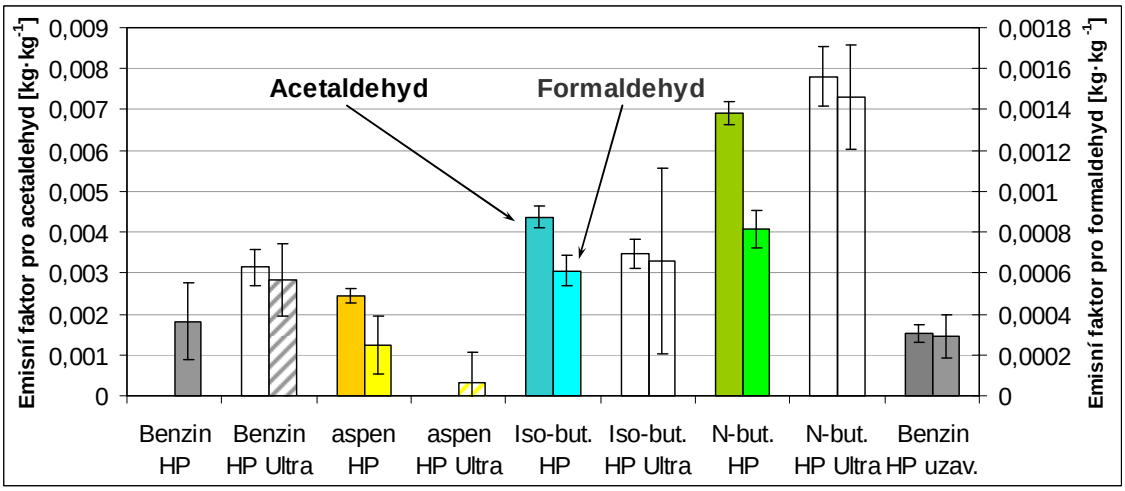
Obrázek 97: *Porovnání teplot výfukových plynů, toku paliva a emisních faktorů pro HC a CO*

Vliv použitého oleje na produkci oxidu uhelnatého je nejednoznačný, avšak pro paliva s výjimkou iso-butanolu byl zaznamenán mírný pokles produkce nespálených uhlovodíků při nasazení oleje HP Ultra. U obou uvedených látek, spojených s nedokonalým spalováním byla zaznamenána výrazně nižší produkce, ukazující na vyšší stupeň vyhoření paliva. Zároveň došlo i k redukci produkce oxidů dusíku, pokud byl použit butanol, přičemž vliv oleje je zanedbatelný.



Obrázek 98: *Porovnání měrné produkce oxidů dusíku pro různá paliva a oba oleje*

Poněkud zajímavější je situace u aldehydů, kde pro benzin a n-butanol vyústilo použití oleje HP Ultra v lehký nárůst produkce, zatímco efekt pro iso-butanol byl nejednoznačný a pro alkylátové palivo dokonce opačný.



Obrázek 99: *Porovnání produkce aldehydů v závislosti na použitém palivu a oleji*

Výsledky spalování butanolů a jejich směsí s benzinem ukazují jednak možnost úspěšného využití tohoto alkoholového paliva i ve vyšších koncentracích s pozitivním dopadem na produkci pevných částic, zejména co se týče jejich počtu. V některých případech došlo k zaznamenatelnému poklesu variability spalovacího procesu a nárůstu chemické účinnosti. Toto vše však bylo vykoupenou výrazným nárůstem produkce aldehydů a zhoršenou startovatelností při vyšších podílech butanolu ve směsi. V případě dvoudobého motoru bylo zhoršení startovatelnosti takové, že lze vyvodit praktickou nepoužitelnost směsí obsahujících nadpoloviční množství libovolného izomeru butanolu bez patřičných opatření.

11.6 Stručný souhrn poznatků získaných v průběhu experimentů na malých motorech

Celkově bylo dosaženo možného provozu malých motorů na benzin-butanolové směsi dosaženo pro nízké koncentrace butanolu bez jejich úpravy a pro vysoké koncentrace po záměně hlavní trysky karburátoru či jeho přeseřízení, kde bylo možné. Celkově pak při zachování téměř nezměněné bohatosti směsi byly pro běžné plynné znečišťující látky zjištěny srovnatelné hodnoty či poklesy s náhradou benzinu butanolem. U aldehydů, kde byly vyšetřovány, nastaly několikanásobné ale nikoliv řádové nárůsty byl-li benzin nahrazen butanolem. Pro pevné částice byly prokázány vyšší či nižší poklesy produkce jak pro hmotnostní (PM), tak početní produkci (PN). Daní za to však byla zhoršená startovatelnost studeného motoru při vysokých koncentracích butanolu, která však díky používanému obohacení byla pro čtyřdobé motory méně zhoršena než pro vozidlové motory. U dvoudobých motorů lze pak právě kvůli obtížně překonatelným problémům se startovatelností očekávat jen velmi obtížně nasazení butanolu ve velkých koncentracích bez příslušných konstrukčních úprav.

12 Teoretický rozbor možností řešení výrazně zhoršené startovatelnosti neprohřátých motorů

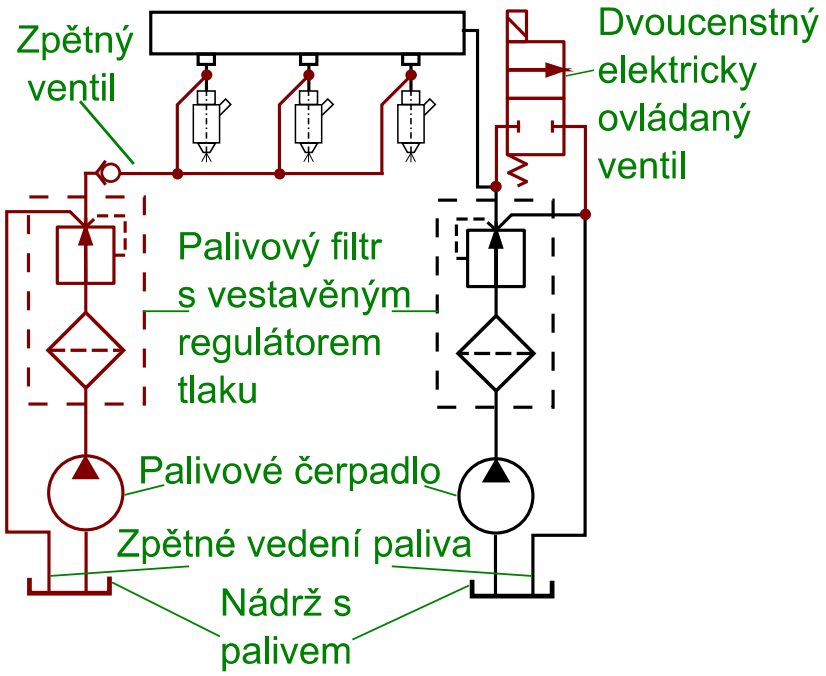
V důsledku odlišných charakteristik odparu směsí s butanolem (tlak nasycených par paliva a destilační křivka) docházelo v závislosti na technologii přípravy náplně válce, míře její optimalizace a podílu butanolu ke zhoršení či znemožnění možností motor spolehlivě nastartovat. Kromě uživatelského nekomfortu a negativních dopadů na životní prostředí dochází v extrémním případě při dlouhých a mnohonásobných pokusech o start, či opakovaných studených startech, k pronikání butanolu do motorového oleje [52], čímž vyvstává i nebezpečí poškození motoru [21]. Cílem této kapitoly je přinést souhrn možných opatření k zajištění vyhovující startovatelnosti motoru se zhodnocením jejich dopadů s ohledem na konstrukční jednoduchost, bezpečný provoz a dopadů na životní prostředí.

Jak bylo dříve zmíněno, potíže se startovatelností jsou způsobeny nedostatečným odpařením paliva po kontaktu s chladnými stěnami, od kterých by se jeho část měla odpařit a zabezpečit tak v oblasti zapalovacích elektrod svíčky vytvoření zápalné směsi. Tohoto lze dosáhnout v zásadě dvěma způsoby. Prvním z nich je zajištění ohřevu samotného paliva tak, aby se jeho dostatečná část odpařila a umožnila tak následný zážeh, pomocí vyhřívané palivové soustavy či sacího kanálu. Tato úloha již byla řešena a vyřešena vyhříváním vstřikovačů pro etanol [53], nicméně z důvodu nutného vyššího příkonu za účelem dosažení vyšších teplot v případě využití butanolu a studeného katalytického reaktoru znemožňujícího účinnou eliminaci aldehydů, je praktické využití tohoto řešení problematické. Druhou potíž lze vyřešit předehřevem katalytického reaktoru, ale toto dále zvyšuje náročnost úprav motoru pro zajištění startovatelnosti.

Druhou možností je přídavek látky, kterou lze docílit výrazného zvýšení tlaku nasycených par. Například [6] ukazuje výrazný nárůst tlaku nasycených par, je-li v palivu přítomno několik málo procent metanolu. Třetí možností je použití lehké ropné frakce (výchozí surovina k výrobě benzinu typicky maximálně s šesti atomy uhlíku v molekulách, orig. light-cat naphta), kterou by bylo nahrazeno podstatné množství benzinu, za účelem zachování odezvy motoru (orig. driveabiliry) [54]. Tento postup je, kromě výše popsaného provozu motoru s neprohřátým motorem a vyplývající možné produkce aldehydů, neefektivní, protože je přídavná látka spalována v celém průběhu chodu motoru a nikoliv jen po krátký časový úsek po startu. Následkem toho může dojít k nárůstu provozních nákladů a dále je nutné zhodnotit bezpečnostní a environmentální aspekty.

Čtvrtou možností je použití vícepalivového systému. V takovém případě by bylo použito tzv. startovacího paliva, které by zajistilo chod v řádu několika málo minut a poté by došlo k přepnutí na butanol či jeho směs. Podobné konverze jsou v současnosti realizované [55], avšak z hlediska omezeného zástavbového prostoru je nesnadné umístit vstřikovače pro obě paliva tak, aby byl zajištěno správné směřování vstříknutého paliva.

Modifikací tohoto způsobu řešení je využití stávajícího palivového systému se zajištěním vstřiku startovacího paliva a umožnění naplnění prostoru zásobníku paliva a přívodu ke vstřikovačům startovacím palivem před vlastním startem motoru. U současných motorů ve vozidlových aplikacích je běžné spuštění palivového čerpadla po otevření dveří řidiče, přičemž pro napuštění startovacím palivem je možné využít právě dobu od otevření dveří řidiče po aktivaci startéru. Tento proces je navíc vhodné použít pouze při startování motoru s teplotou pod určitou mezí, kterou lze spolehlivě určit z teploty chladicí kapaliny. Dále je vhodné přivádět startovací palivo co nejblíže vstřikovačům a to tak, aby butanolové palivo bylo nahrazeno startovacím. Prosté přivádění startovacího paliva ke vstupu do tlakového zásobníku se zdá být nedostatečné. Možné řešení je znázorněno na obr. 100.



Obrázek 100: *Modifikace palivového okruhu (červeně) pro spalování obtížně odpařitelného paliva*

Vstupy startovacího paliva jsou přivedeny přímo před vstřikovače, přičemž je předpokládán alespoň částečný proplach vlastního vstřikovače startovacím palivem tak, aby již po prvních několika málo vstřicích docházelo k dávkování téměř čistého startovacího paliva.
Před vlastním startem motoru je současně aktivováno čerpadlo startovacího paliva a dvoucestný elektrický ventil. Po krátké době přibližně pěti sekund je elektrický dvoucestný ventil deaktivován, přičemž prostor těsně před vstřikovacími ventily byl zaplněn startovacím palivem namísto alkoholového a spotřeba paliva je aktuálně pokrývána z okruhu startovacího paliva. Po určité době (stanovené jako doba od startu motoru, množství vstříknutého paliva, dosažení určité teploty chladicí kapaliny či jiného kritéria) je aktivováno hlavní čerpadlo a vypnuto čerpadlo startovacího paliva. Posléze dochází ke spotřebování startovacího paliva jeho postupné náhradě palivem alkoholovým, či jeho směsí s benzinem. Možnost spalování startovacího paliva po dobu několika desítek sekund před zastavením motoru za účelem dokonalého zaplnění vstřikovačů startovacím palivem se, vzhledem k předpokládanému použití ve vozidlových motorech, jeví jako značně problematická.
Doba běhu studeného motoru na startovací palivo před jeho přepnutím na butanolovou směs byla odhadnuta na jednu minutu. Za tuto dobu by mělo dojít k dosažení provozní teploty třícestného katalyzátoru pro acetaldehyd a formaldehyd [17]. Při uvažování spotřeby paliva při provozu po startu motoru pět litrů za hodinu vychází množství paliva, nutné pro minutu běhu motoru, na necelých 0,1 l. Při výše zmíněné spotřebě na jeden studený start by přídatná nádržka o vnitřním objemu 5 l postačovala přibližně na 50 studených startů, což zaručuje pro naprostou většinu způsobu užívání vozidla nutný interval doplňování delší než nutnost doplňování hlavního paliva.
Jedinou možnou potíží je pravděpodobně přechod ze startovacího paliva na butanolovou směs, kdy lze očekávat přechod z jednoho paliva na druhé v rámci několika málo desítek sekund a řídicí jednotka musí tento přechod umožnit. Teoreticky je pak, v případě vhodné konfigurace, možné jako hlavní palivo použít jakýkoliv běžný alkohol v libovolné směsi s benzinem.
Beze zbytku nelze zodpovědět otázku použití tohoto systému v motorech s přímým vstřikem paliva. Jednak může být hraniční koncentrace butanolu, od které je nutné tuto překážku překonávat, odlišná, a to ještě v závislosti na způsobu tvorby směsi uvnitř válce. Dále se mohou charakteristiky rozpadu paprsku a odpařování paliva značně lišit, což může ústit v potřebu odlišného geometrického řešení podle koncentrace butanolu, což dále komplikuje nalezení vhodného jednoduchého řešení.

13 Zhodnocení dosažených výsledků disertační práce a doporučení směřování budoucích aktivit

V průběhu řešení disertační práce byla získána řada zajímavých a cenných poznatků, které rozšířily současné znalosti o možnostech využití butanolu jako paliva pro zážehové motory. Experimentální ověření vstřikovaného množství paliva potvrdilo s menší odchylkou předpoklad objemového dávkování paliva. Aplikací tohoto poznatku bylo možné stanovit nutné prodloužení doby aktivace vstřikovacího ventilu, pokud je benzin plně nahrazen n-butanolem či iso-butanolem, mírně nad 20 %. Pro směsi je potřebné prodloužení nižší úměrně koncentraci butanolu. Tento rozdíl oproti etanolu, kde by bylo nutné za shodných předpokladů prodloužit vstřik o více než 50 %, naznačuje vyšší pravděpodobnost správné adaptace řídicí jednotky motoru při použití vyšších podílů obou izomerů butanolu.

Experimenty zaměřené na vyšetřování průběhu hoření ukázaly tendenci k rychlejšímu postupu plamene při náhradě části benzinu butanolem v režimech nízkého zatížení. Tento efekt se silněji projevoval u n-butanolu v porovnání s iso-butanolem. Nicméně je zde přítomný vliv použitého motoru, kdy u motoru s předpokládanou nižší intenzitou rozvíření směsi byl vliv butanolu výraznější a neomezoval se na určité spektrum otáček. Oproti tomu u pokročilejšího vozidlového motoru se rozdíly projevovaly pouze v nižších otáčkách, avšak nikoliv při volnoběhu. Celkově lze vyvodit vhodnost malé úpravy předstihu zážehu v oblasti nízkých otáček a nízkých zatížení u vozidlových motorů. Výsledky rovněž naznačují převažující malé snížení teplot výfukových plynů u všech zkoušených motorů při náhradě benzinu butanolem.

Zároveň však vyvstala otázka startovatelnosti studeného motoru při použití vyšších koncentrací butanolu. Díky vysoké optimalizaci startovacího procesu u vozidlového motoru byla zhoršená startovatelnost za pokojových teplot zaznamenána již při náhradě 30 % objemu benzinu butanolem bez ohledu na použitý izomer. Dále výsledky ukazují adaptabilitu řídicí jednotky vozidlového motoru i při použití čistých isomerů butanolu, kdy za ustálených režimů byla schopna prodloužit dobu aktivace vstřikovacího ventilu k udržení nezměněné bohatosti směsi a tyto následně projektovat na režimy se záměrným obohacením. Z tohoto hlediska lze hodnotit použití butanolu při obvyklých provozních režimech jako bezpečné.

V ustálených režimech nelze zpravidla nalézt výraznější rozdíly v koncentracích sledovaných plynných znečišťujících látek, ať už u vozidlového, či zkušebního motoru. Při několika určitých kombinacích řídicí jednotky motoru, podílu butanolu ve směsi a provozního režimu na vozidlovém motoru byla zaznamenány několikanásobné nárůsty koncentrací oxidů dusíku. Detailnější rozbor odhalil pro některé koncentrace butanolu odlišné parametry oscilací bohatostí směsi kolem stechiometrického složení, které pravděpodobně zapříčinily tento nárůst. Provoz zkušebního motoru s instalovaným třísložkovým katalytickým reaktorem potvrdil jeho schopnost potlačovat v obdobné míře všechny regulované plynné znečišťující látky bez ohledu na koncentraci libovolného ze dvou zkoušených izomerů butanolu v palivu.

Při jízdních zkouškách, byť omezených na prohřátý spalovací motor, byla zjištěna vyšší tolerance přítomnosti butanolu z hlediska startovatelností motoru. U vozidel s vícebodovým vstřikem byla potvrzena špatná startovatelnost již od 30 % objemu nahrazeného butanolem. U koncentrací nepřesahujících padesát procent dle objemu nedošlo ke změnám v produkci zaznamenávaných plynných znečišťujících látek, protože nedošlo k podstatné změně distribuce četnosti bohatosti směsi. Při vyšších koncentracích butanolu u vozidla s jednobodovým vstřikem paliva byl zjištěn nestabilní průběh bohatosti směsi, což vyústilo ve vyšší rozptyl bohatosti směsi a spolu posunem směrem k chudším směsím zapříčinilo nárůst produkce oxidů dusíku.

U prvního vozidla s vícebodovým vstřikem bylo nutné při nadpolovičních podílech obou izomerů butanolu využít přídatnou jednotku k prodloužení vstřiků paliva, obdobně jako při použití směsi E85. Celkově nedošlo ke zvýšení produkce sledovaných plynných znečišťujících látek, avšak vzhledem k nízké konverzní účinnosti třísložkového katalytického reaktoru nelze tento poznatek zodpovědně vztáhnout na korektně fungující vozidla s třísložkovým katalyzátorem.

Opakování jízdních zkoušek pro nadpoloviční koncentrace obou izomerů vedlo k výraznému nárůstu produkce oxidů dusíku na aktuálně únosnou mez vlivem spalování chudé směsi při přechodových režimech. Při pomalých změnách režimu motoru bylo korektně udržováno stechometrické složení. Nicméně se lze domnívat, že použitý katalyzátor vykazoval vyšší citlivost na přechodné ochuzení v porovnání s katalyzátorem použitým na nevozidlovém zkušebním motoru.
Podstatnější změny v produkovaných znečišťujících látkách byly zaznamenány pro vozidlo vybavené motorem s přímým vstřikem paliva. Při zkoušení směsí s 25 % butanolů obou izomerů a směsi s etanolem a odpovídajícím množstvím kyslíku v palivu, tj. 15 % etanolu ve směsi, nebyly zaznamenány žádné změny ohledně startovatelnosti studeného motoru. Rovněž byl zaznamenán výrazný propad počtu produkovaných částic při použití obou izomerů butanolu ve směsích, zejména při jízdě s využitím vyšších zatížení. Pro směs s etanolem však byly zaznamenány obdobné produkce jako pro benzin.
Oxidy dusíku zaznamenaly pouze zanedbatelné rozdíly napříč směsmi s přídavkem alkoholů. I přes nemožnost porovnání celkové produkce oxidů dusíku s provozem na benzin byly jejich produkce celkově akceptovatelné.
Malé čtyřdobé motory bylo rovněž možné provozovat při využití směsí s alespoň nadpoloviční koncentrací butanolu. Úspěšný provoz byl zajištěn úpravou trysky karburátoru zvětšením jejího průtokového průřezu s cílem zachovat výchozí bohatost směsi. V případě nezměněné bohatosti směsi byly plynné znečišťující látky produkovány v nezměněné či menší míře. Oproti tomu byl zaznamenán výrazný propad hmotnosti i počtu pevných částic s narůstající koncentrací butanolu. U těchto jednoduchých motorů, s obecně horším spalováním, pak byl k zajištění nastartování motoru použit vstřik benzinu do sacího traktu.
Dále byly v práci rozebrány a z několika hledisek porovnány možnosti řešení problematické startovatelnosti studeného motoru. Jako nejvýhodnější se jeví systém, který zajišťuje nahrazení paliva s vysokým obsahem butanolu palivem startovacím v prostoru vstřikovačů a v tlakovém zásobníku paliva. Po nastartování by bylo startovací palivo postupně spotřebováno a nahrazeno čistým butanolem, případně alkoholem či jejich směsí.
Tento přístup však nebyl v průběhu řešení disertační práce řešen a zůstává tak na řešitelích následujících prací a výzkumných projektů. Rovněž přizpůsobení řídicí jednotky tak, aby očekávala změnu potřebných délek vstřiků při spotřebovávání startovacího paliva, je nutné zajistit nebo alespoň ověřit a zůstává dalším otevřeným úkolem do budoucna. Posledním větším zbývajícím úkolem pro zajištění bezproblémového provozu zážehových motorů na biobutanolová paliva, při vysoké koncentraci butanolu, je spolehlivé potlačení ochuzení při přechodových režimech úpravou řídicí jednotky motoru či použitím jednotky přídatné.

Seznam použité literatury

[1] JANOŠKOVÁ, Lenka: Možnosti fermentační výroby butanolu jako suroviny pro motorová paliva - úvodní studie. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2008.

[2] DÜRRE, Peter a BAHL, Hubert, Microbial Production of Aceton/Butanol/Isoropanol. Biotechnology: a multi volume comprehensive treatise, edited by Ehm, H., J., VCH Weinheim, 1996, ISBN 3-572-28310-2.

[3] TAO, Ling, TAN, Eric C. D., McCORMICK, Robert, ZHANG, Min, ADEN, Andy, HE, Xin a ZIGLER, Bradley T.: Techno‐economic analysis and life‐cycle assessment of cellulosic isobutanol and comparison with cellulosic ethanol and n‐butanol - Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Vol. 8, p. 30-48 2014. doi: 10.1002/bbb.1431

[4] National Institute of Standards and Technology (NIST): Gaithersburg, MD, http://webbook.nist.gov (zobrazeno 30. 10. 2016).

[5] DRÁB, Ondřej, BEROUN, Stanislav a HOŠEK, Martin: Liquid lpg injection - modern way of fuel mixture formation for spark ignition engines. 9th International Symposium, 14. - 17. 6. 2010, Tatranské Matliare. ISBN 978-80-969710-5-3.

[6] ANDERSEN, Vibeke Friis a kol.: Vapor Pressures of Alcohol-Gasoline Blends, Energy Fuels, 2010,Vol. 24,3647–3654, DOI:10.1021/ef100254w

[7] MUŽÍKOVÁ, Zlata, BAROŠ, Petr, POSPÍŠIL, Milan a ŠEBOR, Gustav: Vapour Pressure and Oxidation Stability of Butanol-Gasoline Blends, pages 717 – 722, Vol. 107, 2013, Chemické listy.

[8] MATĚJOVSKÝ, Vladimír: Automobilová paliva, Grada Publishing, 2005. ISBN 80-247-0350-5.

[9] MALIJEFSKÝ, Anatol, NOVÁK, Josef P.,LABÍK, Stanislav a MALIJEVSKÁ, Ivona: Breviář fyzikální chemie, VŠCHT v Praze, 2001. dostupné on-line, zobrazeno 31.10.2016: http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/BREVALL.pdf

[10] 1-Butanol as a Gasoline Blending Bio-component, BP, March 28, 2007, Mobile Sources, Technical Review Subcommittee, http://nsdi.epa.gov/air/caaac/mstrs/March2007/Wolf.pdf

[11] PATÁKOVÁ Petra a kol.: Možnosti produkce a využití biobutanolu v podmínkách ČR, Chemagazín, Číslo 5, Ročník XX (2010)

[12] United Laboratories, Guidance on Use of Isobutanol-Gasoline Blends. dostupné on-line, zobrazeno 31. 10. 2016: http://industries.ul.com/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/Isobutanol.pdf

[13] SZWAJA, Stanislaw a NABER, Jeffrey D.: Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine. Fuel, Volume 89, Issue 7, Pages 1573-1582. 2010.

[14] GU, Xiaolei, HUANG, Zuohua, CAI, Jian, GONG, Jing a LEE, Chia-fon: Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR. Fuel, 2012, 93: 611-617.

[15] DERNOTTE, Jeremie, MOUNAIM-ROUSSELLE, Christine, HALTER, Fabian a SEERS, Patrice: Evaluation of butanol-gasoline blends in a port fuel-injection, spark-ignition engine. Oil Gas Sci Technol – Rev IFP 2010;65:345–51.

[16] WIGG, Benjamin, COVERDILL, Robert, LEE, Chia-fon, a KYRITSIS, Dimitrios: Emissions Characteristics of Neat Butanol Fuel Using a Port Fuel-Injected, Spark-Ignition Engine. SAE Technical Paper 2011-01-0902, 2011 doi. 10.4271/2011-01-0902

[17] WALLNER, Thomas, SHIDORE, Neeraj and ICKES, Andrew: Impact of ethanol and butanolas oxygenates on SIDI engine efficiency and emissions using steady-state and transient test procedures, 16th Directions in Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference.Detroit, Michigan September 27-30, 2010.

[18] ALEIFERIS, Pavlos G. a van ROMUNDE, Zane R., An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. Fuel, Vol. 105, p. 143-168, 2013, doi:10.1016/j.fuel.2012.07.044.

[19] MEROLA, Simona Silvia, TORNATORE, Cinzia, VALENTINO, Gerardo, MARCHITTO, Luca a CORCIONE, Felice Esposito: Optical Investigation of the Effect on the Combustion Process of Butanol-Gasoline Blend in a PFI SI Boosted Engine. SAE Technical Paper 2011-24-0057, 2011.
[20] TORNATORE, Cinzia, MARCHITTO, Luca, VALENTINO, Gerardo, CORCIONE, Felice Esposito a MEROLA, Simona Silvia: Optical diagnostics of the combustion process in a PFI SI boosted engine fueled with butanol-gasoline blend. Energy, Vol. 45, Issue 1, p. 277-287, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.006.
[21] THEWES, Matthiad, MÜTHER, Martin, MAXTHER, Martin, BRASSAT, Adrien, PISCHINGER, Stefan a SEHR, Andreas: Analysis of the Effect of Bio-Fuels on the Combustion in a Downsized DI SI Engine. SAE Int. J. Fuels Lubr. 5(1):274-288, 2011-01-1991 2011.
[22] SMITH, James D. a SICK, Volker: The Prospects of Using Alcohol-Based Fuels in Stratified-Charge Spark-Ignition Engines. SAE Technical Paper 2007-01-4034, 2007, doi:10.4271/2007-01-4034.
[23] HE, Xin, IRELAND, John C., ZIGLER, T. Bradley, RATCLIFF, Mathew A. a kol.: The Impacts of Mid-level Biofuel Content in Gasoline on SIDI Engine-out and Tailpipe Particulate Matter Emissions. SAE Technical Paper 2010-01-2125, 2010, doi:10.4271/2010-01-2125.
[24] KARAVALAKIS, Georgios, SHORT, Daniel, VU, Diep, VILLELA, Mark a kol.: Evaluating the regulated emissions, air toxics, ultrafine particles, and black carbon from SI-PFI and SI-DI vehicles operating on different ethanol and iso-butanol blends. Fuel, Vol. 128, p. 410-421, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.03.016.
[25] RATCLIFF, Mathew A., LUECKE, Jon, WILLIAMS, Aaron, CHRISTENSEN, Earl a kol.: Impact of higher alcohols blended in gasoline on light-duty vehicle exhaust emissions. Environ. Sci. Technol. Vol. 47, p.13865-13872, 2013, doi:10.1021/es402793p.
[26] ALASFOUR, Fuad Nesf: Butanol: A single cylinder engine study: engine performance, international journal of energy research, vol. 21, 21-30 (1997)
[27] ALASFOUR, Fuad Nesf: NOx emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: part 1- preheating inlet air, international journal of energy research, vol. 21, 21-30 (1997)
[28] ALASFOUR, Fuad Nesf: NOx emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: part 2-ignition timing, international journal of energy research, vol. 21, 21-30 (1997)
[29] Specifikace těsnících materiálů, dostupné on-line, zobrazeno 31.10.2016: http://www.armat.cz/pdf/specifikace-tesnicich-materialu-epdm-silikon-ptfe-viton-nbr.pdf
[30] Specifikace těsnících pryží, dostupné on-line, zobrazeno 31.10.2016: http://www.loziska.com/store/ploche_pryze.pdf
[31] KASS, Michael D., THEISS, Timothy, PAWEL, Steve, BAUSTIAN, James a kol., Compatibility Assessment of Elastomer Materials to Test Fuels Representing Gasoline Blends Containing Ethanol and Isobutanol. SAE Int. J. Fuels Lubr. *7*(2):445-456, 2014, doi:10.4271/2014-01-1462.
[32] California Biobutanol Multimedia Evaluation, Tier I, January 2010, dostupné on-line, zobrazeno 31. 10. 2016: https://www.arb.ca.gov/fuels/multimedia/020910biobutanoltierI.pdf
[33] FENKL, Michael, PECHOUT, Martin a VOJTISEK, Michal: N-butanol and isobutanol as alternatives to gasoline: Comparison of port fuel injector characteristics. 2015, EPJ Web of Conferences. ISSN 2100-014X. DOI:10.1051/epjconf/201611402021
[34] BROUSTAIL, Guillaume, SEERS, Patrice, HALTER, Fabien, MORÉAC, Gladys a MOUNAIM-ROUSSELLE, Christine: Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends for different initial pressures. Fuel, Vol. 106, p. 310–317, 2013. doi: 10.1016/2010.09.021.

[35] SCANLON, James T., a WILLIS, Donald E. 1985. Calculation of flame ionization detector relative response factors using the effective carbon number concept. J. Chromatogr. Sci. Vol. 23, p.333–340, 1985
[36] HOLM, Torkil: Aspects of the mechanism of the flame ionization detector. Journal of Chromatography A, Vol. 842, p. 221-227, 1999, doi:10.1016/S0021-9673(98)00706-7.
[37] TAKÁTS, Michal: Měření emisí spalovacích motorů, Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01632-3.
[38] WEISS, Martin, BONNEL, Pierre, KÜHLWEIN, Jörg, PROVENZA, Alessio, LAMBRECHT, Udo a kol.: Will Euro 6 reduce the NOx emissions of new diesel cars? – Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS), Atmospheric Environment, Volume 62, December 2012, Pages 657-665, ISSN 1352-2310, http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.056.
[39] WEISS, Martin, BONNEL, Pierre, HUMMEL, Rudolf, MANFREDI, Urbano, COLOMBO, Rinaldo, LANAPPE, Gaston, LIJOUR, Philippe Le, SCULATI, Mirco: Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS), JRC Scientific and Technical Report, 2011, EUR 24697 EN, on-line, zobrazeno 31. 10. 2016 http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/2011_pems_jrc_62639_en.pdf
[40] FAVRE, Cecile, BOSTEELS, Dirk, a MAY, John: Exhaust Emissions from European Market-Available Passenger Cars Evaluated on Various Drive Cycles. SAE Technical Paper 2013-24-0154, 2013, doi:10.4271/2013-24-0154.
[41] CARSLAW, David C., BEEVERS, Sean D., TATE, James E., WESTMORELAND, Emily J. a WILLIAMS, Martin L.: Recent evidence concerning higher NO_x emissions from passenger cars and light duty vehicles Atmospheric Environment, Vol. 45, Issue 39, 01.12.2011, p. 7053-7063. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.09.063
[42] LIGTERINK, Norbert, KADIJK, Gerrit, van MENSCH, Pim, HAUSBERGER, Stefan a REXEIS, Martin: Investigations and Real World Emission Performance of Euro 6 Light-Duty Vehicles Samenvatting, Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO): Delft, The Netherlands, 2013.
[43] VOJTISEK-LOM, Michal, FENKL, Michael, DUFEK, Martin, a MAREŠ, Jan: Off-cycle, Real-World Emissions of Modern Light Duty Diesel Vehicles. SAE Technical Paper 2009-24-0148, 2009, doi:10.4271/2009-24-0148.
[44] VOJTISEK-LOM, Michal a COBB James T.: On-road light-duty vehicle emission measurements using a novel inexpensive onboard portable system. Presented at the 8th CRC On-road vehicle emissions workshop, San Diego, CA, April 20-22, 1998
[45] VOJTÍŠEK, Michal a KOTEK, Martin: Estimation of Engine Intake Air Mass Flow Using a Generic Speed Density Method. Journal of Middle European Construction and Design of Cars. Volume 12, Issue 1, p. 7-15. 2014. ISSN 1804-9338. doi: 10.2478/medc-2014-0002
[46] PECHOUT Martin, DITTRICH Aleš, MAZAČ Martin, VOJTÍŠEK-LOM, Michal: Real Driving Emissions of Two Older Ordinary Cars Operated on High-Concentration Blends of N-Butanol and ISO-Butanol with Gasoline. SAE Technical Paper 2015-24-2488, 2015. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2015-24-2488
[47] VOJTISEK-LOM, Michal, M.: Total Diesel Exhaust Particulate Length Measurements Using a Modified Household Smoke Alarm Ionization Chamber. J. Air & Waste Manage. Assoc., 61, 2011, 126-134.
[48] VOJTISEK-LOM, Michal: Assessment of Low Levels of Particulate Matter Exhaust Emissions Using Low-Cost Ionization-Type Smoke Detectors. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, ISSN 0148-7191, 2013-24-0168, doi:10.4271/2013-24-0168.
[49] VOJTISEK-LOM, Michal, BERANEK, Vit, STOLCPARTOVA, Jitka, PECHOUT, Martin et al.: Effects of n-Butanol and Isobutanol on Particulate Matter Emissions from a Euro 6 Direct-injection Spark Ignition Engine During Laboratory and on-Road Tests. SAE Int. J. Engines 8(5):2338-2350, 2015, doi:10.4271/2015-24-2513.

[50] VOJTÍŠEK-LOM, Michal, PECHOUT, Martin a FENKL, Michael. Measurement of Exhaust Emissions of Small Gasoline Engines Under Real-world Driving Conditions. SAE Technical Paper 2014-01-2811, 2014. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2014-01-2811

[51] Alkylátový benzin Aspen. dostupné on-line, zobrazeno 31. 10. 2016: http://www.aspen.se/Files/PDF/Productsheets/Tjeckiska%20(CZ)/204000CZ%20-%20Produktblad%20Aspen%202_low.pdf?TS=635548515066772500

[52] MUŽÍKOVÁ, Zlata, ČERNÝ, Jaroslav a VAVŘINA, Jiří: Biolíh nebo biobutanol? Tribotechnika v provozu a údržbě, 2010, Sněžné - Milovy, listopad 2010, str. 58-63. ISBN 978-80-248-2303-4.

[53] KRENUS, Roberto, PASSOS, Marcos R.V., ORTEGA, Thiago, MOWERY, Keneth a kol.: Ethanol Flex Fuel system with Delphi Heated injector application. SAE Technical Paper 2014-01-1369, 2014, doi:10.4271/2014-01-1369.

[54] BAUSTIAN, James: Oxygenated gasoline composition having good driveabiliry performance. Patentový spis US 8,734,543. 28.4.2009.

[55] Popis systému Bosch Motronic Flex-fuel na webových stránkách výrobce, dostupné on-line, , zobrazeno 31. 10. 2016: http://br.bosch-automotive.com/en/internet/parts/parts_and_accessories_2/motor_and_sytems/benzin/injection_system/flexflue/flexflue_1.html

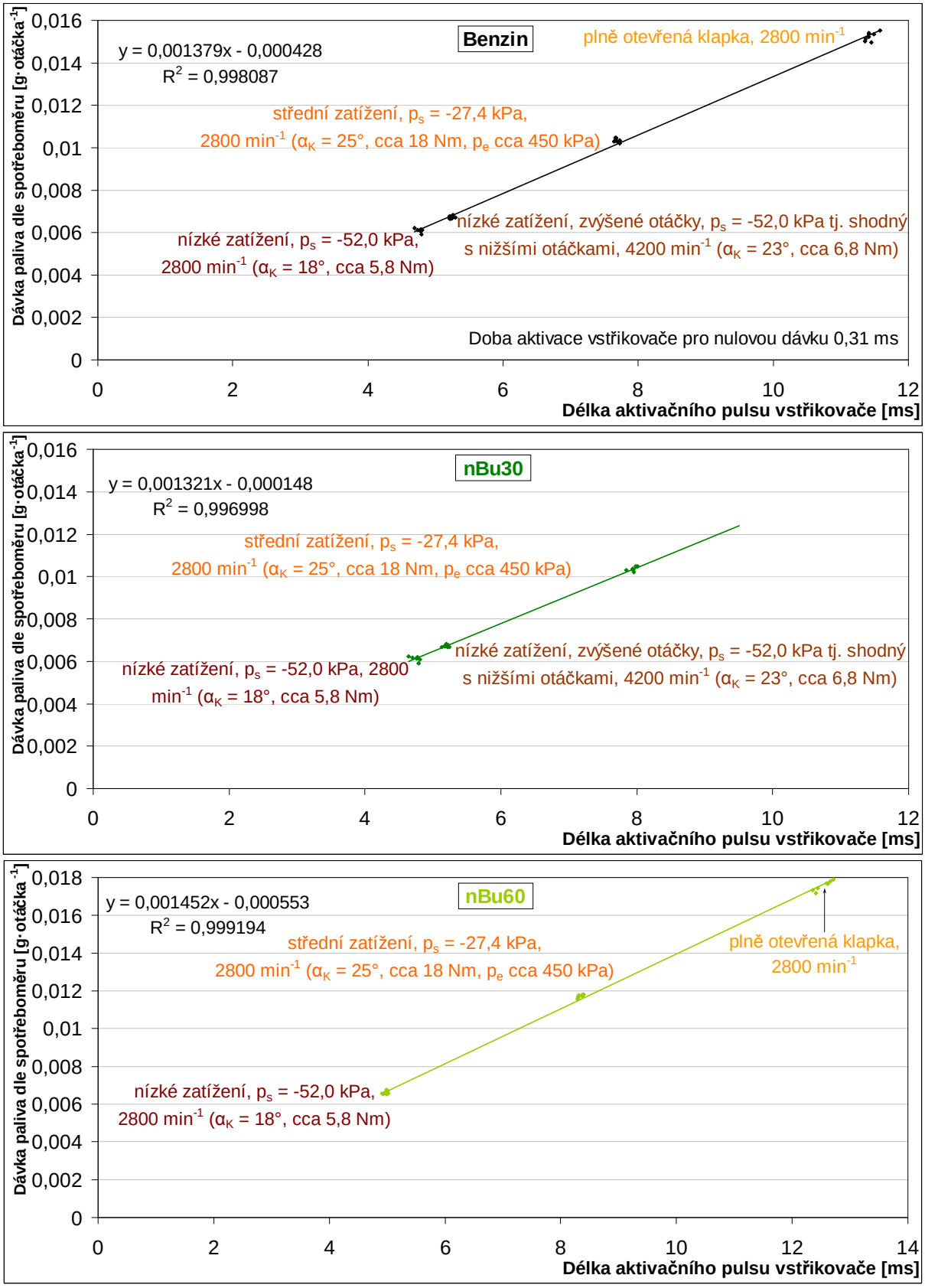
Seznam původních prací, vztahujících se k tématu disertační práce

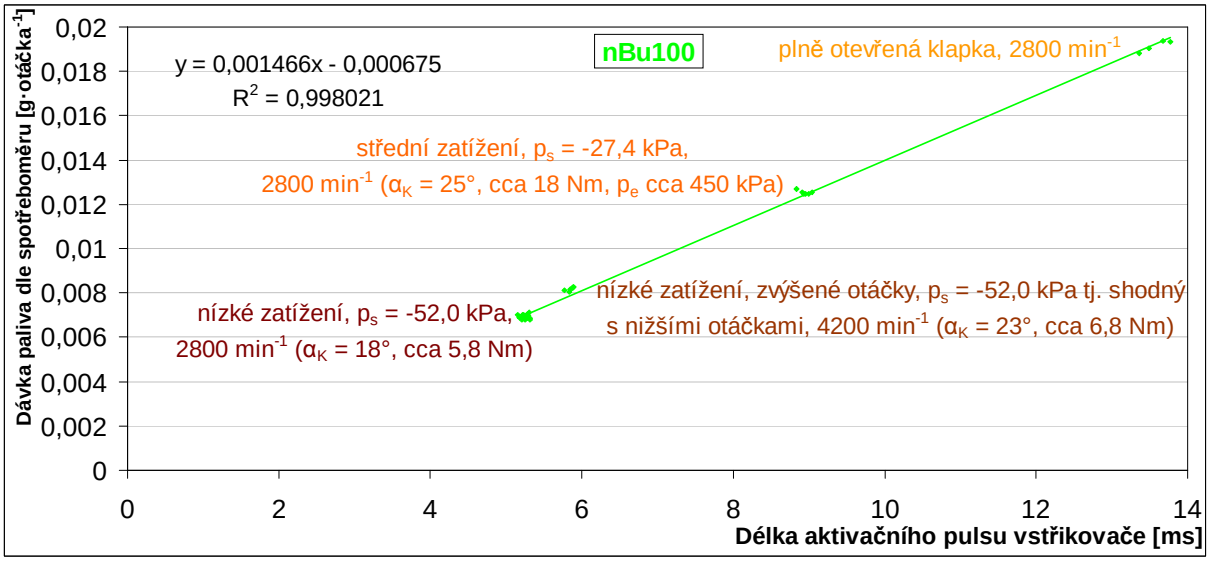
1) PECHOUT, Martin, TRNKA, Martin a VOJTÍŠEK, Michal.: Nanoparticle emissions from spark ignition engines powered by n-butanol blends, 16th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 24. – 27. 6. 2012, Zürich, Švýcarsko. ISSN 978-3-033-03556-0
2) PECHOUT, Martin, MAZAČ, Martin, a VOJTISEK-LOM, Michal: Effect of Higher Content N-Butanol Blends on Combustion, Exhaust Emissions and Catalyst Performance of an Unmodified SI Vehicle Engine, SAE Technical Paper 2012-01-1594, 2012. SAE International, ISSN 0148-7191. doi:10.4271/2012-01-1594.
3) VOJTÍŠEK-LOM, Michal, PECHOUT, Martin a MAZAČ. Real-World On-Road Exhaust Emissions from an Ordinary Gasoline Car Operated on E85 and on Butanol-Gasoline Blend. SAE Technical Paper 2013-24-0102, 2013. SAE International, ISSN 0148-7191. doi:10.4271/2013-24-0102.
4) PECHOUT, Martin, DITTRICH, Aleš a VOJTÍŠEK-LOM, Michal. Operation of an Ordinary PFI Engine on n-butanol and Iso-butanol and Their Blends with Gasoline. SAE Technical Paper 2014-01-2618, 2014. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2014-01-2618
5) VOJTÍŠEK-LOM, Michal, PECHOUT, Martin a FENKL, Michael. Measurement of Exhaust Emissions of Small Gasoline Engines Under Real-world Driving Conditions. SAE Technical Paper 2014-01-2811, 2014. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2014-01-2811
6) PECHOUT, Martin, TRNKA, Miroslav, NOVOTNÝ, Martin a VOJTÍŠEK, Michal. Úprava malého zážehového motoru pro provoz na alkoholová paliva. Listy cukrovarnické a řepařské, 2014, Volume 130, Issue 7-8, July/August 2014, Pages 262-267, ISSN 1210-3306.
7) PECHOUT Martin, DITTRICH Aleš, MAZAČ Martin, VOJTÍŠEK-LOM, Michal: Real Driving Emissions of Two Older Ordinary Cars Operated on High-Concentration Blends of N-Butanol and ISO-Butanol with Gasoline. SAE Technical Paper 2015-24-2488, 2015. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2015-24-2488
8) VOJTISEK-LOM, Michal, BERANEK, Vit, STOLCPARTOVA, Jitka, PECHOUT, Martin et al.: Effects of n-Butanol and Isobutanol on Particulate Matter Emissions from a Euro 6 Direct-injection Spark Ignition Engine During Laboratory and on-Road Tests. SAE Int. J. Engines 8(5):2338-2350, 2015, doi:10.4271/2015-24-2513.
9) VOJTÍŠEK, Martin, BERÁNEK, Vít, ŠTOLCPARTOVÁ, Jitka, PECHOUT, Martin a KLÍR, Vojtěch: Measurement of Exhaust Emissions of Small Gasoline Engines under Real-World Driving Conditions. SAE Technical Paper 2015-24-2513, 2015. SAE International, ISSN 0148-7191. doi: 10.4271/2015-24-2513.
10) VOJTÍŠEK, Michal, BERÁNEK, Vít, KLÍR, Vojtěch, PECHOUT, Martin, MAZAČ, Martin a DITTRICH, Luboš: Effect of alcohol blending on real driving emissions of particulate matter from ordinary gasoline automobile engines: A comparison among ethanol, n-butanol and isobutanol. BIOTRETH, Krakow, Polsko, 25.-26.11.2015, ISSN 2353-2718.
11) FENKL, Michael, PECHOUT, Martin a VOJTISEK, Michal: N-butanol and isobutanol as alternatives to gasoline: Comparison of port fuel injector characteristics. 2015, EPJ Web of Conferences. ISSN 2100-014X. DOI:10.1051/epjconf/201611402021
12) PECHOUT, Martin a LAURIN, Josef: Biobutanol as a Fuel for Combustion Engines. 2016, XLVII. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines, Brno, 5. – 6. 9. 2016. ISBN 978-80-214-5379-1.

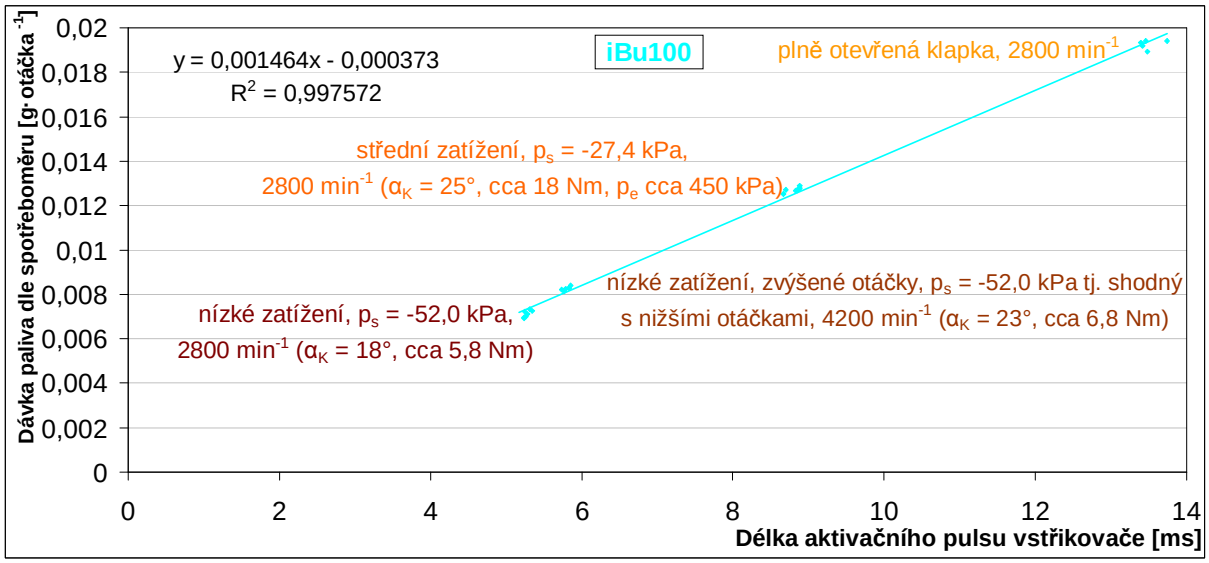
Přílohy

Příloha A	Hmotnostní dávka paliva v závislosti na délce aktivačního pulsu vstřikovače pro různá paliva
Příloha B	Součinitel přebytku směsi při zjišťování koncentrací škodlivin před a za katalyzátorem
Příloha C	Koncentrace škodlivin (HC, CO a NO) před katalyzátorem pro jednotlivá paliva
Příloha D	Relativní četnosti a délek vstřiků pro motor s jednobodovým vstřikem paliva
Příloha E	Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s jednobodovým vstřikem paliva provozovaným na jednotlivá paliva
Příloha F	Koncentrace a kumulovaná produkce pevných částic pro vozidlo s jednobodovým vstřikem paliva
Příloha G	Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s vícebodovým vstřikem paliva provozovaným na jednotlivá paliva
Příloha H	Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s vícebodovým vstřikem paliva a fungujícím třísložkovým katalytickým reaktorem provozovaným na jednotlivá paliva
Příloha I	Odvození přepočtu koncentrace mezí suchými a mokrými spalinami a měrné produkce vztažené na hmotnostní množství spotřebovaného paliva
Příloha J	Emisní faktory pro malý čtyřdobý motor za plného zatížení
Příloha K	Emisní faktory pro malý dvoudobý motor za plného zatížení

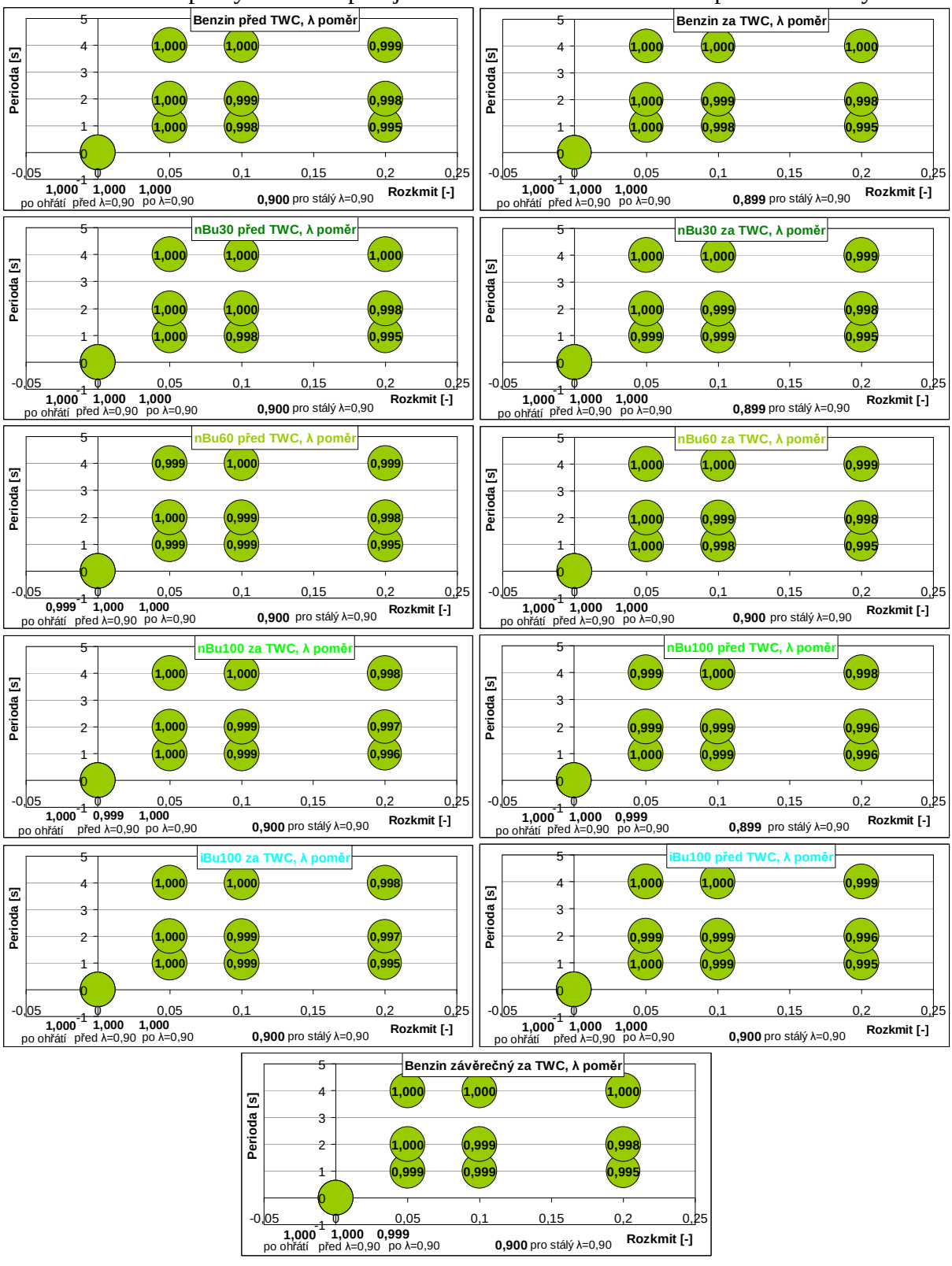
Příloha A: Hmotnostní dávka paliva v závislosti na délce aktivačního pulsu vstřikovače pro různá paliva



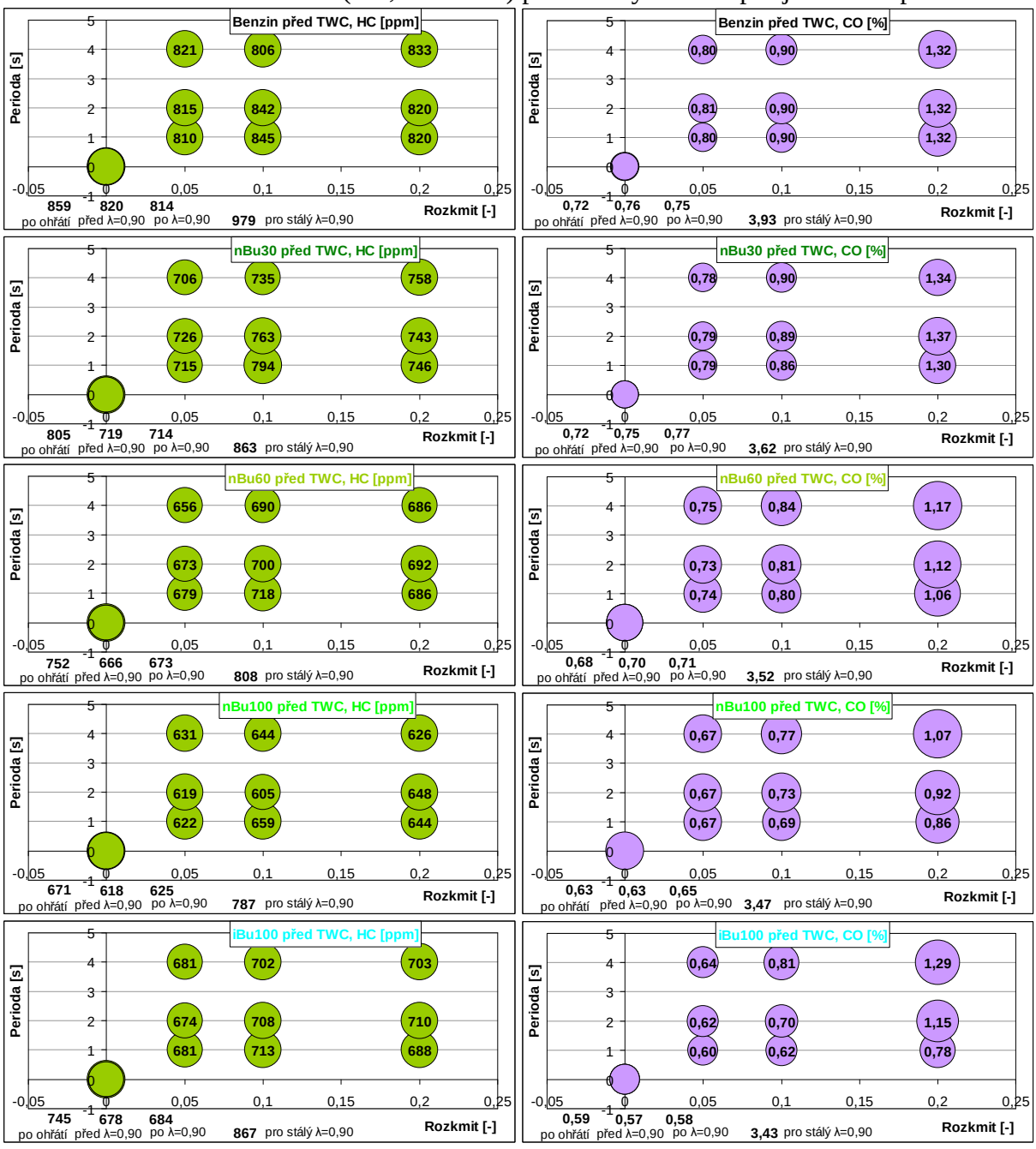

y = 0,001466x - 0,000675
R2 = 0,998021
nBu100
plně otevřená klapka, 2800 min-1
střední zatížení, ps = -27,4 kPa,
2800 min-1 (αK = 25°, cca 18 Nm, pe cca 450 kPa)
nízké zatížení, zvýšené otáčky, ps = -52,0 kPa tj. shodný
s nižšími otáčkami, 4200 min-1 (αK = 23°, cca 6,8 Nm)
nízké zatížení, ps = -52,0 kPa,
2800 min-1 (αK = 18°, cca 5,8 Nm)
Dávka paliva dle spotřeboměru [g·otáčka-1]
Délka aktivačního pulsu vstřikovače [ms]

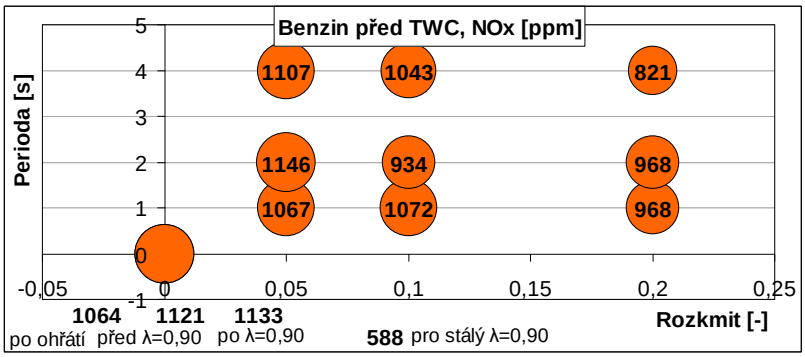

y = 0,001464x - 0,000373
R2 = 0,997572
iBu100
plně otevřená klapka, 2800 min-1
střední zatížení, ps = -27,4 kPa,
2800 min-1 (αK = 25°, cca 18 Nm, pe cca 450 kPa)
nízké zatížení, zvýšené otáčky, ps = -52,0 kPa tj. shodný
s nižšími otáčkami, 4200 min-1 (αK = 23°, cca 6,8 Nm)
nízké zatížení, ps = -52,0 kPa,
2800 min-1 (αK = 18°, cca 5,8 Nm)
Dávka paliva dle spotřeboměru [g·otáčka-1]
Délka aktivačního pulsu vstřikovače [ms]

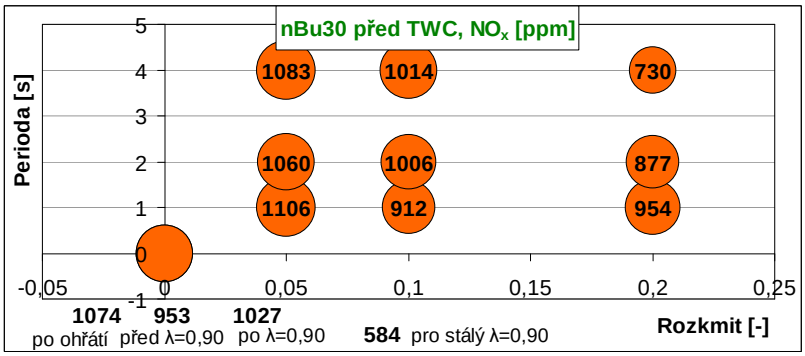
Příloha B: Součinitel přebytku směsi při zjišťování koncentrací škodlivin před a za katalyzátorem

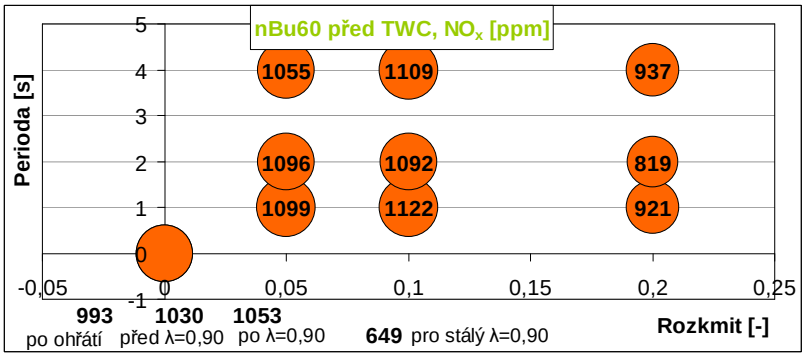


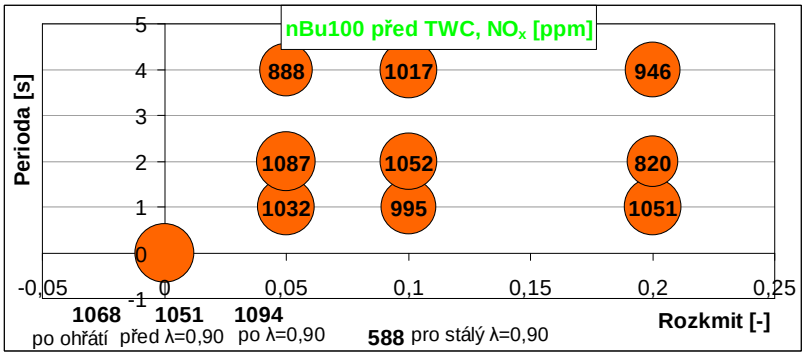
Příloha C: Koncentrace škodlivin (HC, CO a NO) před katalyzátorem pro jednotlivá paliva

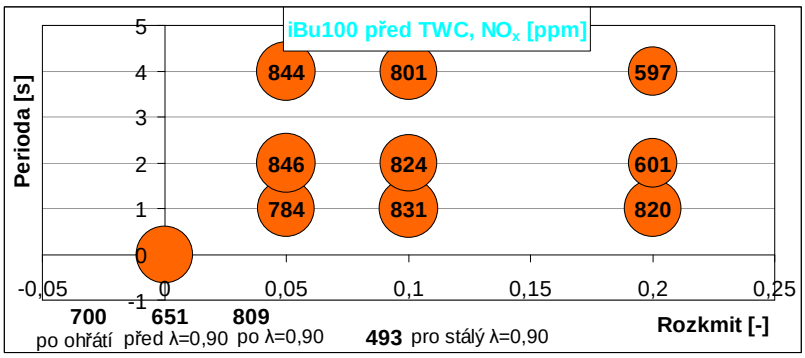



Benzin před TWC, NOx [ppm]
Perioda [s]
5
4
3
2
1
0
-1
1107
1043
821
1146
934
968
1067
1072
968
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
1064
po ohřátí
1121
před λ=0,90
1133
po λ=0,90
588
pro stálý λ=0,90
Rozkmit [-]

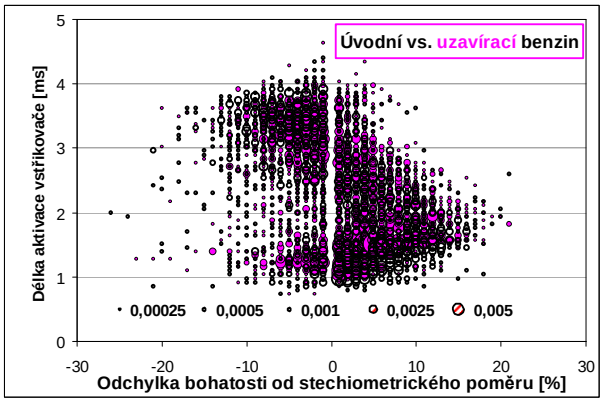

nBu30 před TWC, NOx [ppm]
Perioda [s]
5
4
3
2
1
0
-1
1083
1014
730
1060
1006
877
1106
912
954
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
1074
po ohřátí
953
před λ=0,90
1027
po λ=0,90
584
pro stálý λ=0,90
Rozkmit [-]

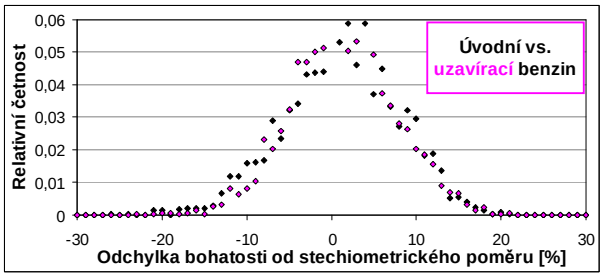

nBu60 před TWC, NOx [ppm]
Perioda [s]
5
4
3
2
1
0
-1
1055
1109
937
1096
1092
819
1099
1122
921
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
993
po ohřátí
1030
před λ=0,90
1053
po λ=0,90
649
pro stálý λ=0,90
Rozkmit [-]

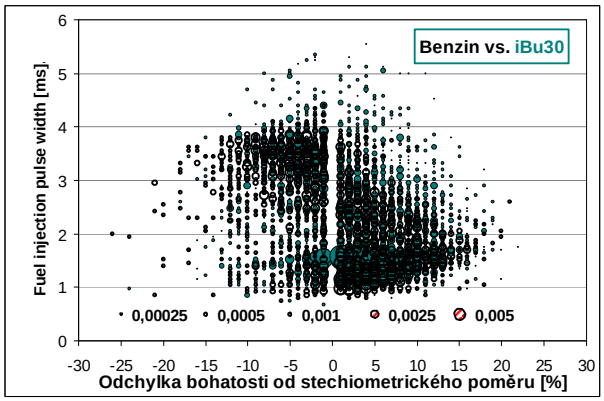

nBu100 před TWC, NOx [ppm]
Perioda [s]
5
4
3
2
1
0
-1
888
1017
946
1087
1052
820
1032
995
1051
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
1068
po ohřátí
1051
před λ=0,90
1094
po λ=0,90
588
pro stálý λ=0,90
Rozkmit [-]

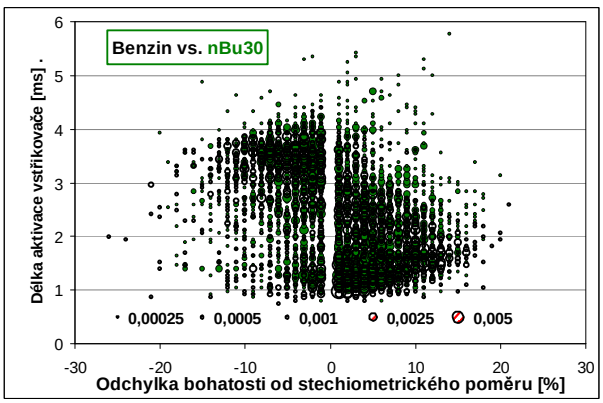

iBu100 před TWC, NOx [ppm]
Perioda [s]
5
4
3
2
1
0
-1
844
801
597
846
824
601
784
831
820
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
700
po ohřátí
651
před λ=0,90
809
po λ=0,90
493
pro stálý λ=0,90
Rozkmit [-]

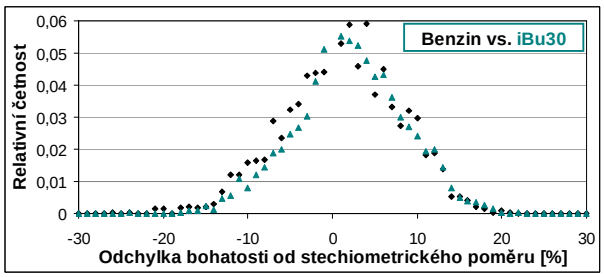
Příloha D: Relativní četnosti a délek vstřiků pro motor s jednobodovým vstřikem paliva

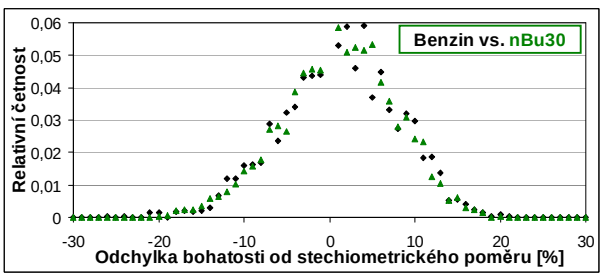


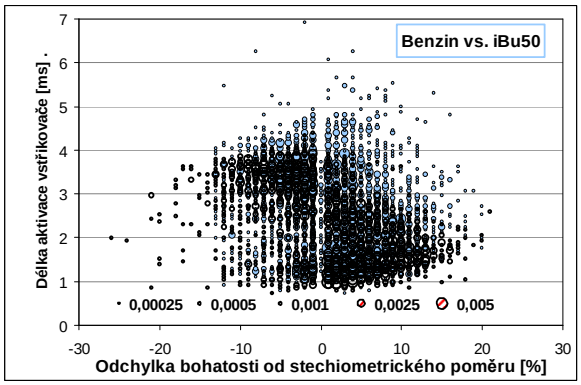


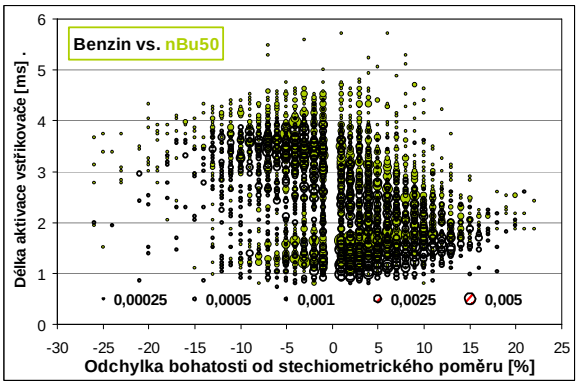


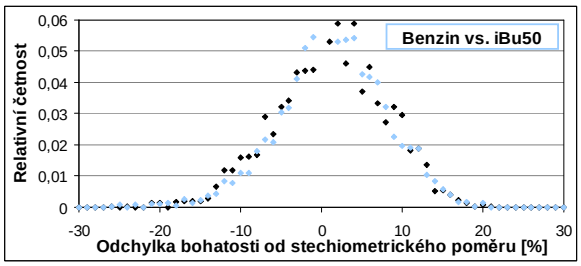


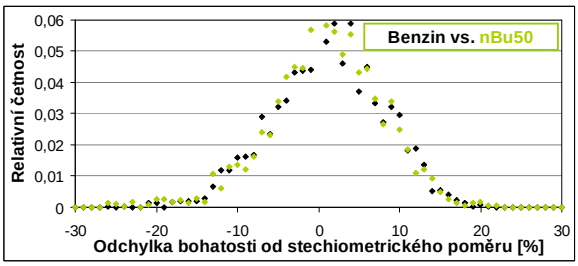


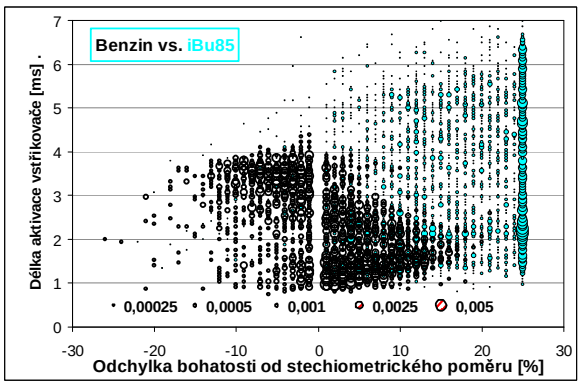


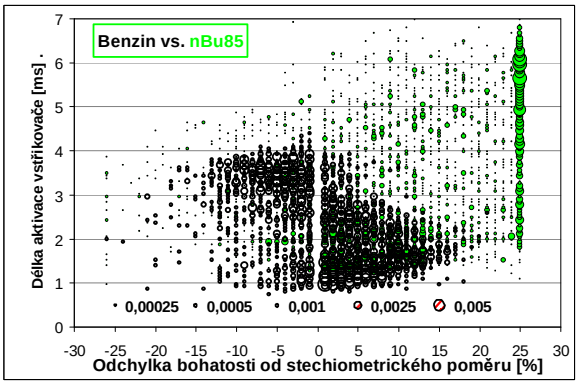

Benzin vs. iBu50
Délka aktivace vstřikovače [ms] .
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]
0,00025
0,0005
0,001
0,0025
0,005

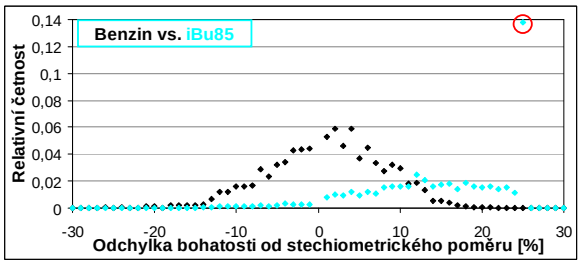

Benzin vs. nBu50
Délka aktivace vstřikovače [ms] .
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]
0,00025
0,0005
0,001
0,0025
0,005

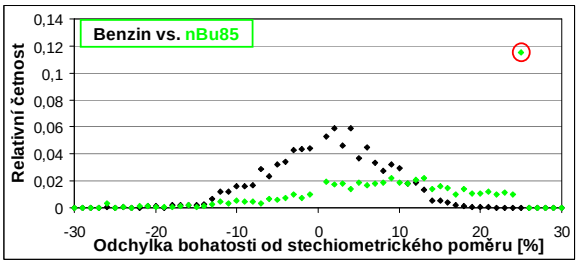

Benzin vs. iBu50
Relativní četnost
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]

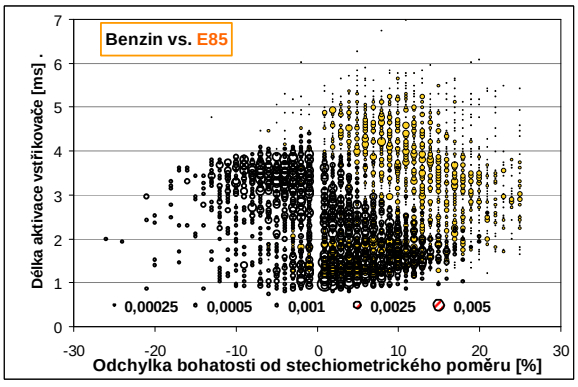

Benzin vs. nBu50
Relativní četnost
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]

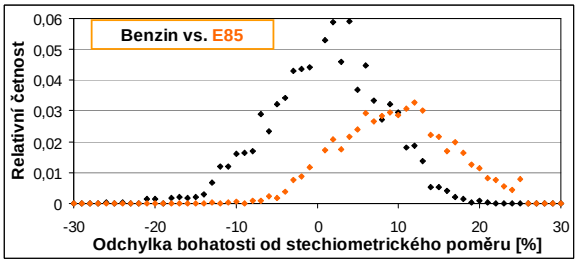

Benzin vs. iBu85
Délka aktivace vstřikovače [ms] .
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]
0,00025
0,0005
0,001
0,0025
0,005


Benzin vs. nBu85
Délka aktivace vstřikovače [ms] .
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]
0,00025
0,0005
0,001
0,0025
0,005

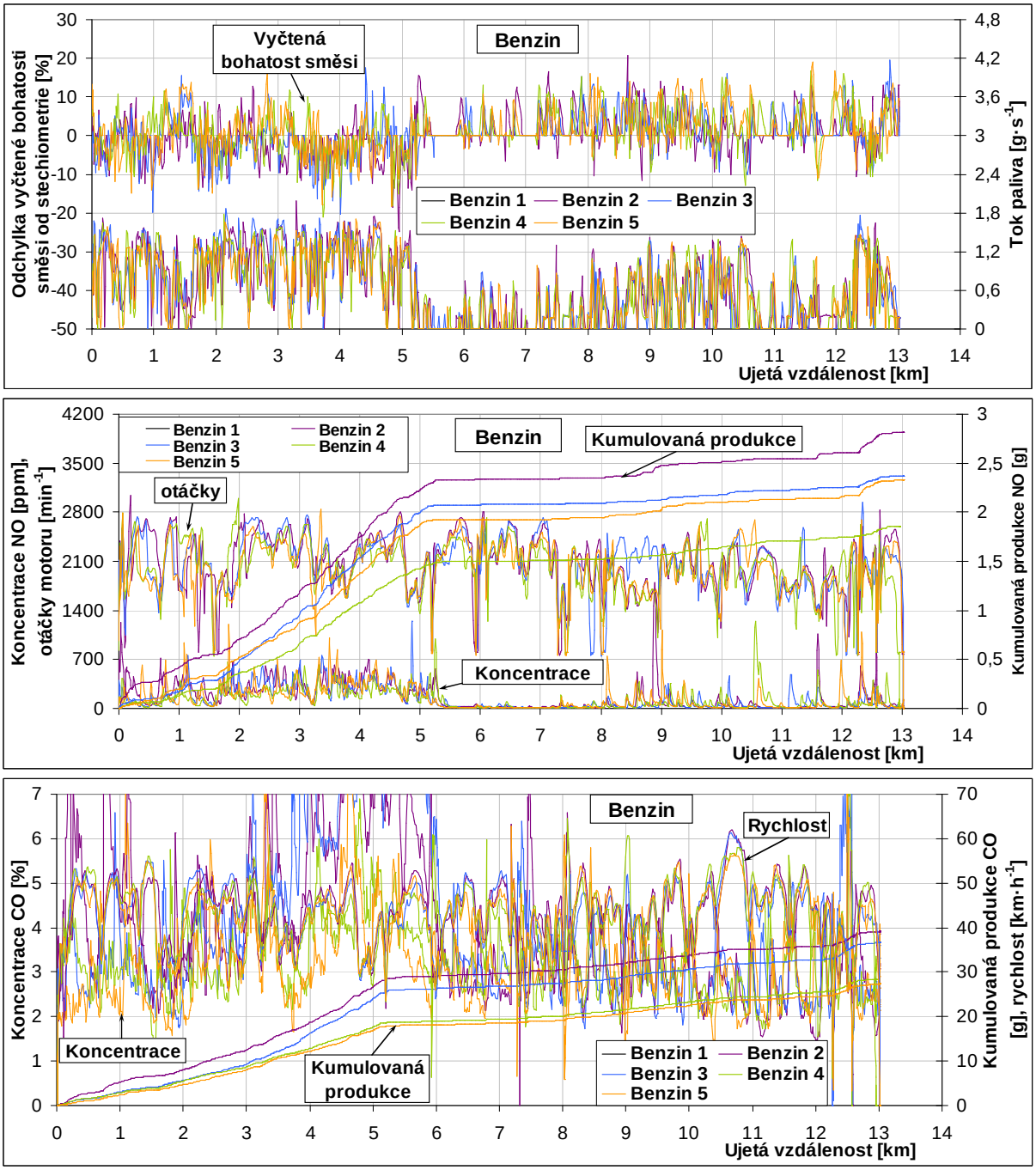

Benzin vs. iBu85
Relativní četnost
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]

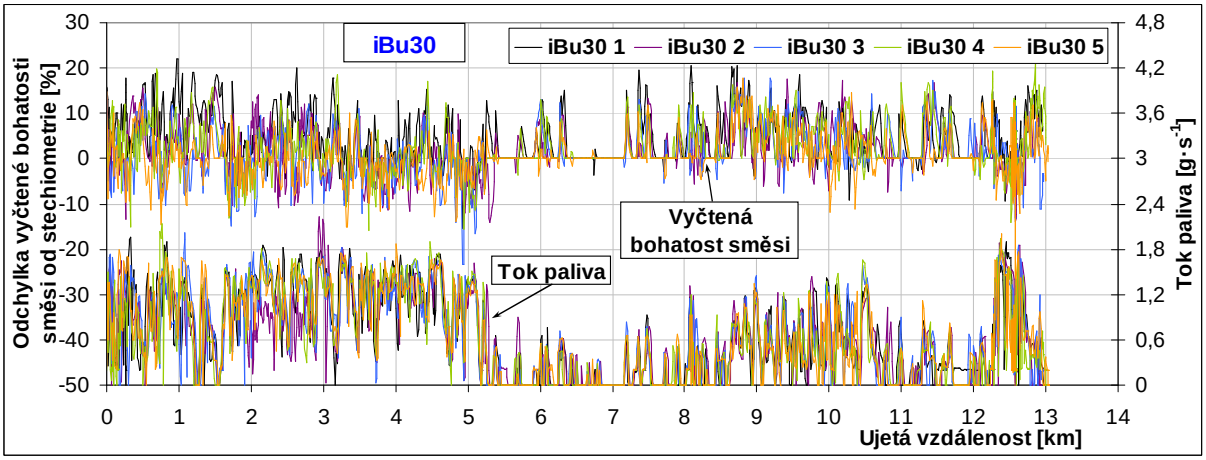

Benzin vs. nBu85
Relativní četnost
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]

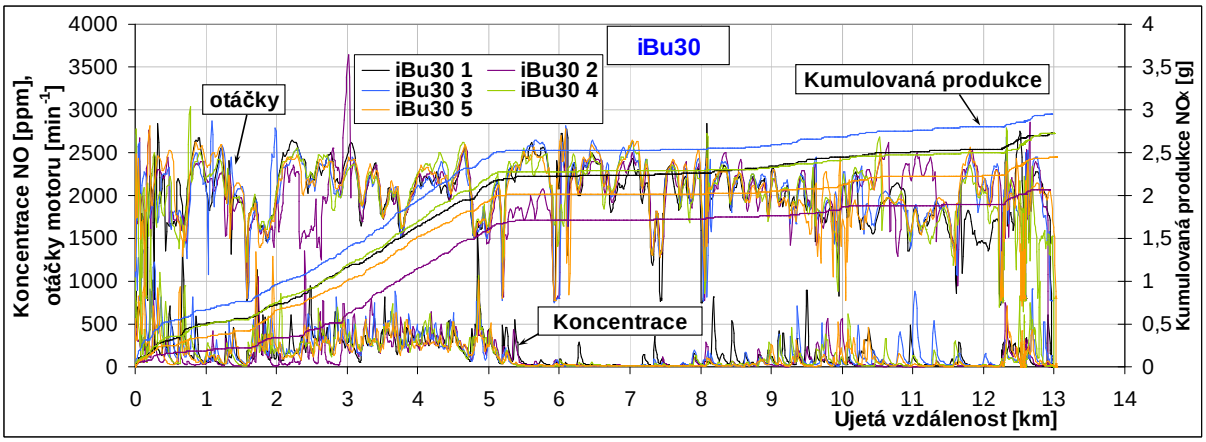

Benzin vs. E85
Délka aktivace vstřikovače [ms] .
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]
0,00025
0,0005
0,001
0,0025
0,005

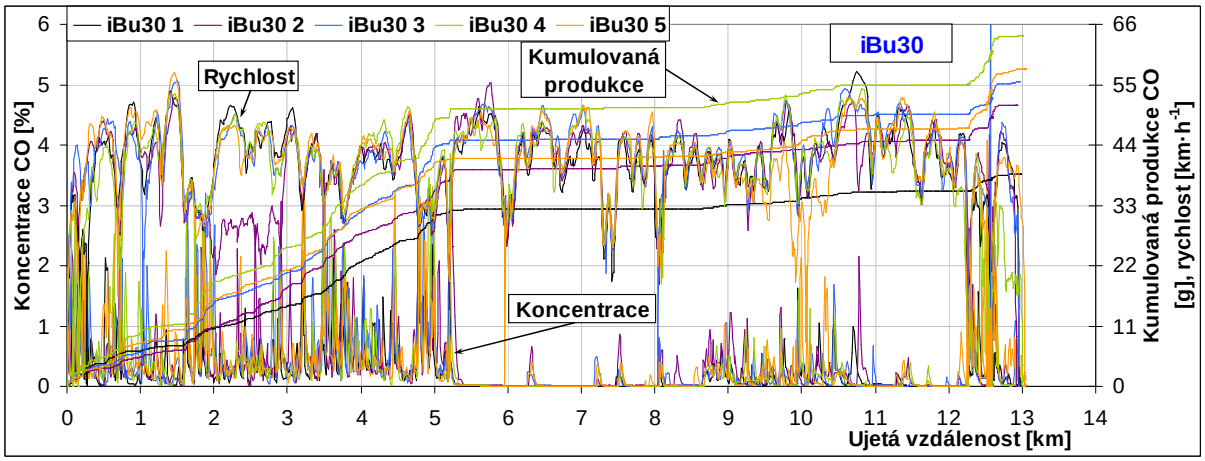

Benzin vs. E85
Relativní četnost
Odchylka bohatosti od stechiometrického poměru [%]

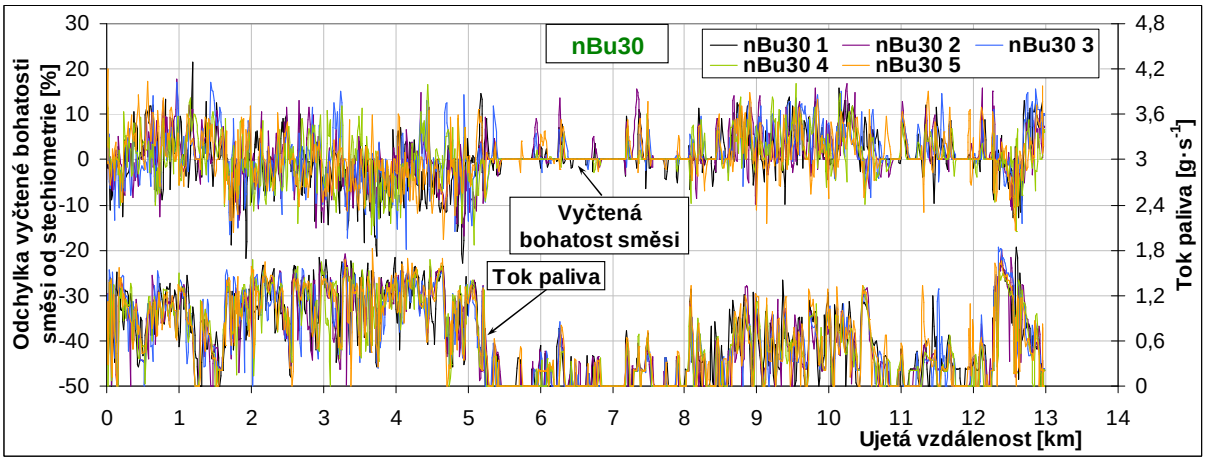
Příloha E: Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s jednobodovým vstřikem paliva provozovaným na jednotlivá paliva

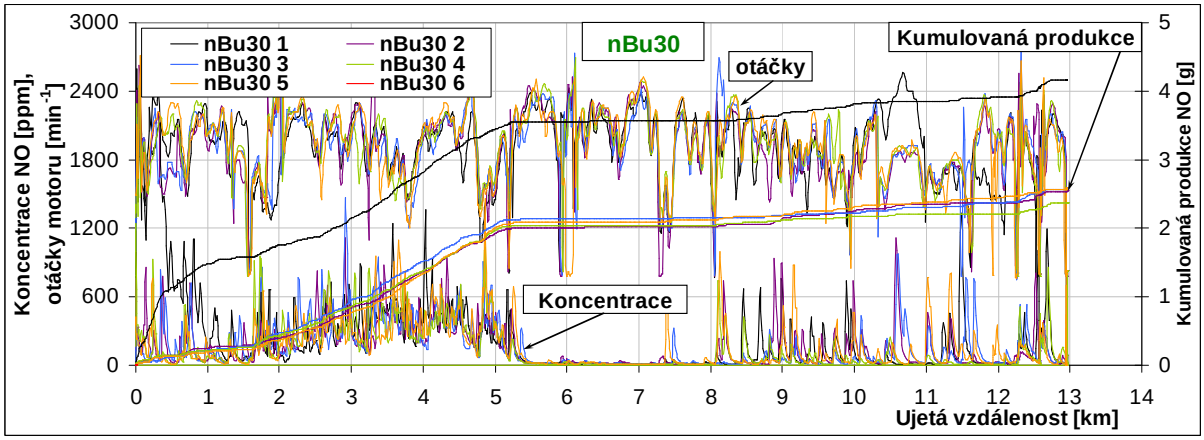


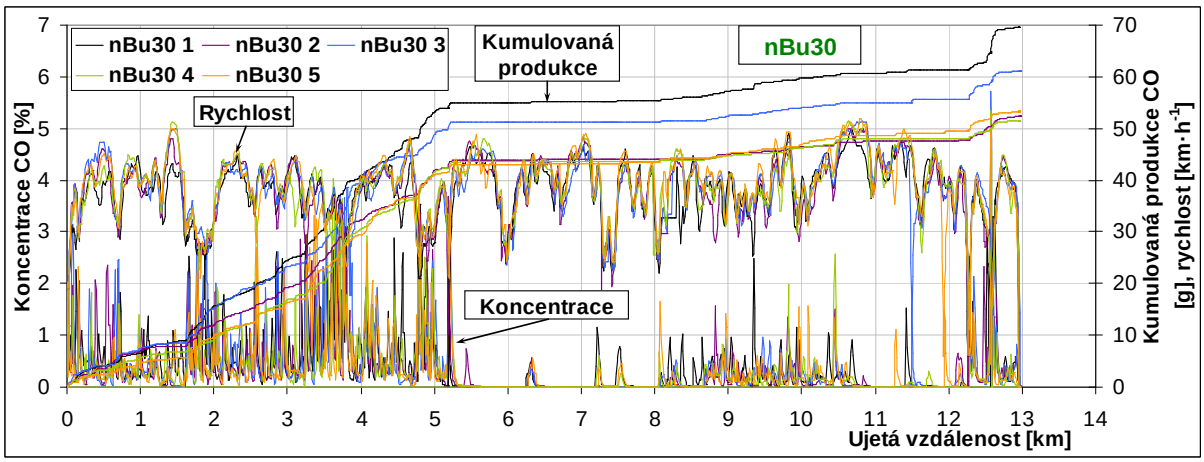

iBu30
iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

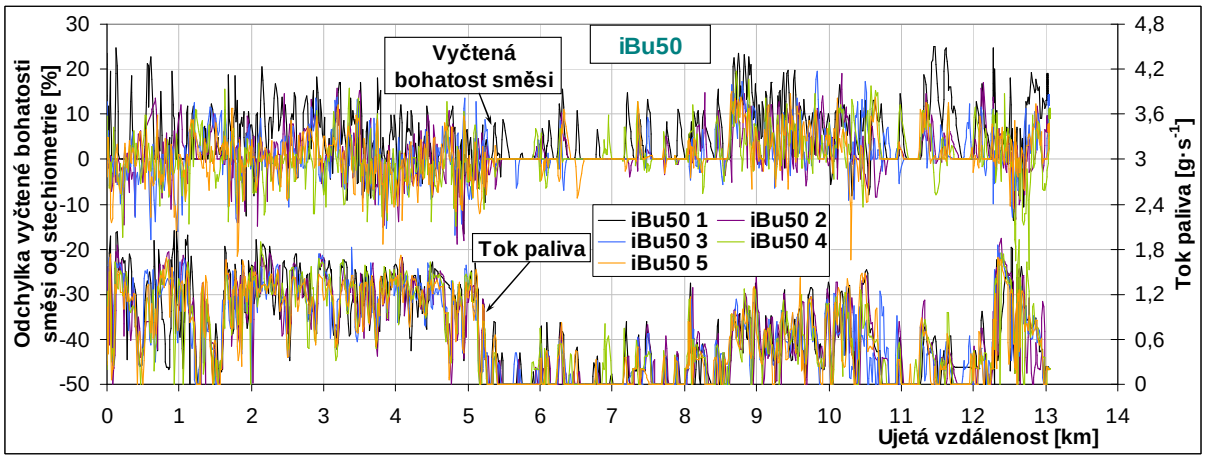

iBu30
iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NOx [g]
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

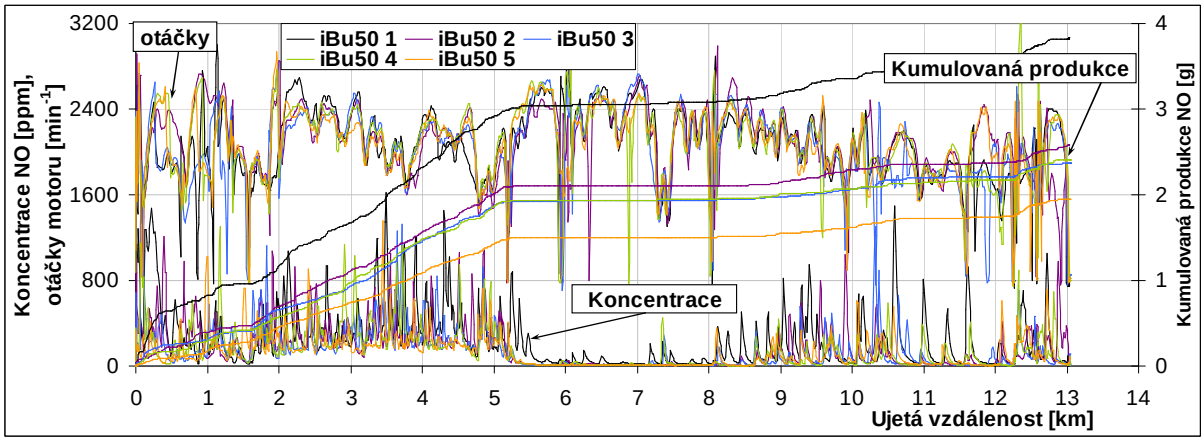

iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
iBu30
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

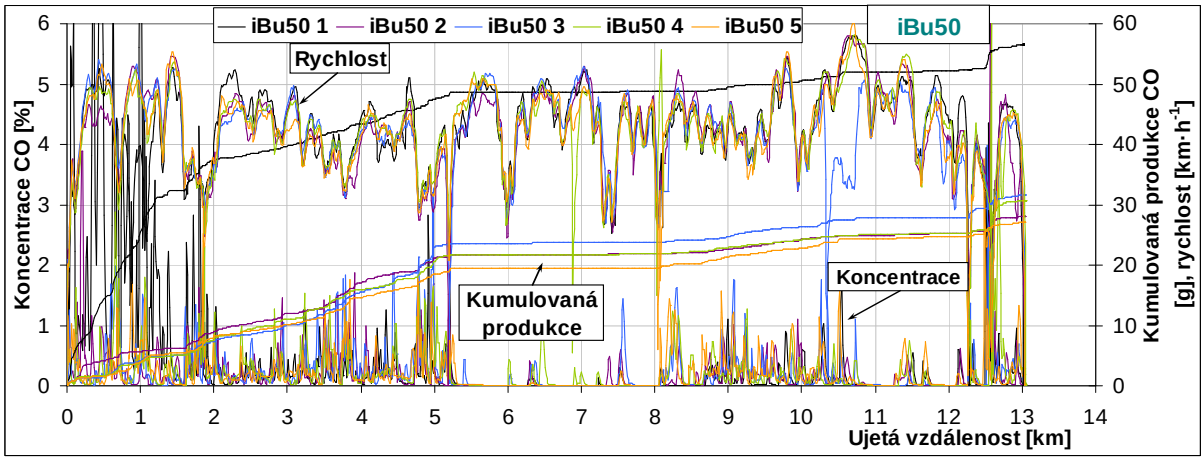

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

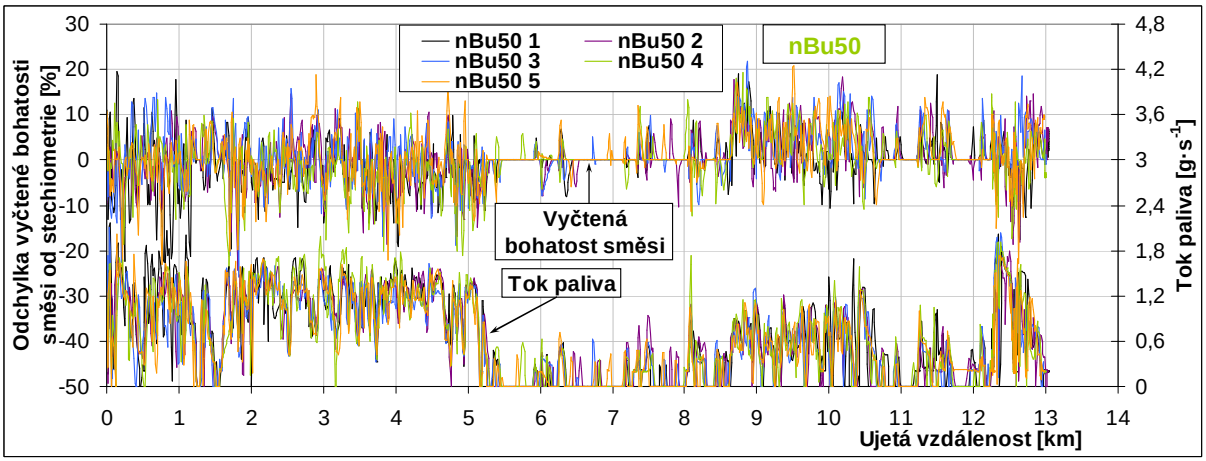

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

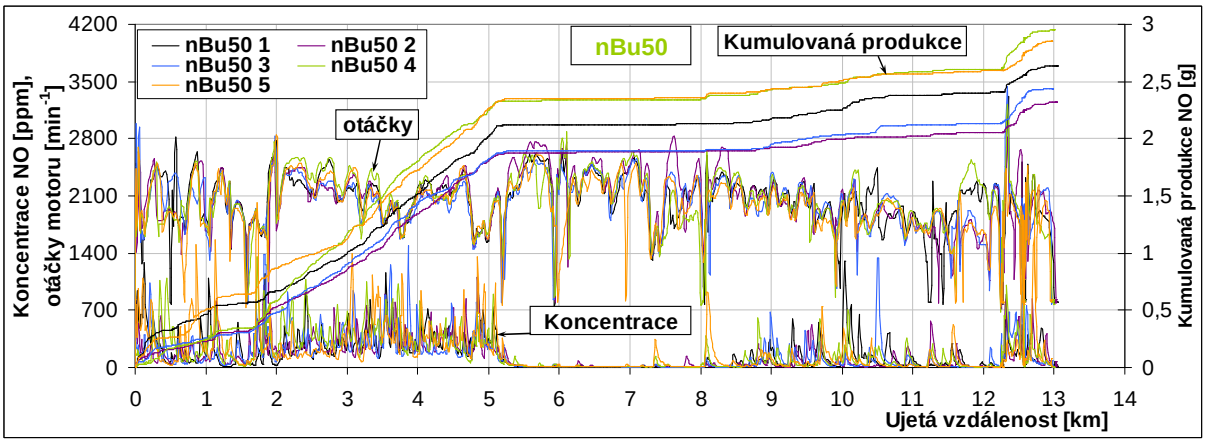

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
Kumulovaná produkce
Rychlost
Koncentrace
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

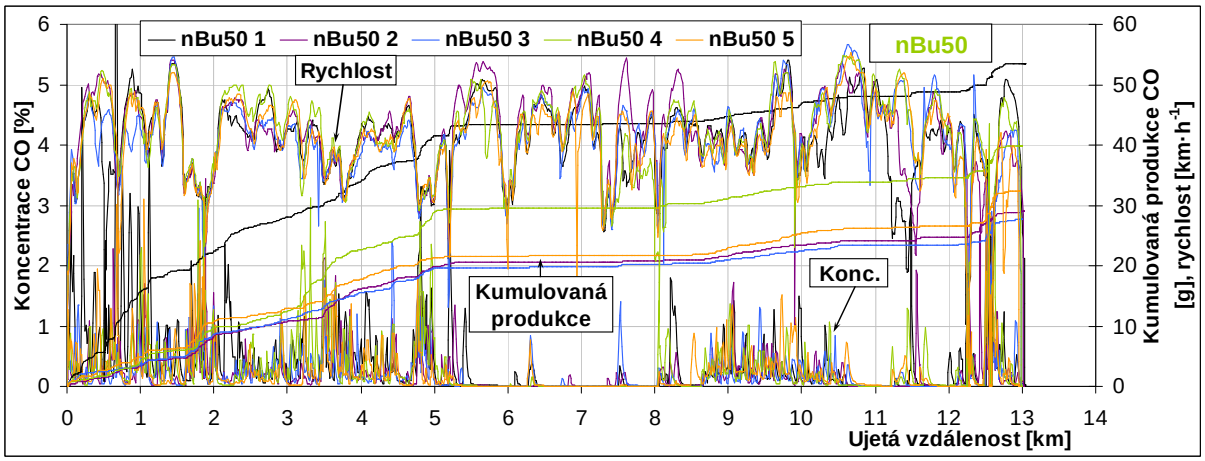

iBu50
Vyčtená bohatost směsi
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
Tok paliva
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Ujetá vzdálenost [km]

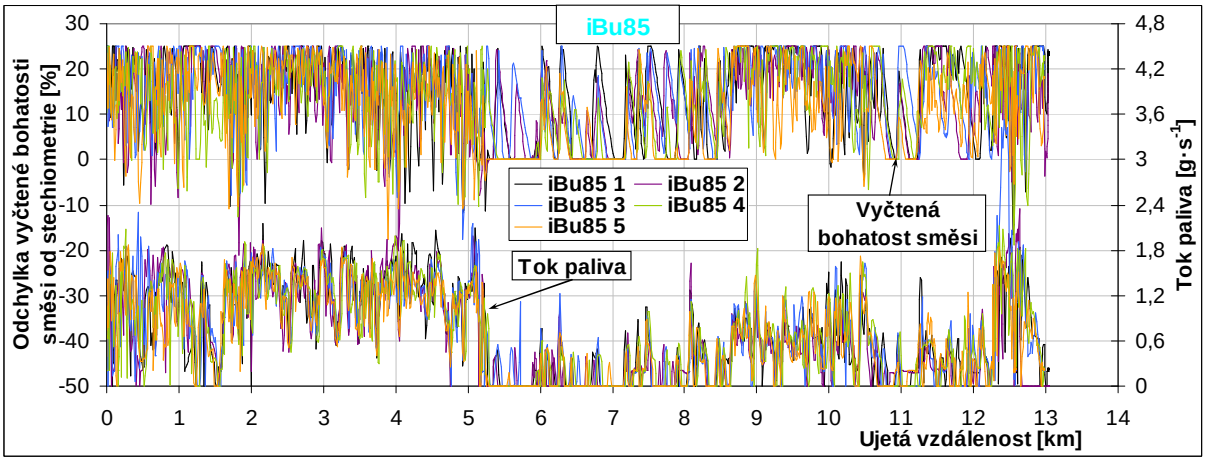

otáčky
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

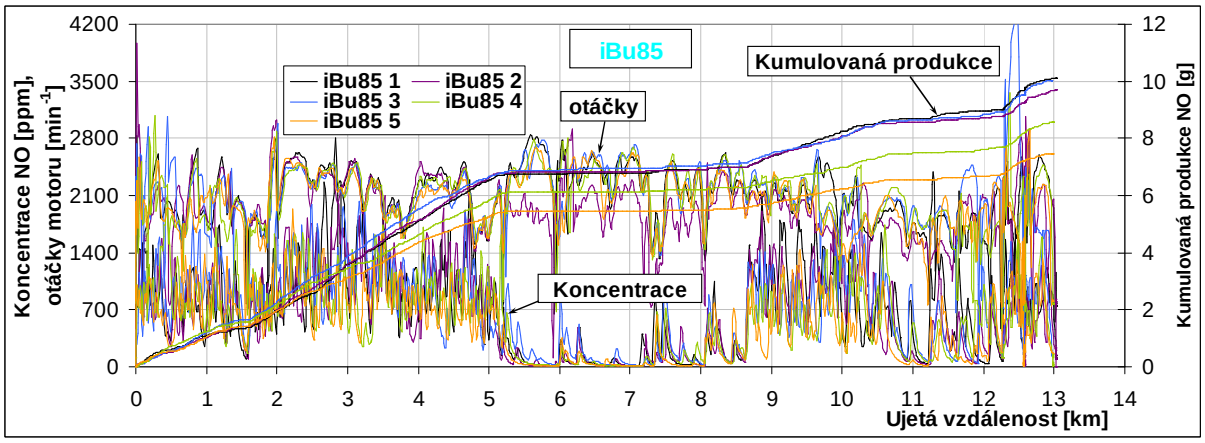

iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
iBu50
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

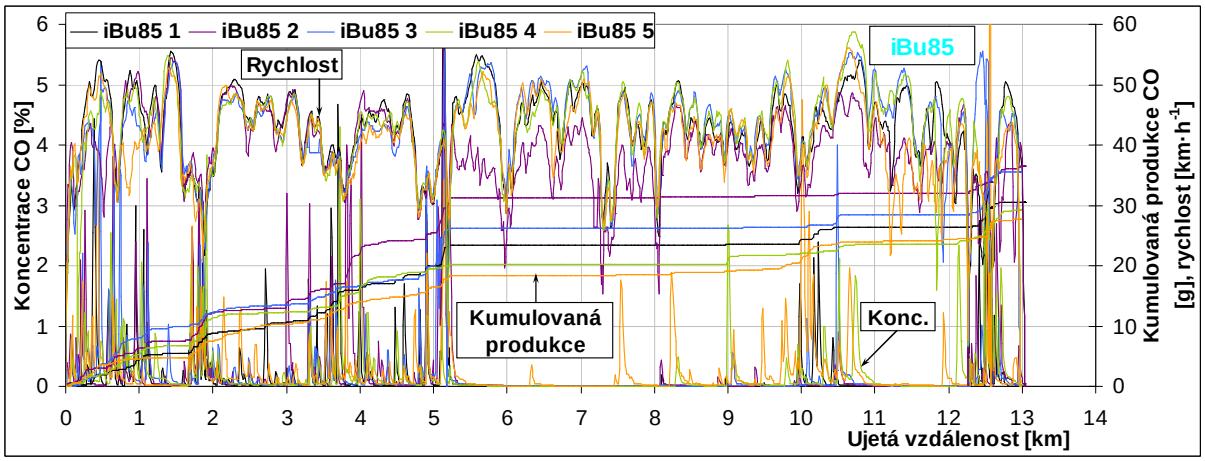

nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Ujetá vzdálenost [km]

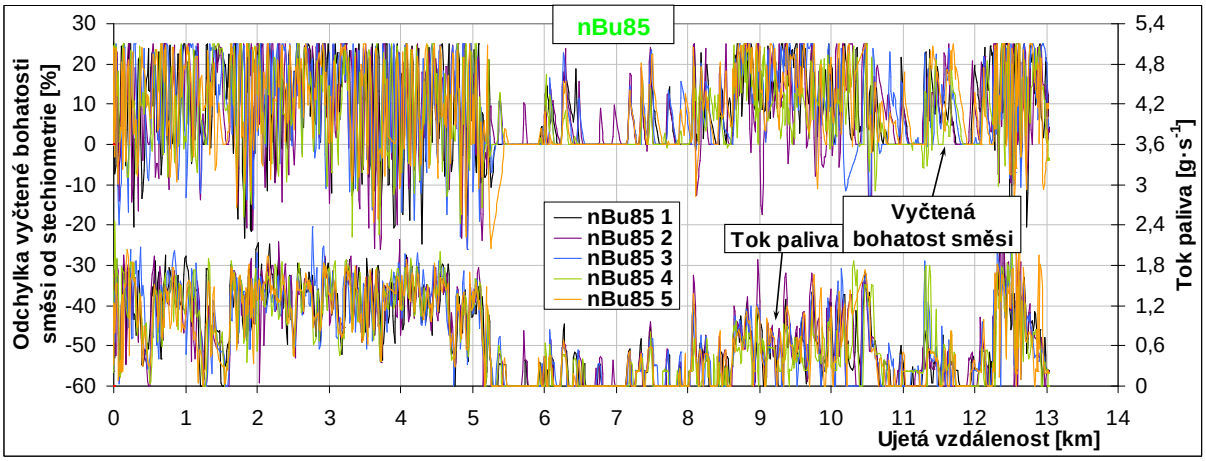

nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50
Kumulovaná produkce
otáčky
Koncentrace
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

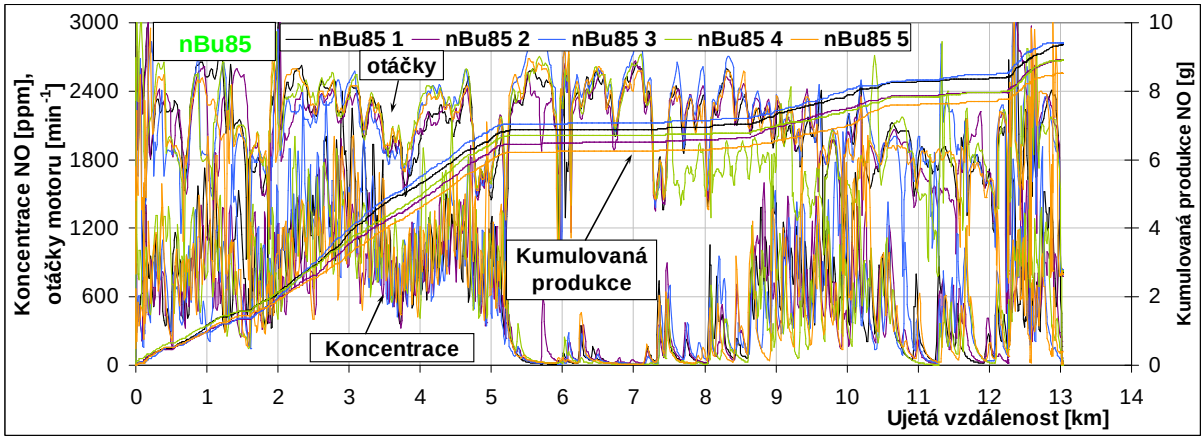

nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50
Rychlost
Kumulovaná produkce
Konc.
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

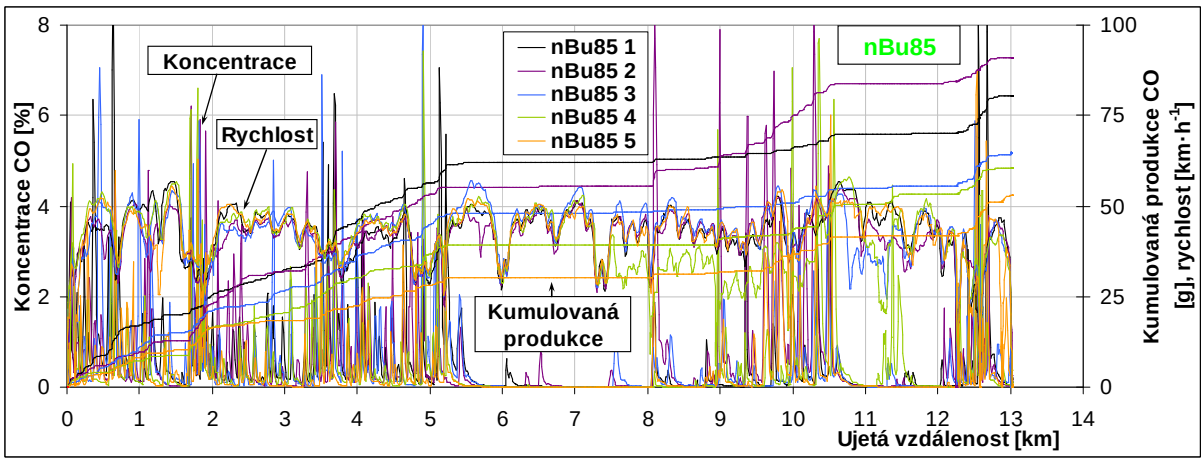

iBu85
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Ujetá vzdálenost [km]
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva

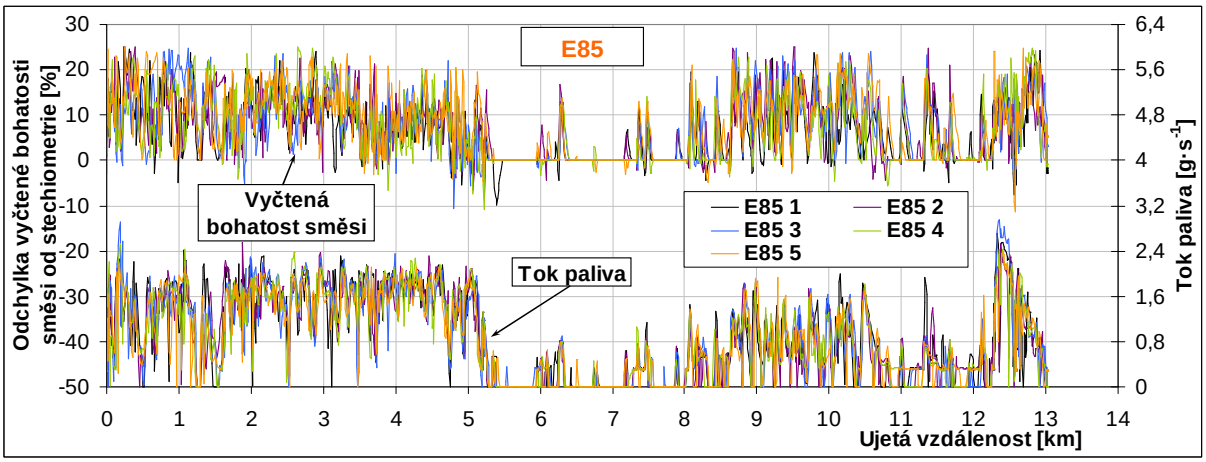

iBu85
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Kumulovaná produkce
otáčky
Koncentrace

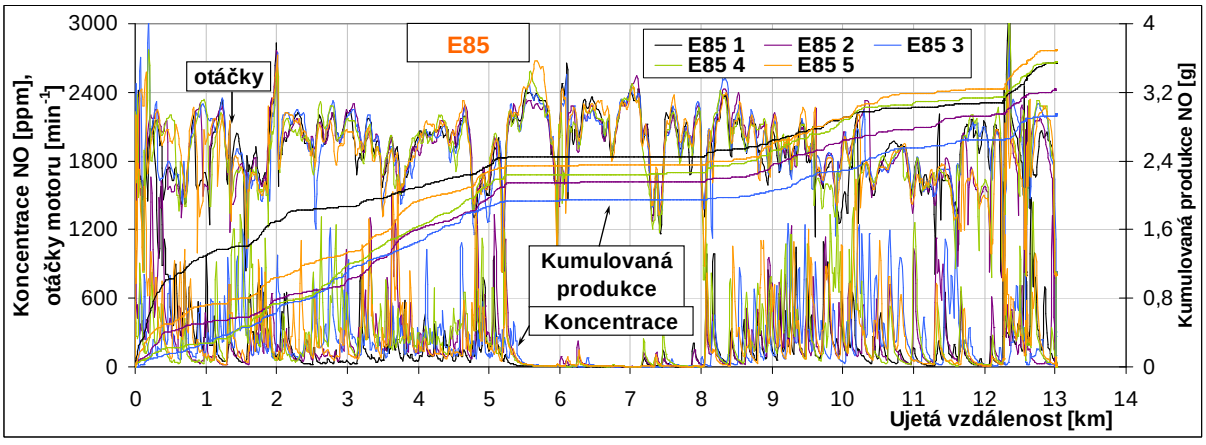

iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
iBu85
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Konc.

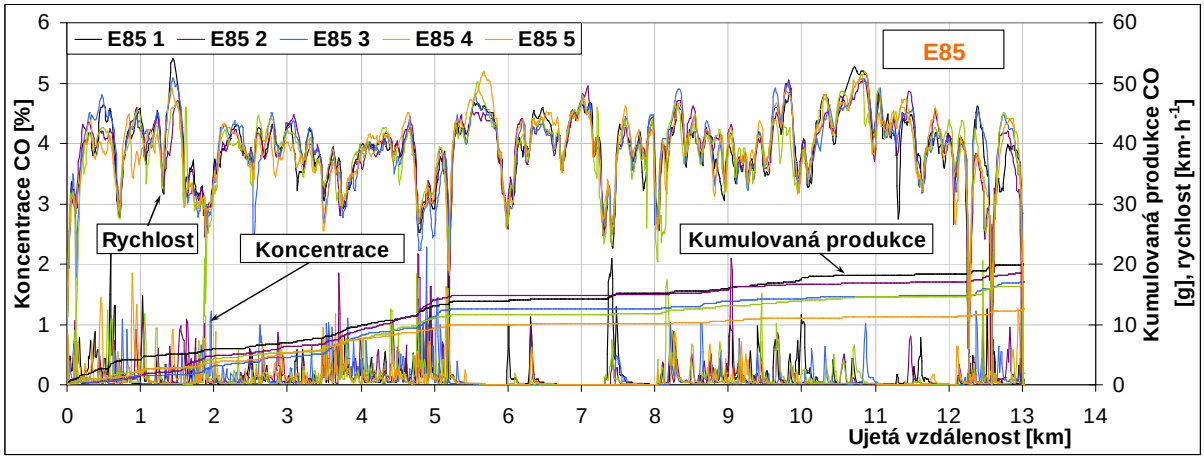

nBu85
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Ujetá vzdálenost [km]
nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
Tok paliva
Vyčtená bohatost směsi

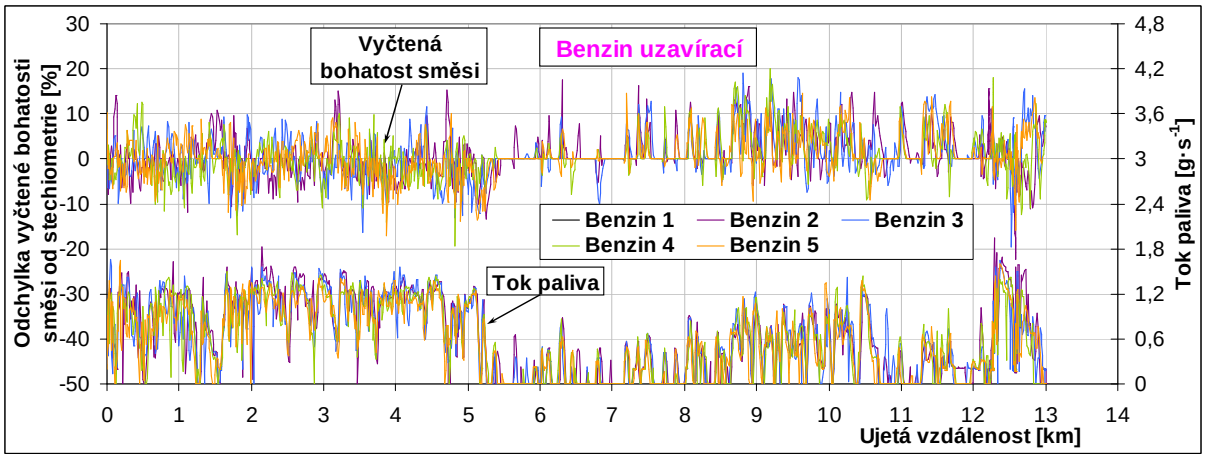

nBu85
nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

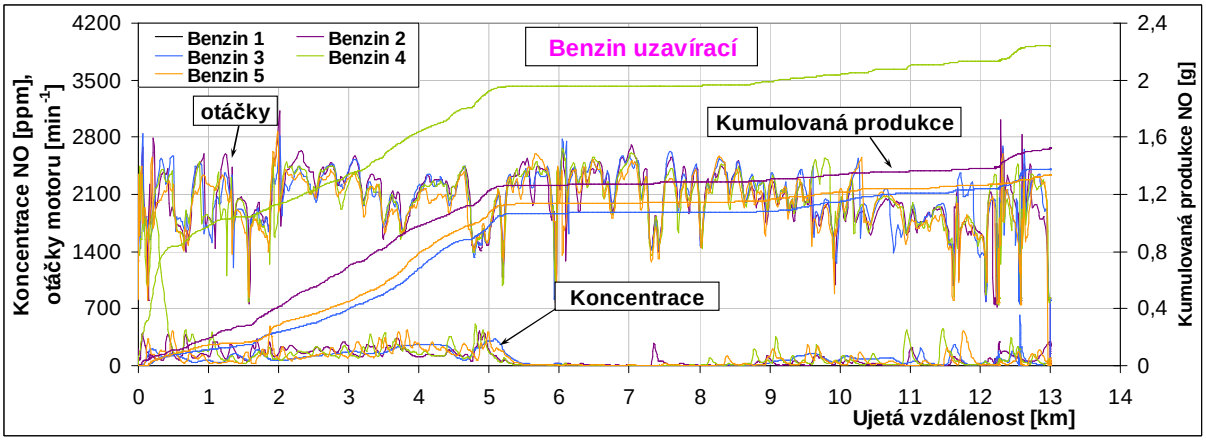

Koncentrace
Rychlost
nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
nBu85
Kumulovaná produkce
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

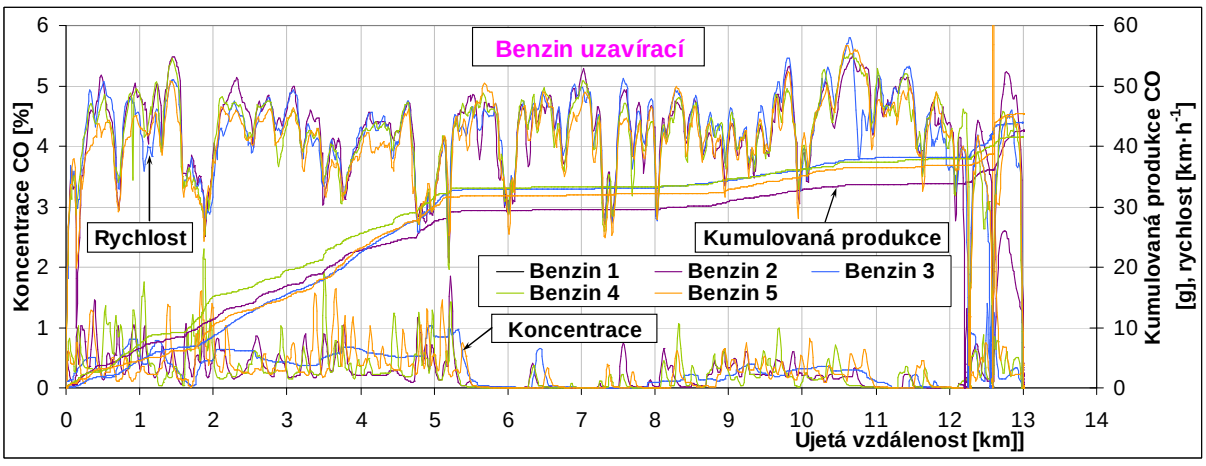

E85
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Ujetá vzdálenost [km]


E85
otáčky
E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

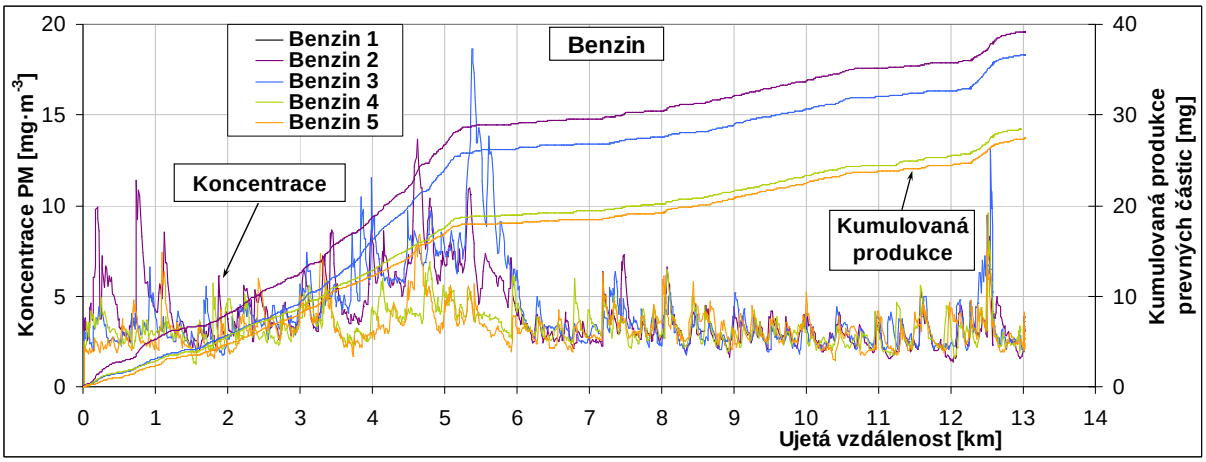

E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
E85
Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Ujetá vzdálenost [km]

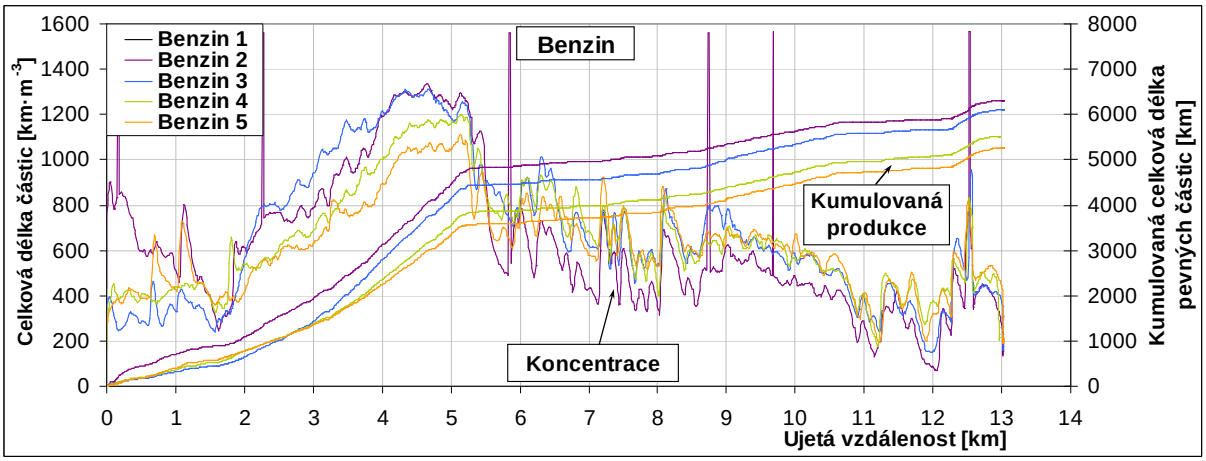

Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g·s-1]
Vyčtená bohatost směsi
Benzin uzavírací
Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4
Benzin 5
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

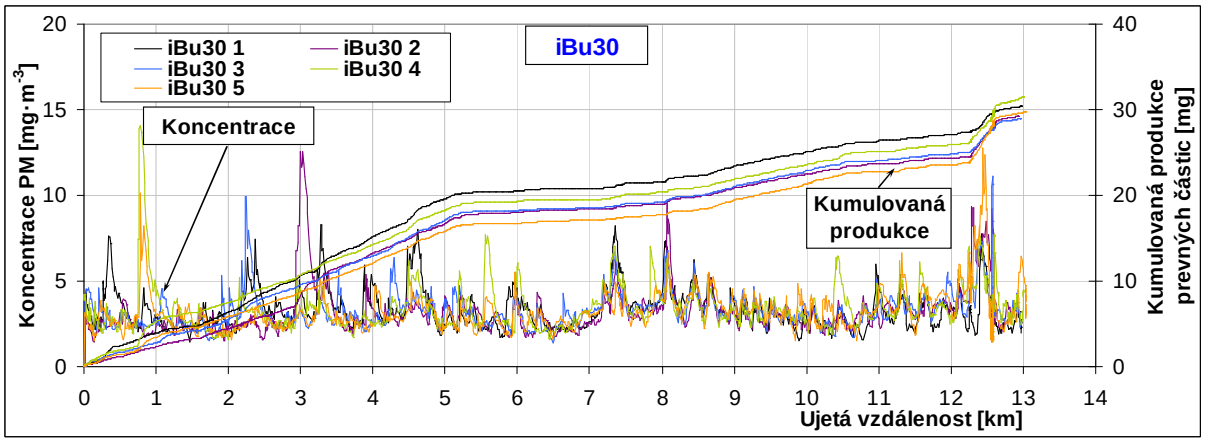

Koncentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4
Benzin 5
Benzin uzavírací
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

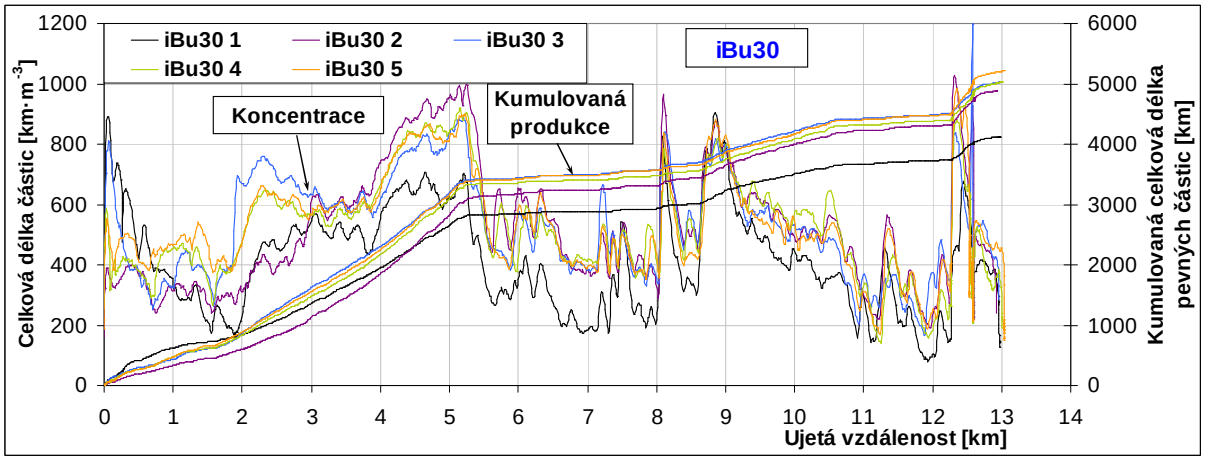

Koncentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Benzin uzavírací
Rychlost
Kumulovaná produkce
Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4
Benzin 5
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]]

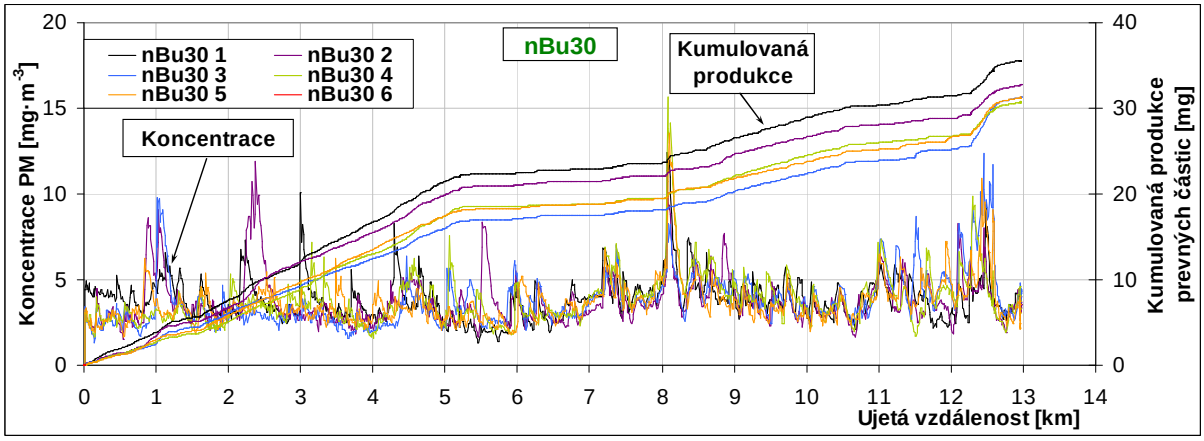
Příloha F: Koncentrace a kumulovaná produkce pevných částic pro vozidlo s jednobodovým vstřikem paliva

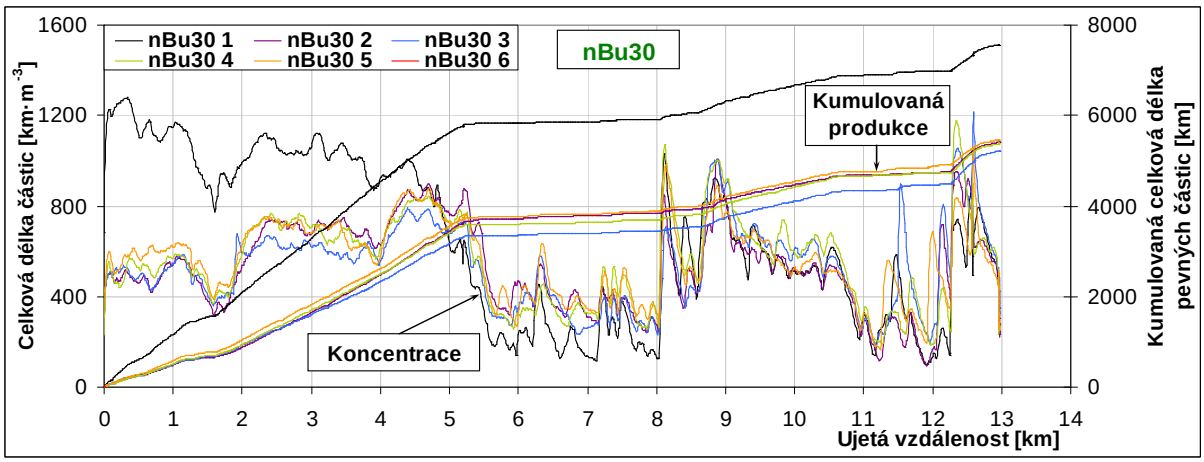


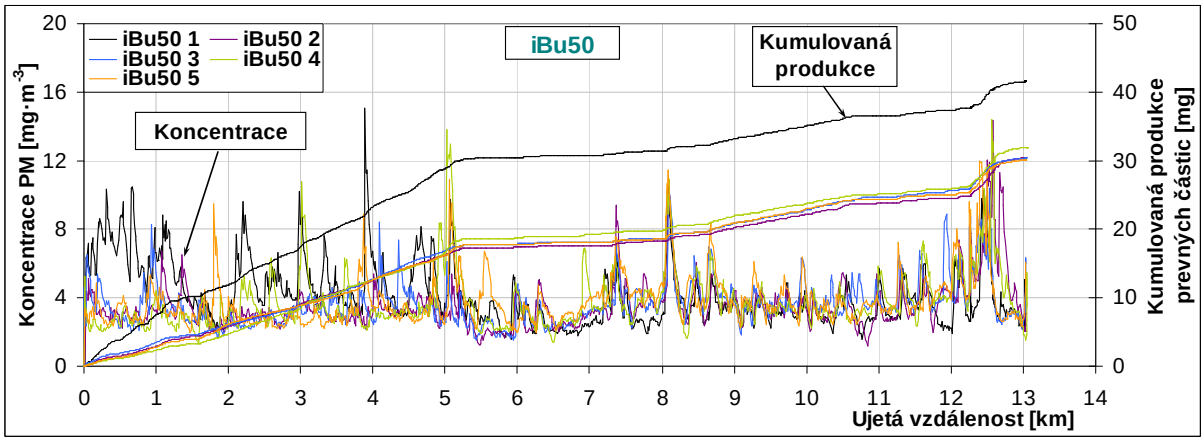


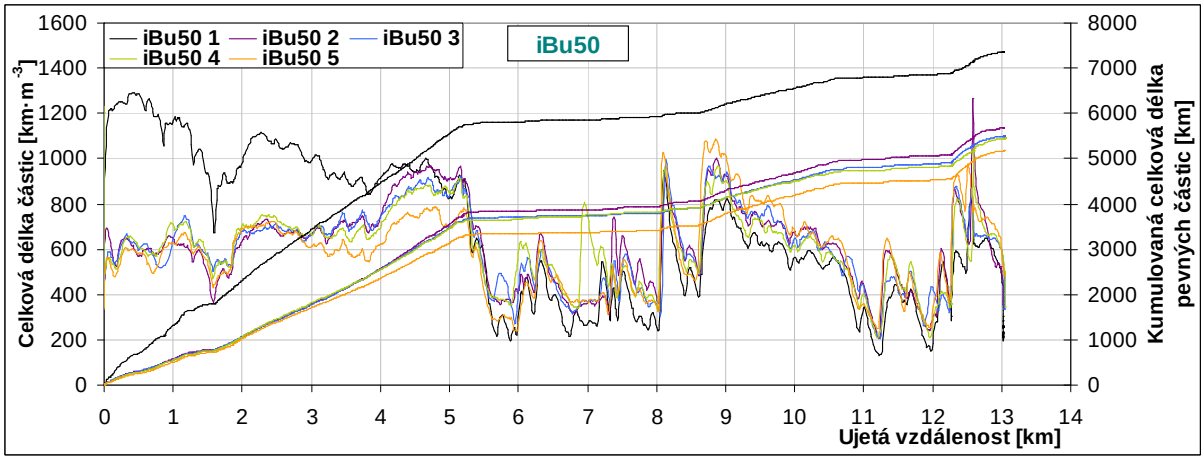


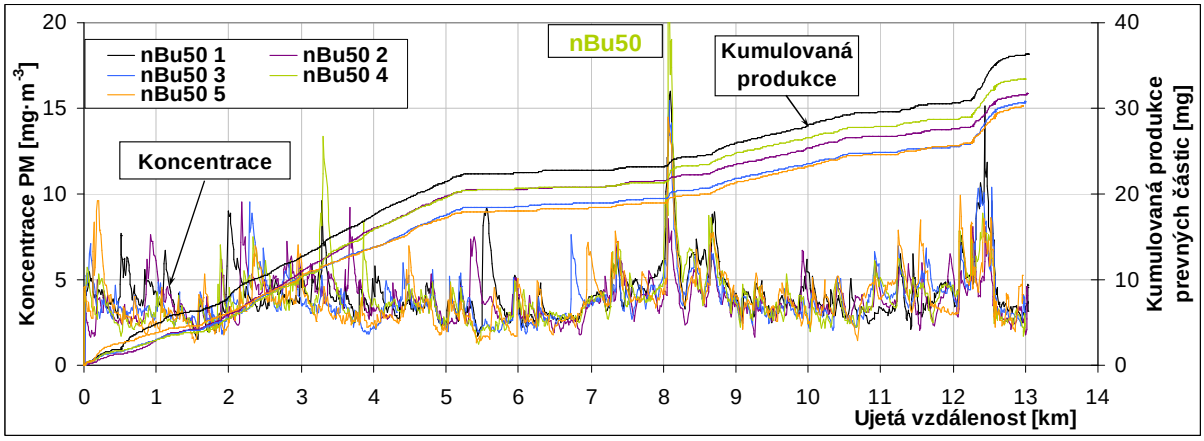


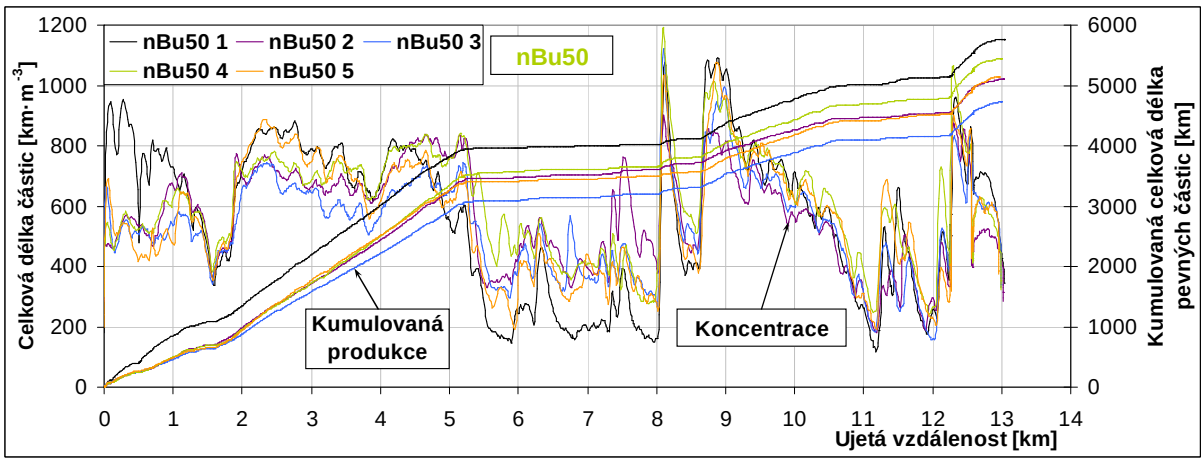

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

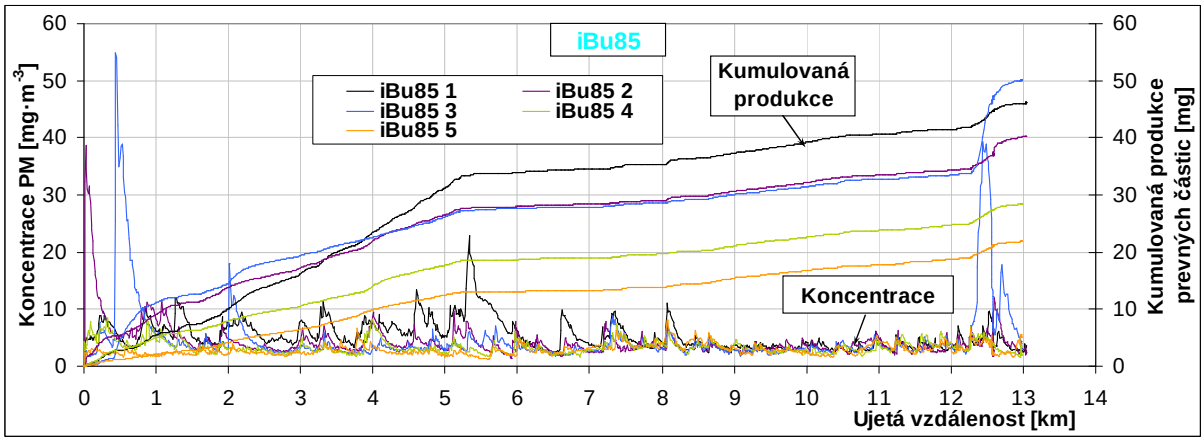

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

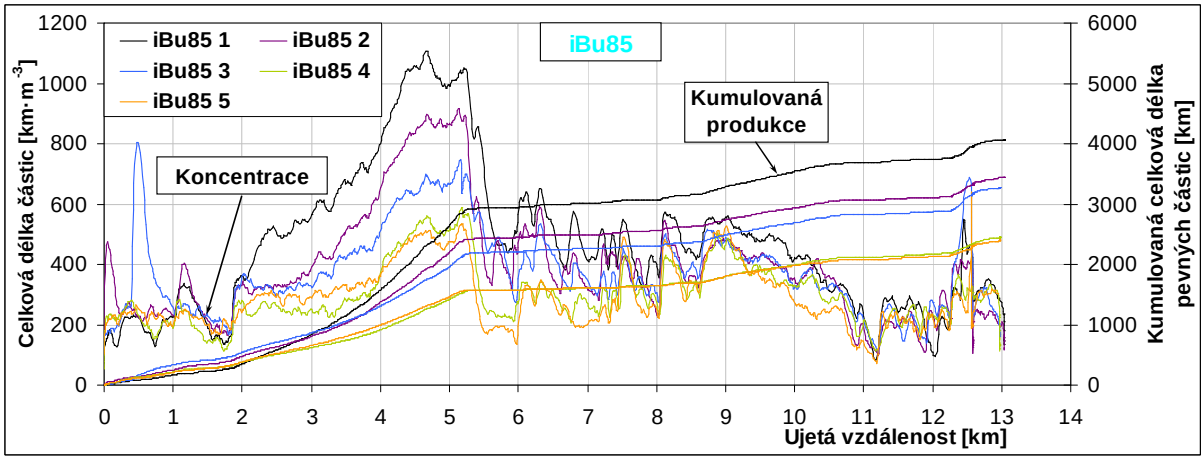

iBu50
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

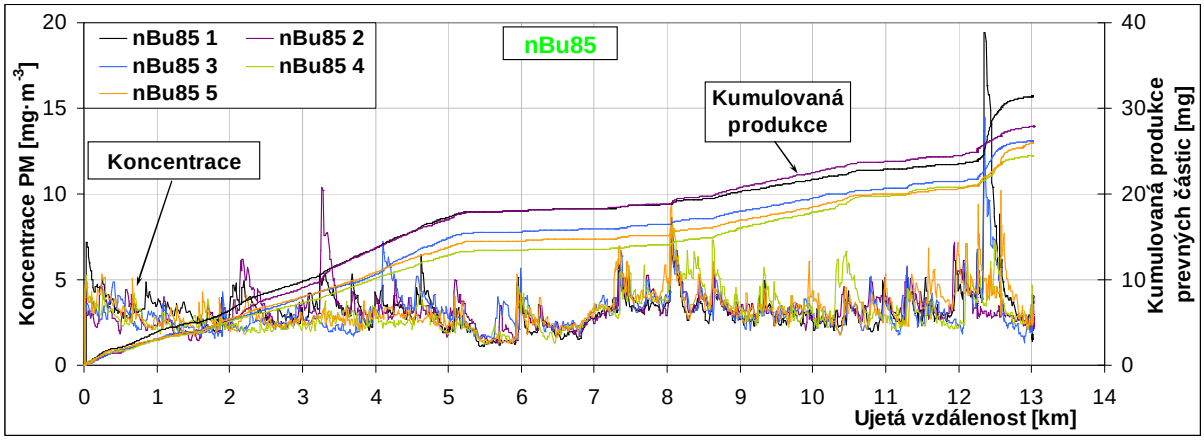

iBu50
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

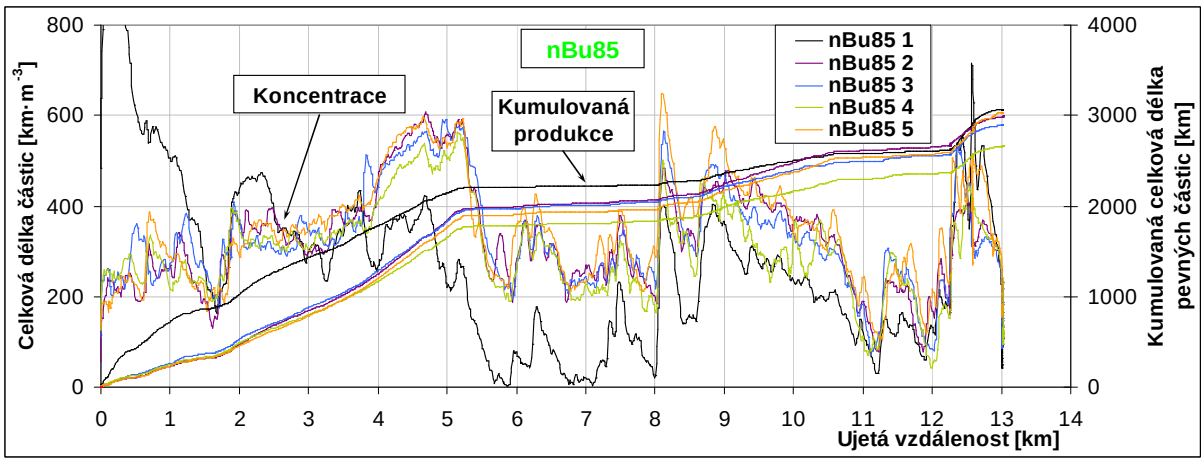

nBu50
nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

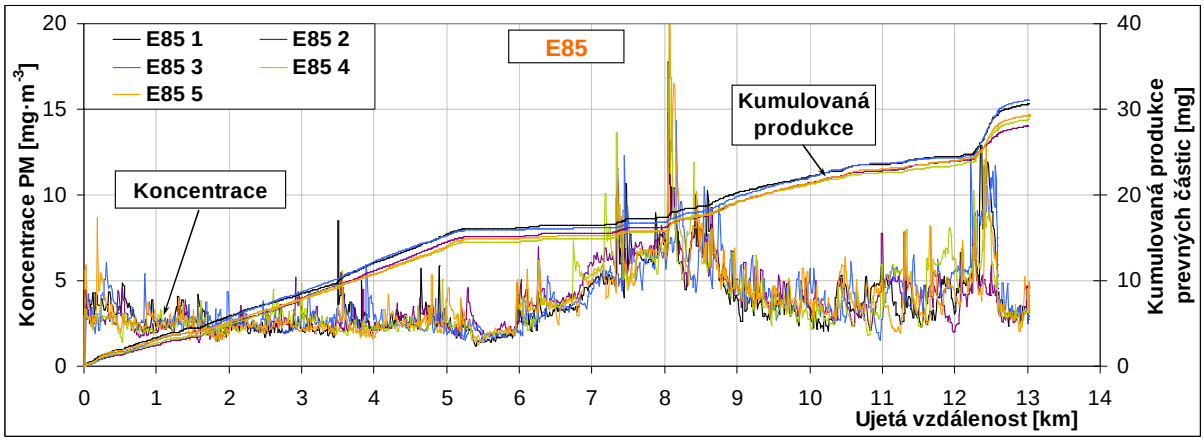

nBu50
nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

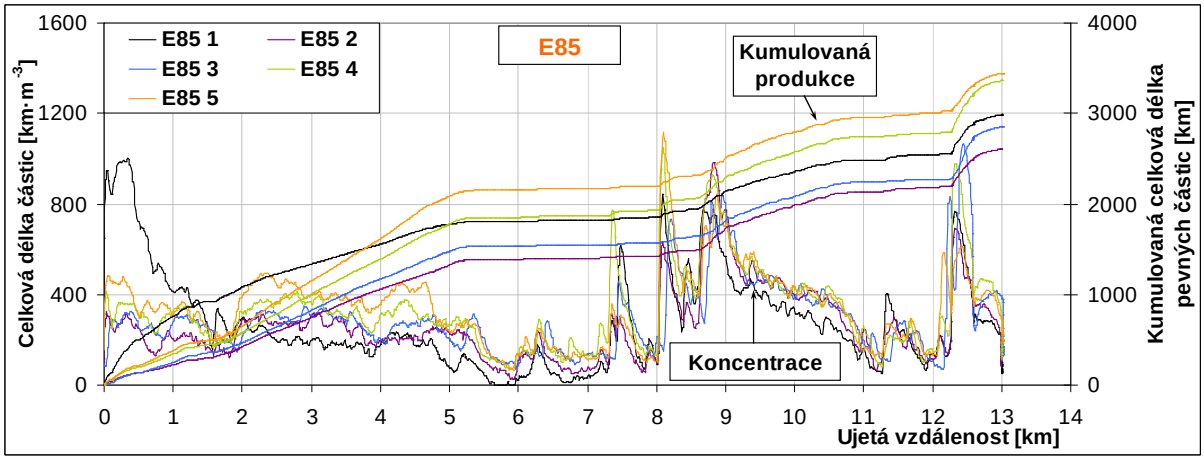

iBu85
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

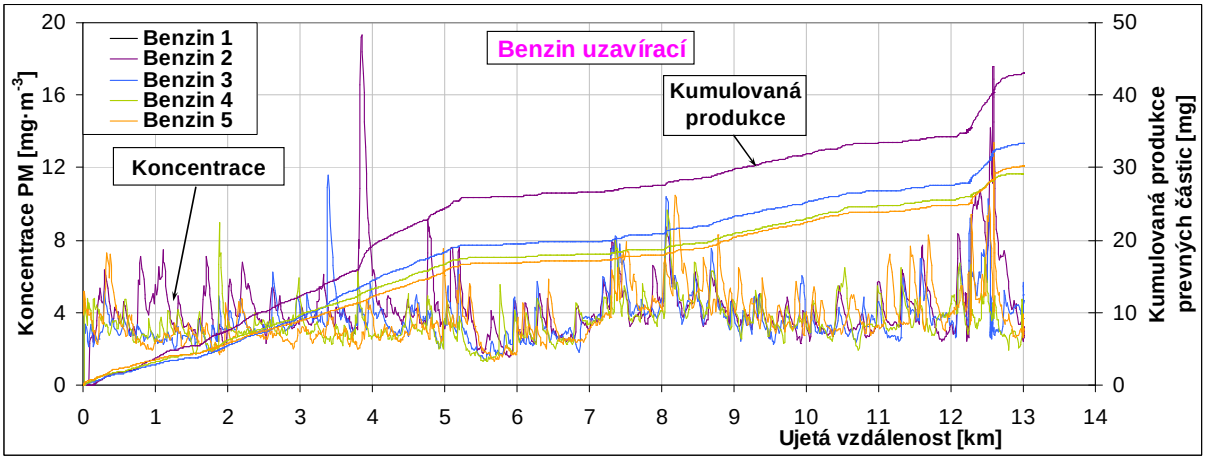

iBu85
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

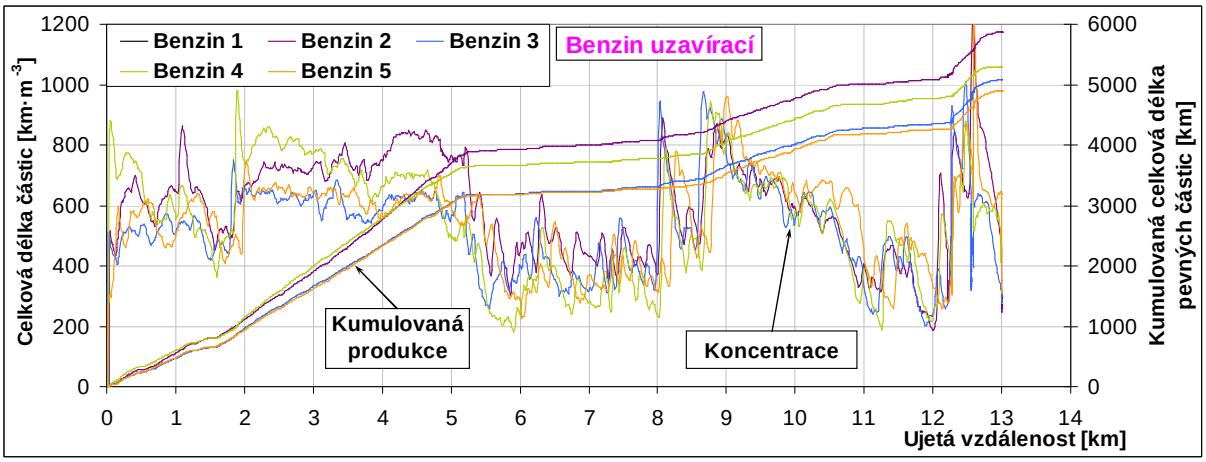

nBu85
nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]


nBu85
nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

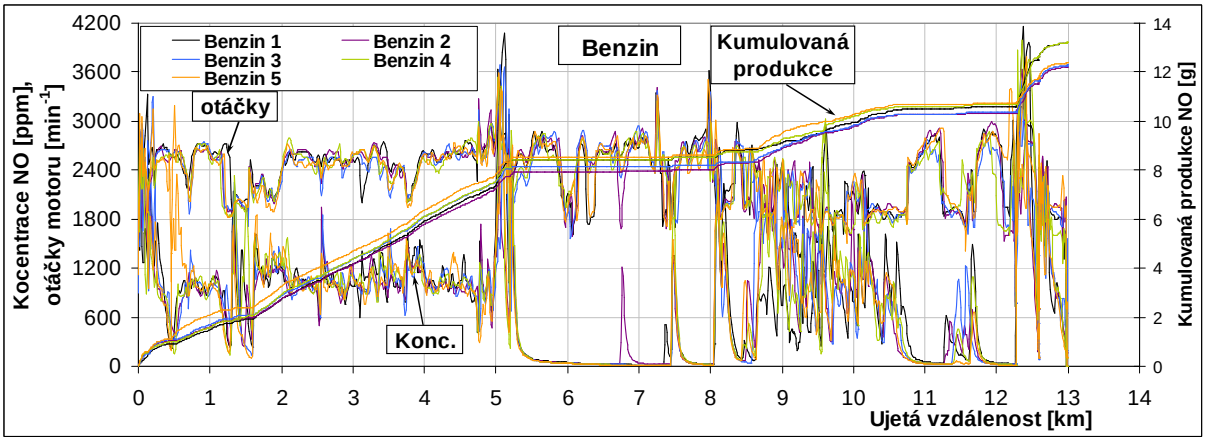

E85
E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

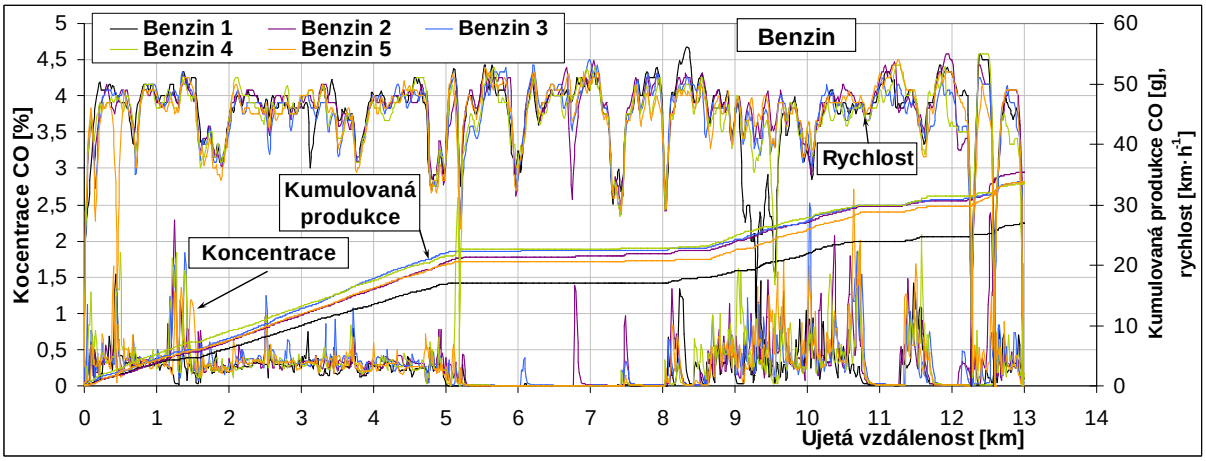

E85
E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

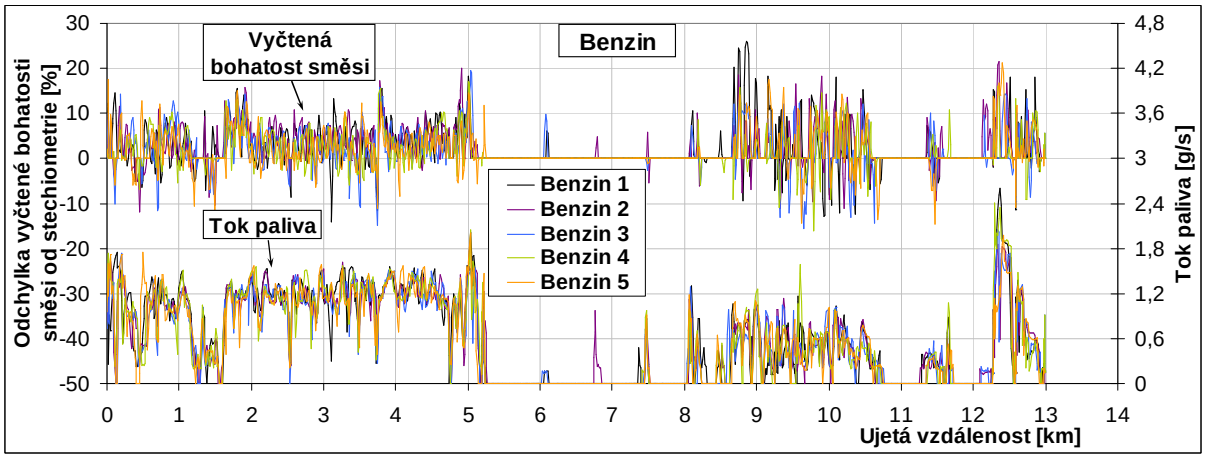

Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4
Benzin 5
Benzin uzavírací
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Koncentrace PM [mg·m-3]
Kumulovaná produkce prevných částic [mg]
Ujetá vzdálenost [km]

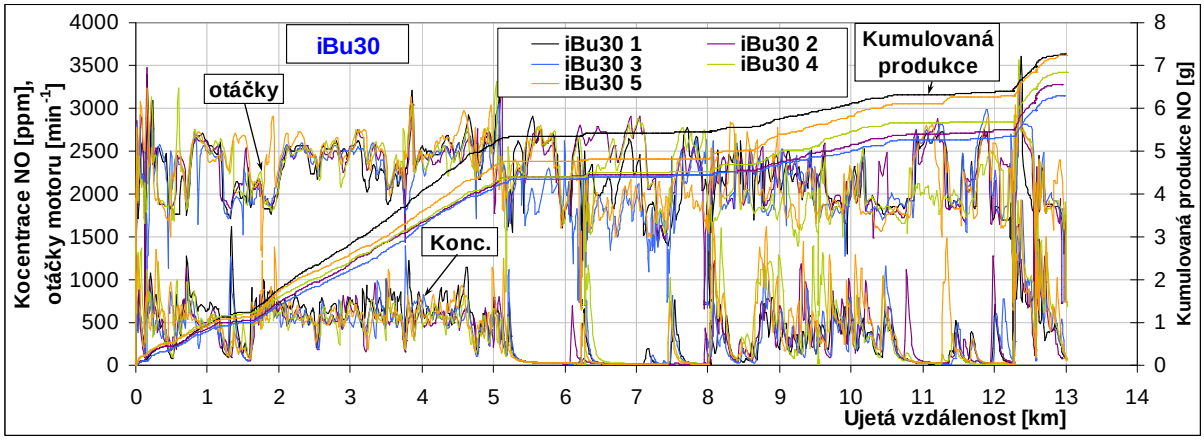

Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4
Benzin 5
Benzin uzavírací
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Celková délka částic [km·m-3]
Kumulovaná celková délka pevných částic [km]
Ujetá vzdálenost [km]

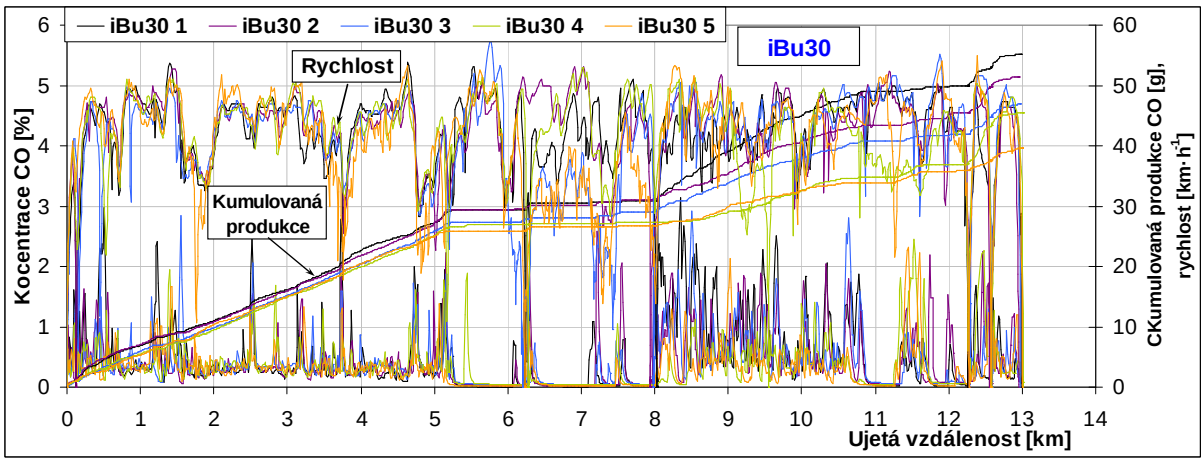
Příloha G: Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s vícebodovým vstřikem paliva provozovaným na jednotlivá paliva

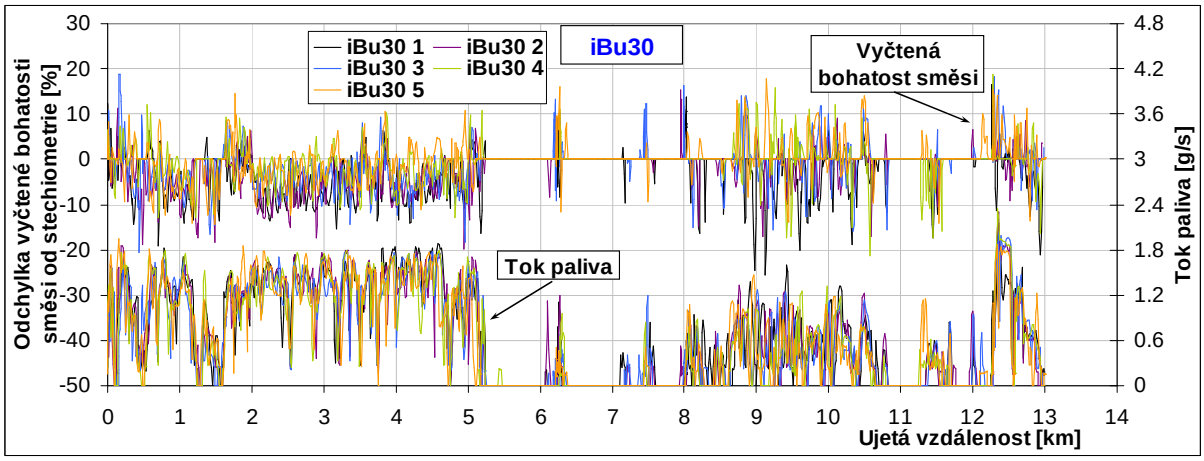


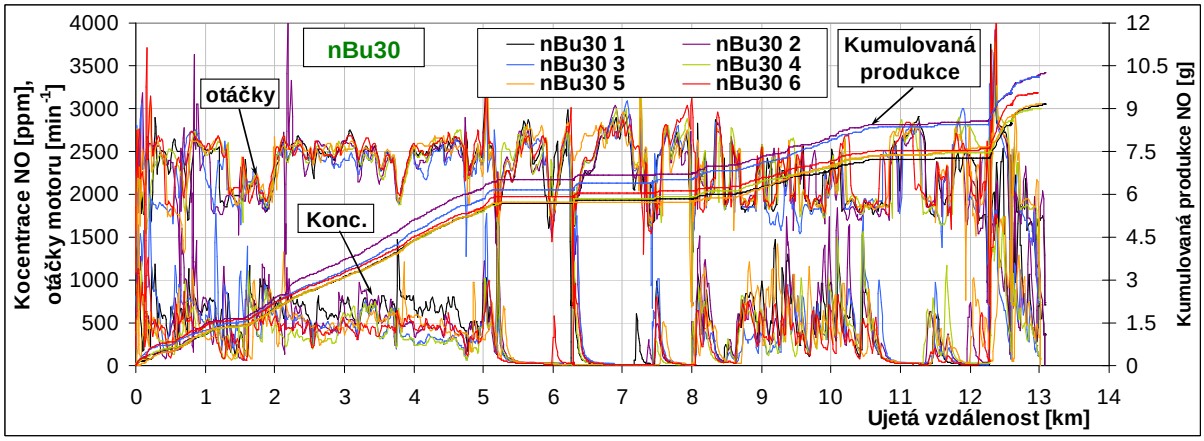


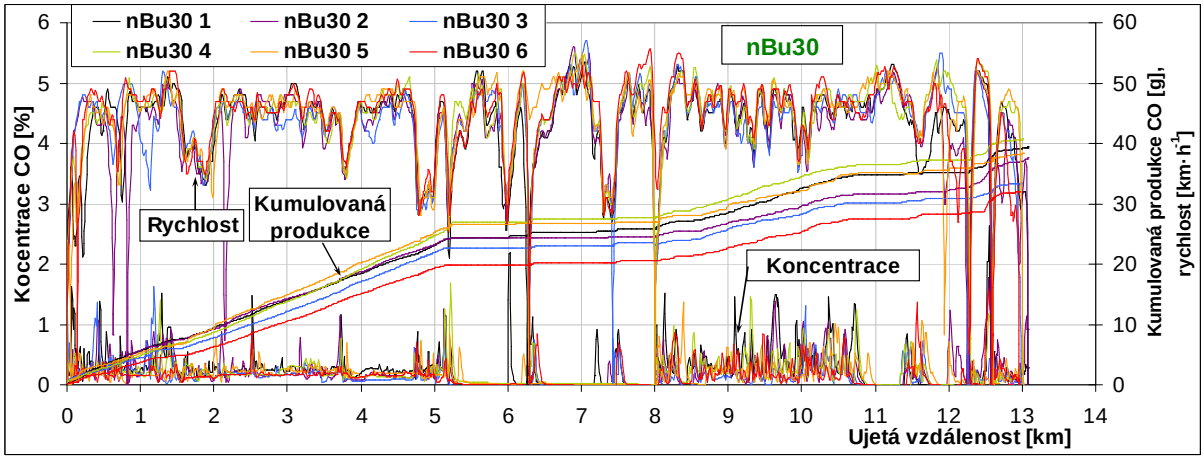


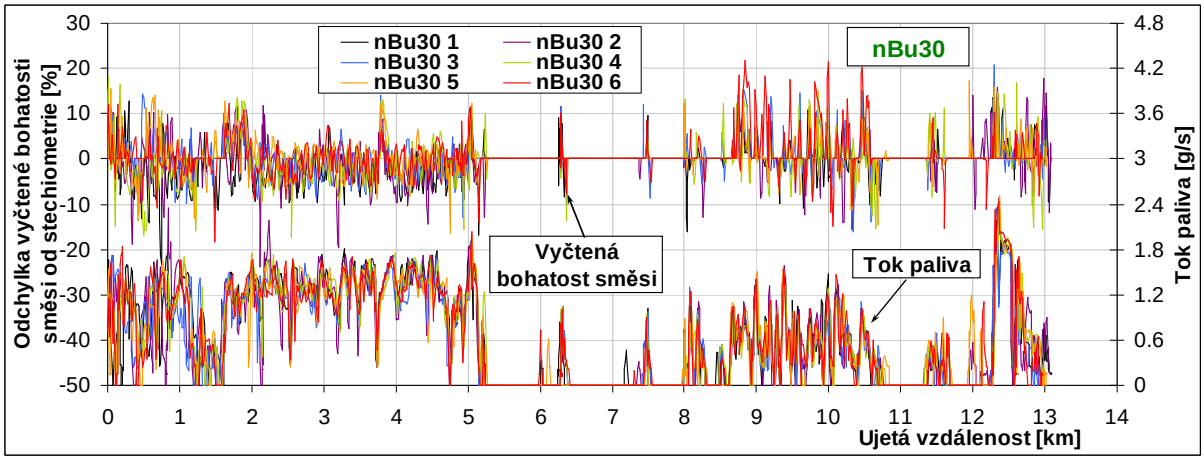

iBu30
iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
Kumulovaná produkce
otáčky
Konc.
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

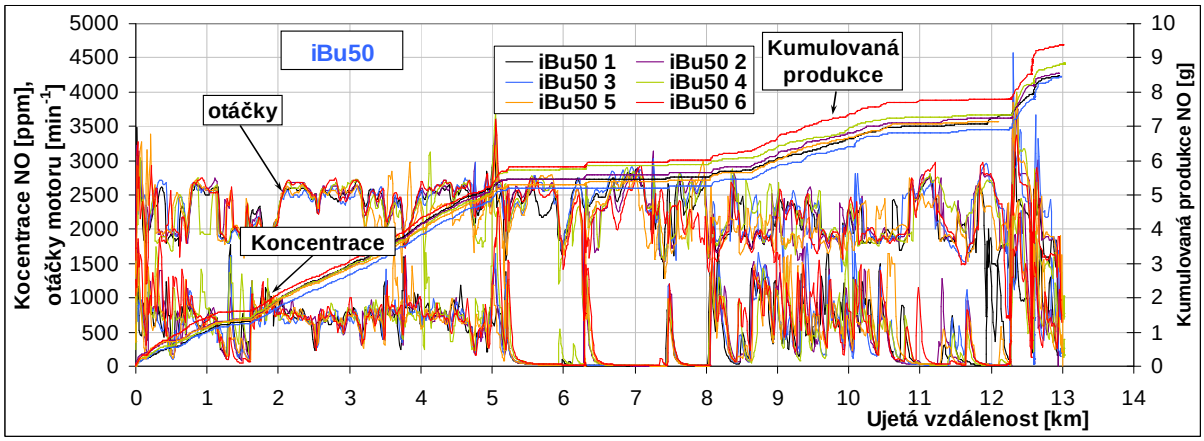

iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
iBu30
Rychlost
Kumulovaná produkce
Kocentrace CO [%]
CKumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

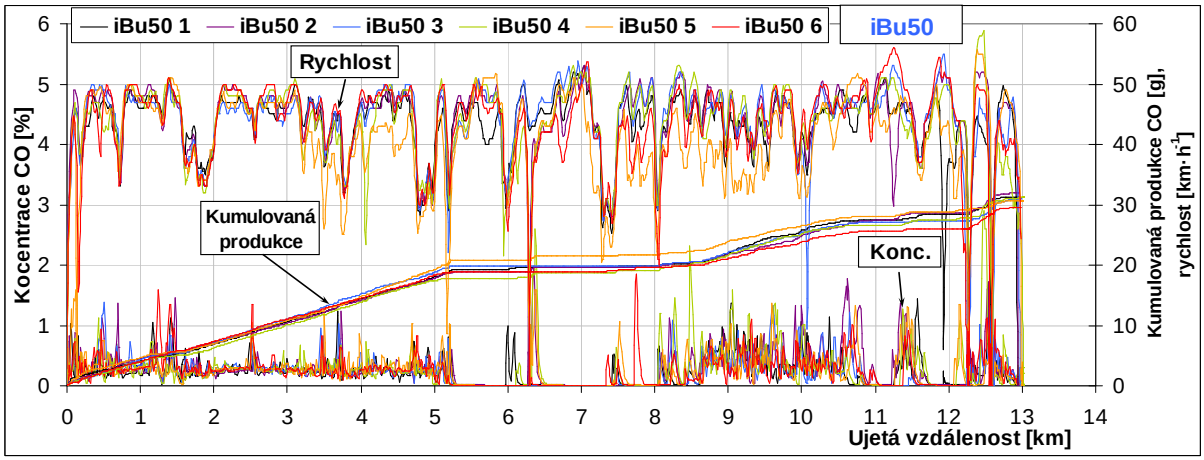

iBu30 1
iBu30 2
iBu30 3
iBu30 4
iBu30 5
iBu30
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Ujetá vzdálenost [km]

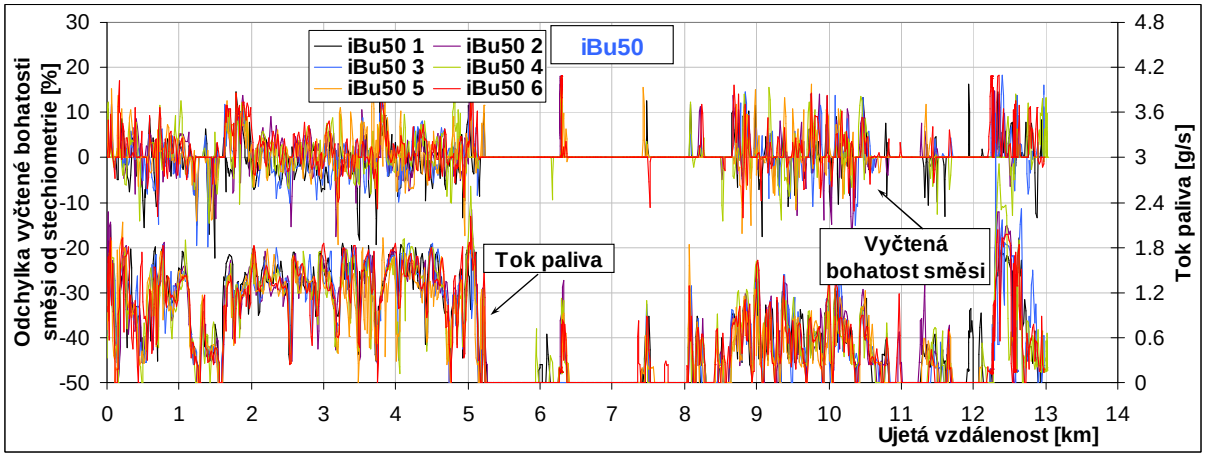

nBu30
nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
Kumulovaná produkce
otáčky
Konc.
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

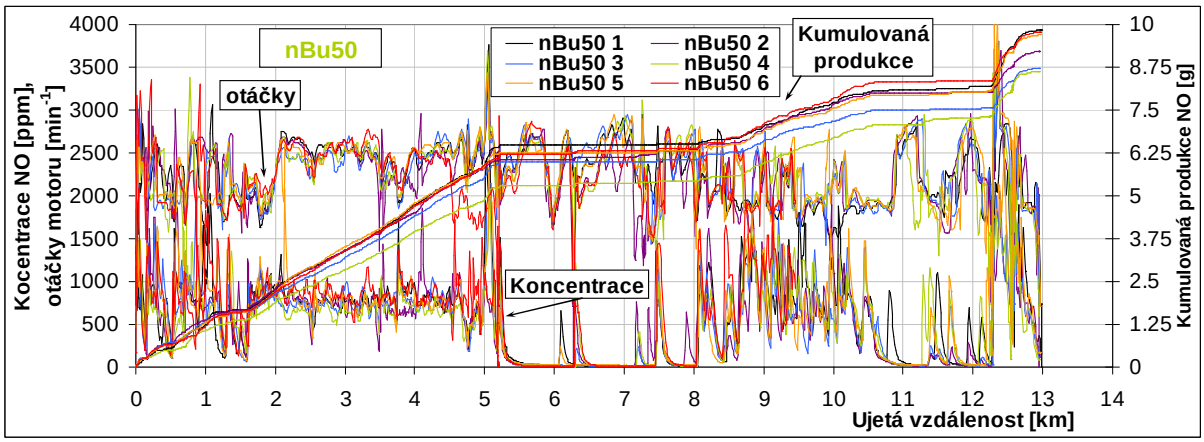

nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
nBu30
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

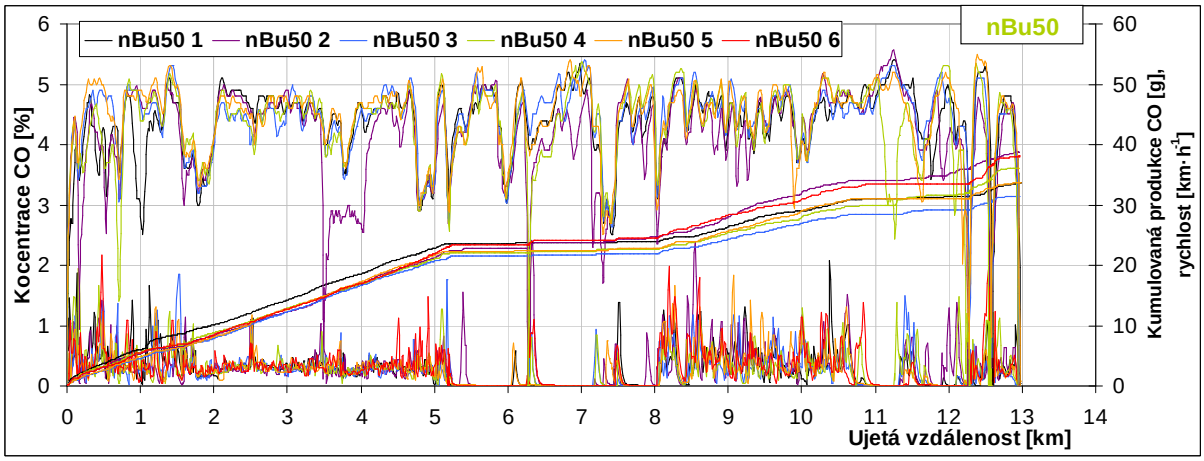

nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu30 6
nBu30
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

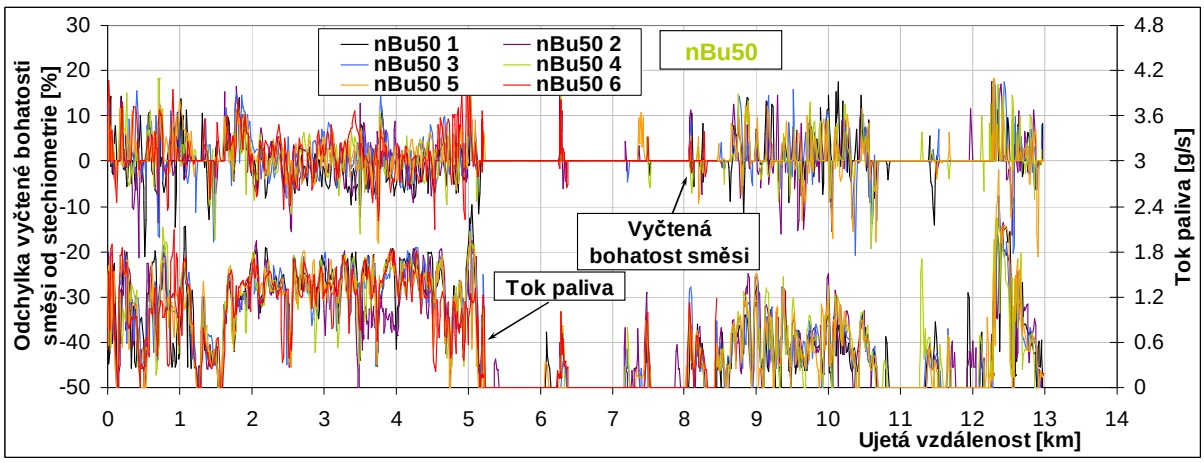

iBu50
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
iBu50 6
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
otáčky
Koncentrace
Kumulovaná produkce
Ujetá vzdálenost [km]

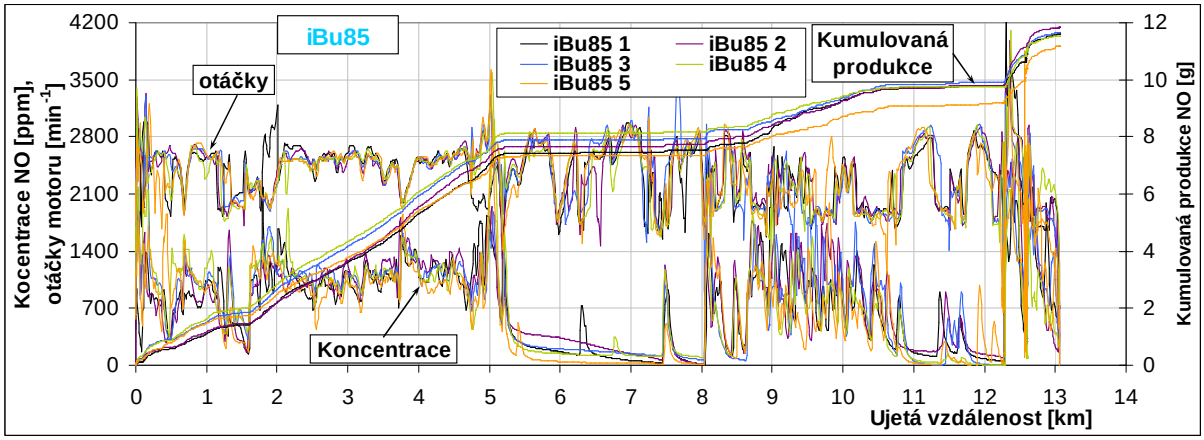

iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
iBu50 6
iBu50
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Konc.
Ujetá vzdálenost [km]

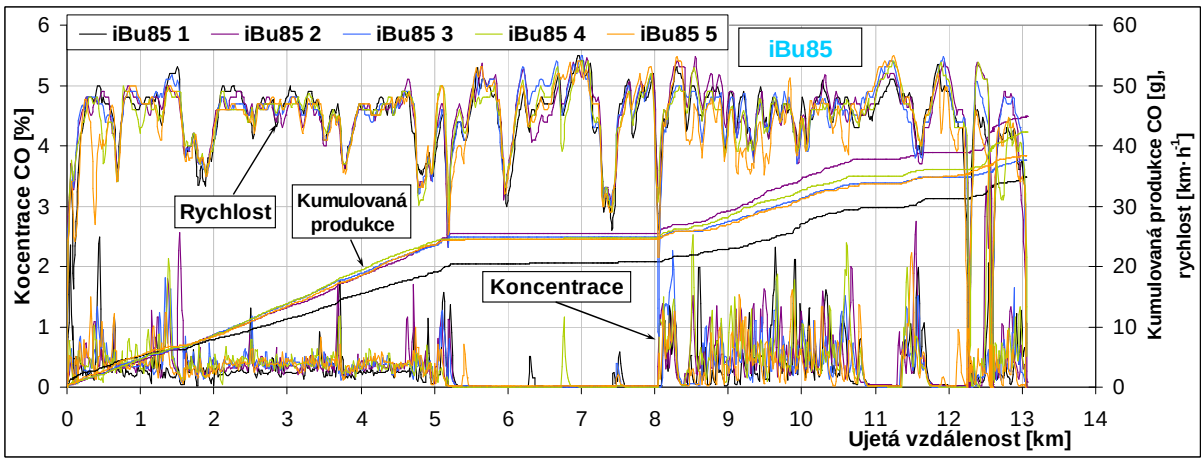

iBu50
iBu50 1
iBu50 2
iBu50 3
iBu50 4
iBu50 5
iBu50 6
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Tok paliva
Vyčtená bohatost směsi
Ujetá vzdálenost [km]

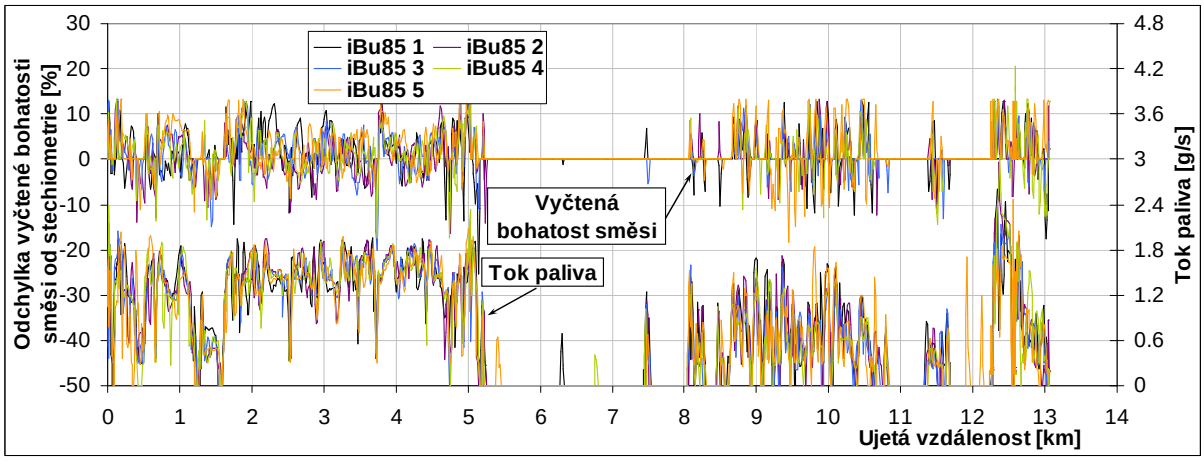

nBu50
nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50 6
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

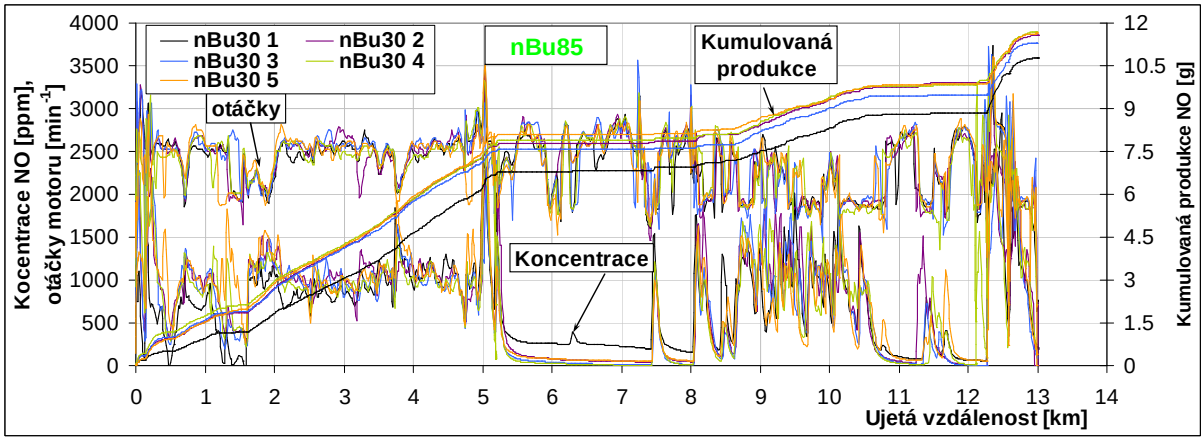

nBu50
nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50 6
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

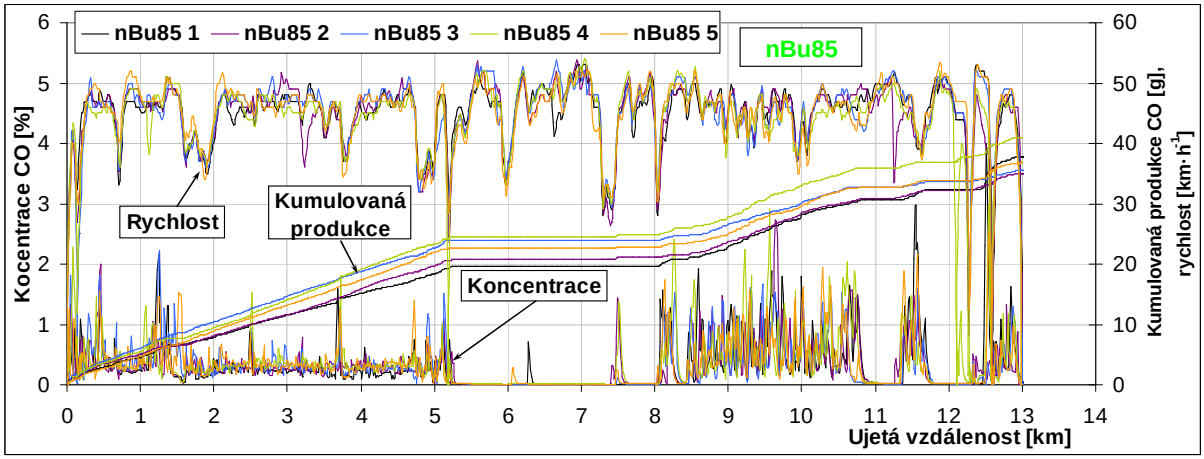

nBu50
nBu50 1
nBu50 2
nBu50 3
nBu50 4
nBu50 5
nBu50 6
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

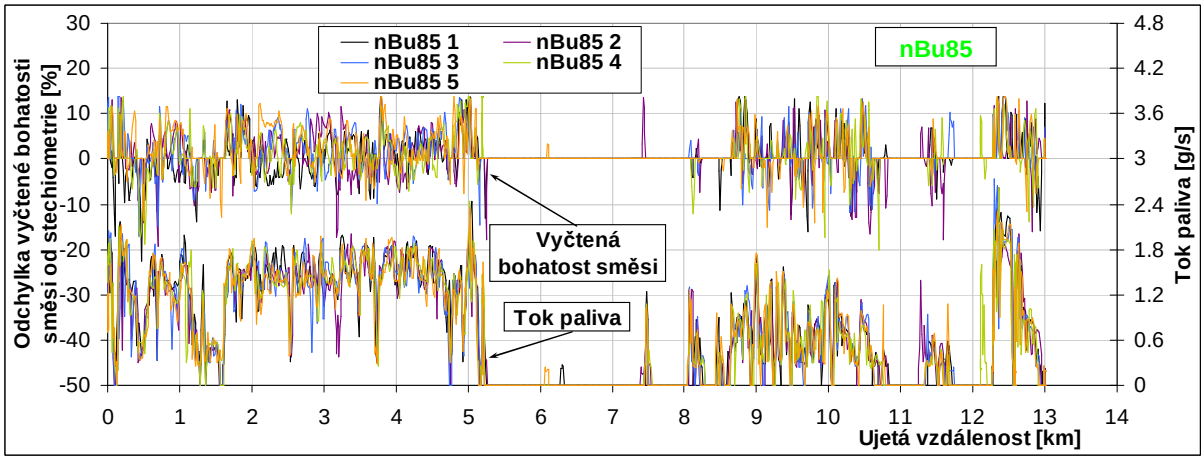

iBu85
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Kumulovaná produkce
otáčky
Koncentrace
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]

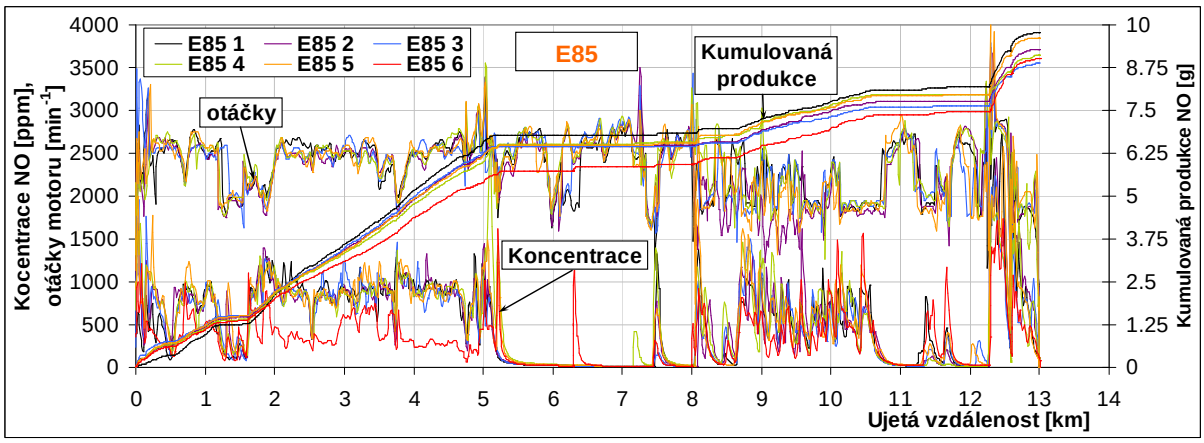

iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
iBu85
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]

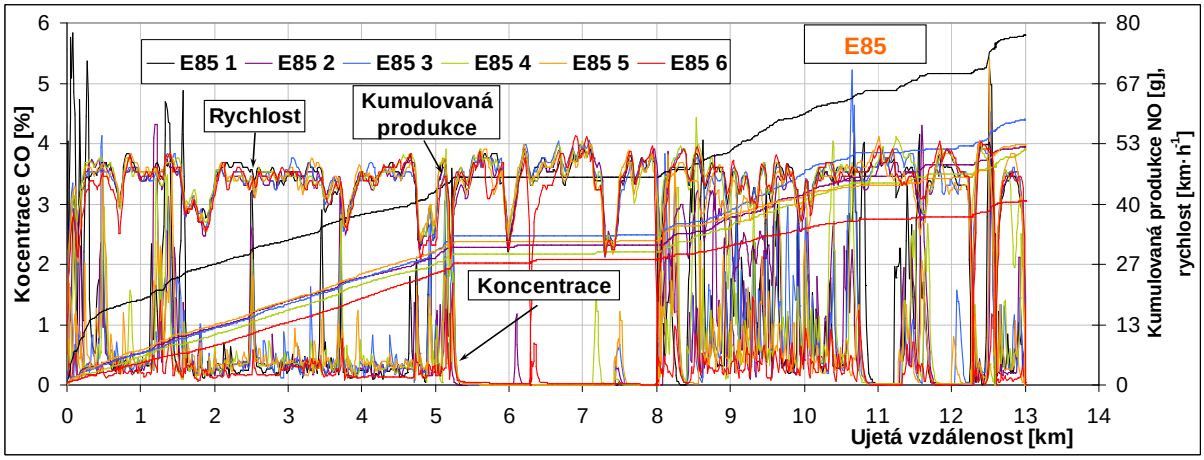

iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5
Výčtená bohatost směsi
Tok paliva
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Ujetá vzdálenost [km]

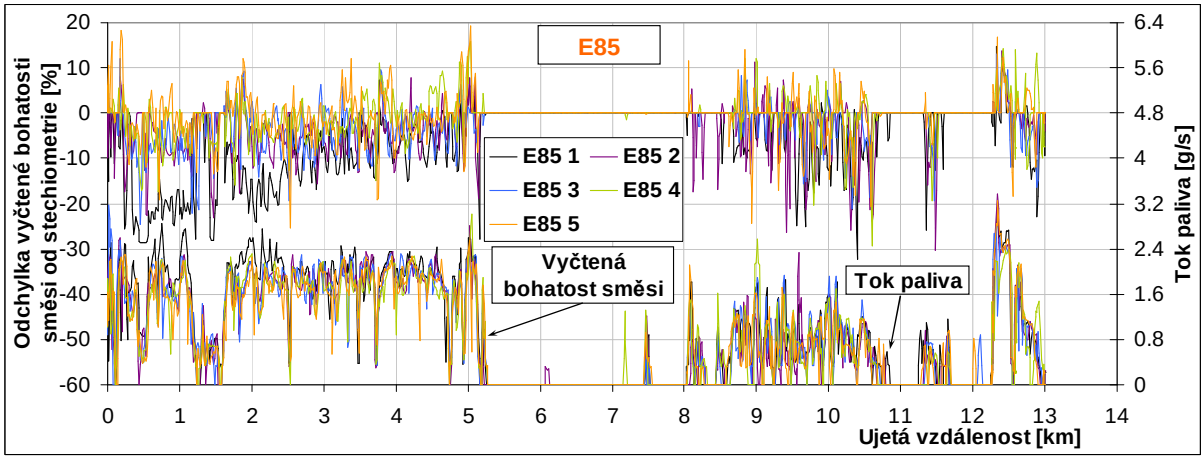

nBu30 1
nBu30 2
nBu30 3
nBu30 4
nBu30 5
nBu85
Kumulovaná produkce
otáčky
Koncentrace
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]


nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
nBu85
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

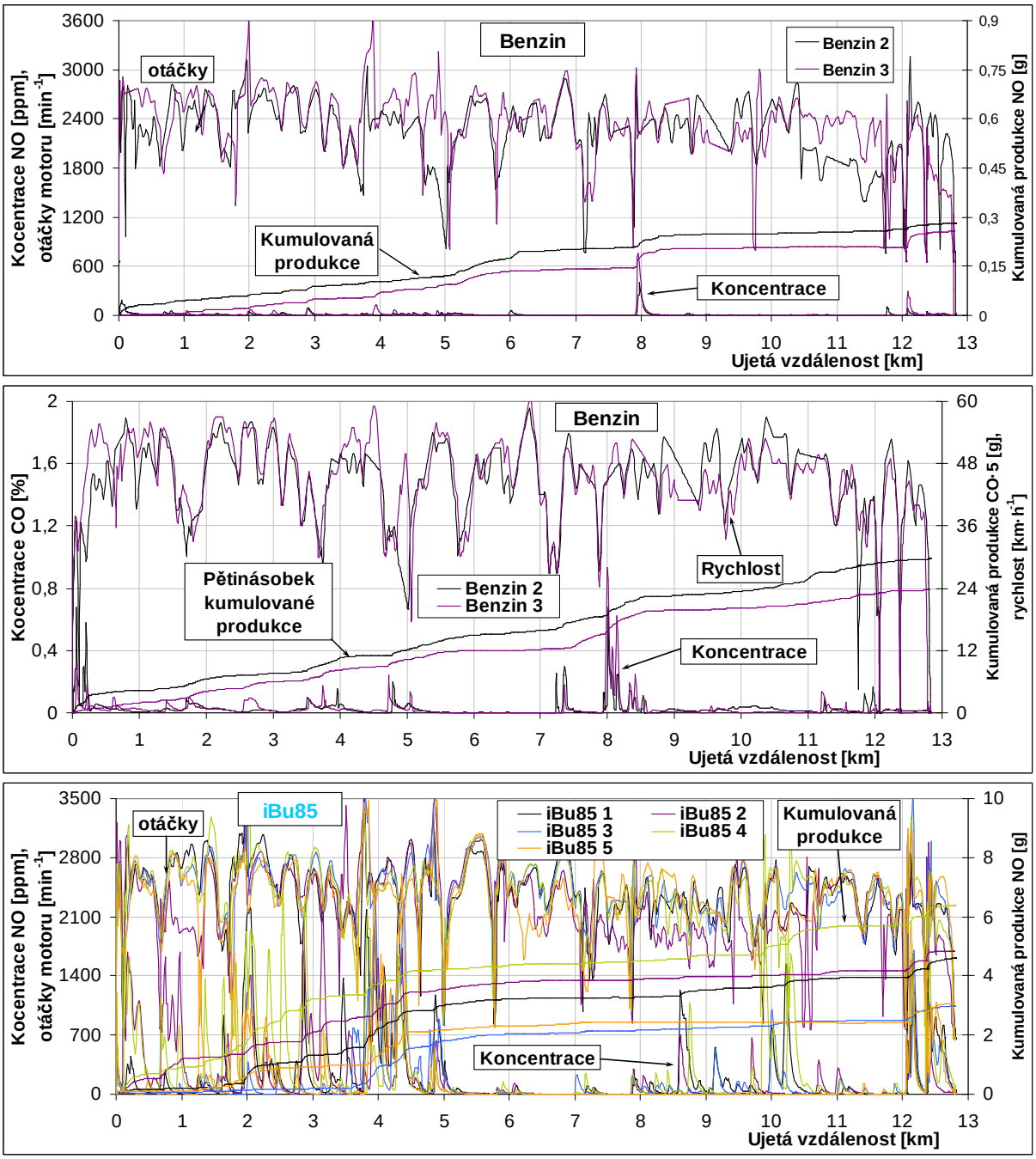

nBu85 1
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4
nBu85 5
nBu85
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Ujetá vzdálenost [km]

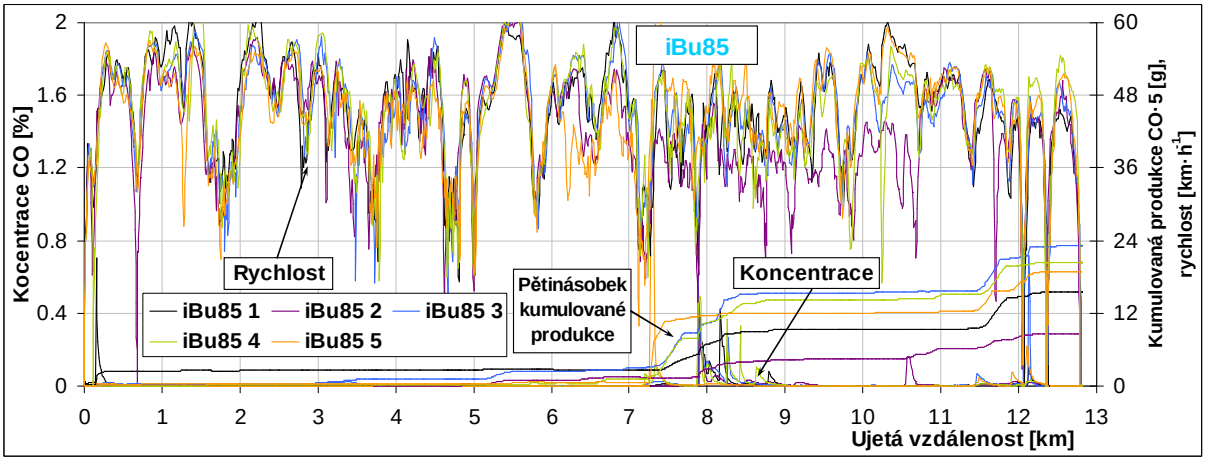

E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
E85 6
E85
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

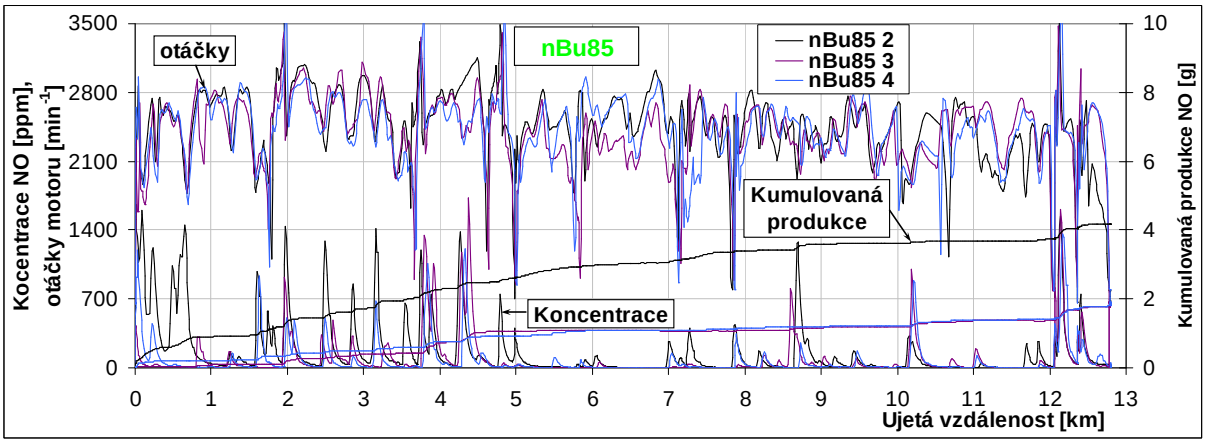

E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
E85 6
E85
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce NO [g], rychlost [km·h-1]
Rychlost
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Ujetá vzdálenost [km]

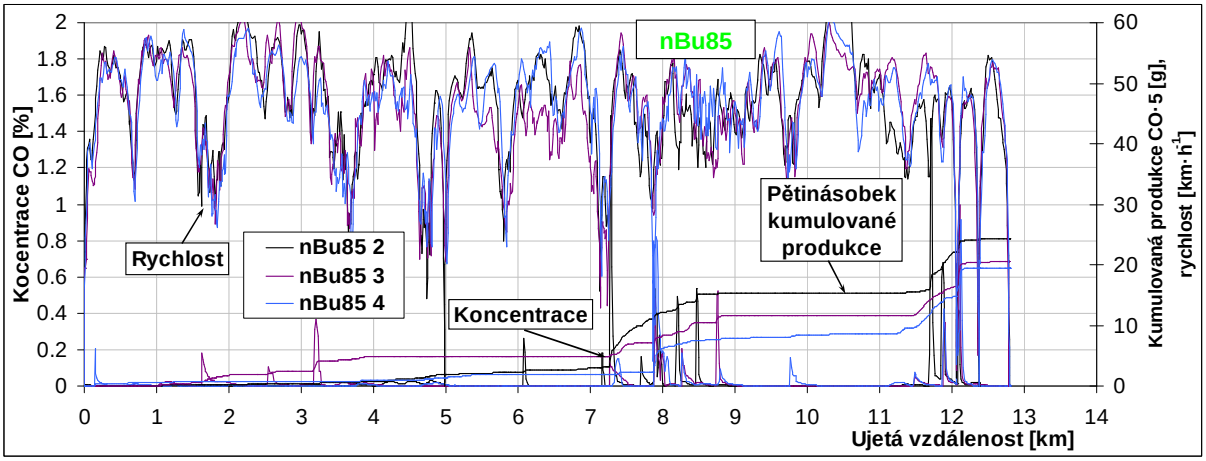

E85
E85 1
E85 2
E85 3
E85 4
E85 5
Vyčtená bohatost směsi
Tok paliva
Odchylka vyčtené bohatosti směsi od stechiometrie [%]
Tok paliva [g/s]
Ujetá vzdálenost [km]
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
6.4
5.6
4.8
4
3.2
2.4
1.6
0.8
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14

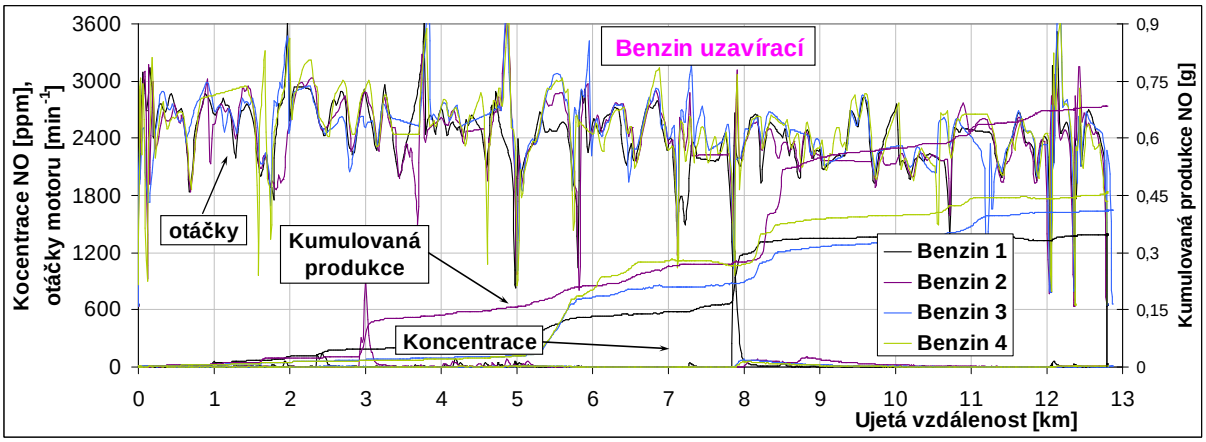
Příloha H: Rychlosti vozidla, otáčky motoru, odchylky bohatosti směsi od stechiometrického složení, toky paliva a koncentrace a okamžité průtoky CO a NO pro vozidlo s vícebodovým vstřikem paliva a fungujícím třísložkovým katalytickým reaktorem provozovaným na jednotlivá paliva

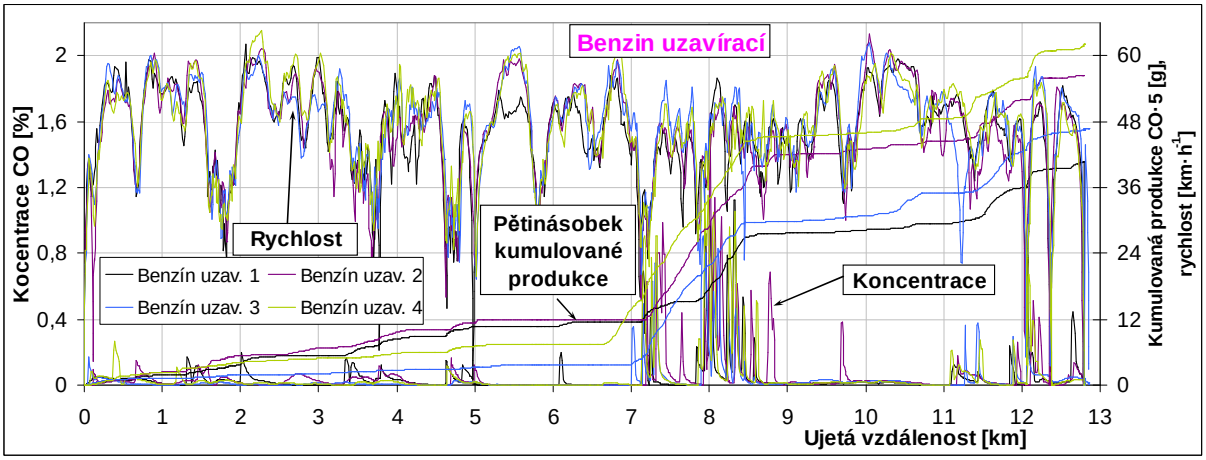



iBu85
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO·5 [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]
Rychlost
Pětinásobek kumulované produkce
Koncentrace
iBu85 1
iBu85 2
iBu85 3
iBu85 4
iBu85 5


nBu85
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4


nBu85
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO·5 [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]
Rychlost
Pětinásobek kumulované produkce
Koncentrace
nBu85 2
nBu85 3
nBu85 4


Benzin uzavírací
Kocentrace NO [ppm], otáčky motoru [min-1]
Kumulovaná produkce NO [g]
Ujetá vzdálenost [km]
otáčky
Kumulovaná produkce
Koncentrace
Benzin 1
Benzin 2
Benzin 3
Benzin 4


Benzin uzavírací
Kocentrace CO [%]
Kumulovaná produkce CO·5 [g], rychlost [km·h-1]
Ujetá vzdálenost [km]
Rychlost
Pětinásobek kumulované produkce
Koncentrace
Benzín uzav. 1
Benzín uzav. 2
Benzín uzav. 3
Benzín uzav. 4
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2
0
12
24
36
48
60
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

Příloha I: Odvození přepočtu koncentrace mezí suchými a mokrými spalinami a měrné produkce vztažené na hmotnostní množství spotřebovaného paliva

Předpoklady: koncentrace atmosférické vlhkosti a oxidu uhličitého, jsou vzhledem ke koncentracím ve spalinách, zanedbatelné. Dále je zanedbána koncentrace vodíku ve spalinách.

$$c_{wx}=\frac{m_x}{m_{wet}};\quad c_{dx}=\frac{m_x}{m_{dry}}$$

$$m_{wet}=m_{dry}+m_{H_2O}=m_{dry}+c_{w\,H_2O}\;m_{wet}$$

z rovnosti molárního množství v složky ***x*** v suchých a mokrých plynech pak vyplývá

$$n_{wx}=x_{dx}$$

$$c_{wx}\;m_{wet}=c_{dx}\;m_{dry}$$

$$c_{wx}=c_{dx}\;\frac{m_{dry}}{m_{wet}}=c_{dx}\;\frac{m_{wet}\quad m_{H_2O}}{m_{wet}}=c_{dx}\;\frac{m_{wet}\quad m_{wer}\;c_{H_2O}}{m_{wet}}=c_{dx}\left(1\quad c_{wH_2O}\right)$$

molární podíly jednotlivých prvků v palivu

$$H=\frac{n_H}{n_p};\quad C=\frac{n_C}{n_p}$$

$$n_H=\frac{H}{C}\;n_C$$

Protože molekula vody obsahuje dva atomy vodíku, bude molární množství vody, připadající na jeden mol uhlíku, poloviční

$$n_{H_2O}=\frac{H}{2\;C}\;n_C$$

molární množství uhlíku je pak rovno součtu molárního množství jednotlivých složek, protože každá z nich obsahuje právě jeden atom uhlíku v molekule

$$n_{H_2O}=\frac{H}{2\cdot C}\cdot\left(n_{CO}+n_{CO_2}+n_{HC}\right)$$

molární množství lze dále rozepsat jako součin množství výfukových plynu $\boldsymbol{n_{VP}}$ a koncentrace.

$$n_{VP}\cdot c_{wH_2O}=\frac{H}{2\cdot C}\cdot\left(n_{VP}\cdot c_{wCO}+n_{VP}\cdot c_{wCO_2}+n_{VP}\cdot c_{wHC}\right)$$

$$c_{wH_2O}=\frac{H}{2\;C}\left(c_{wCO}+c_{wCO_2}+c_{wHC}\right)$$

nyní s využitím přepočtu z koncentrace v suchých plynech na mokré můžeme vztah dále upravit.

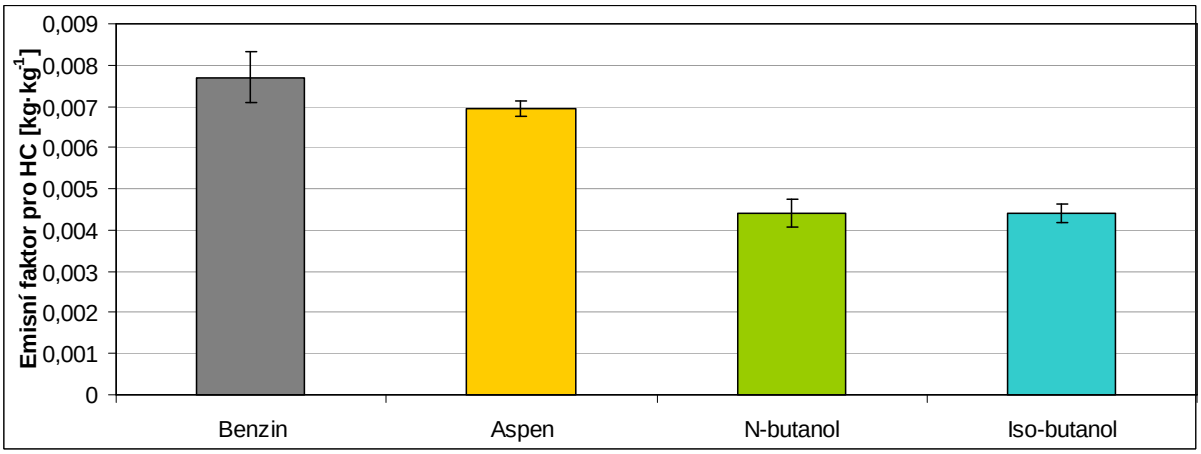
$$c_{wH_2O}=\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}\left(1\quad c_{wH_2O}\right)+c_{dCO_2}\left(1\quad c_{wH_2O}\right)+c_{wHC}\right)=\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}\quad c_{dCO}\;c_{wH_2O}+c_{dCO_2}\quad c_{dCO_2}\;c_{wH_2O}+c_{wHC}\right)$$

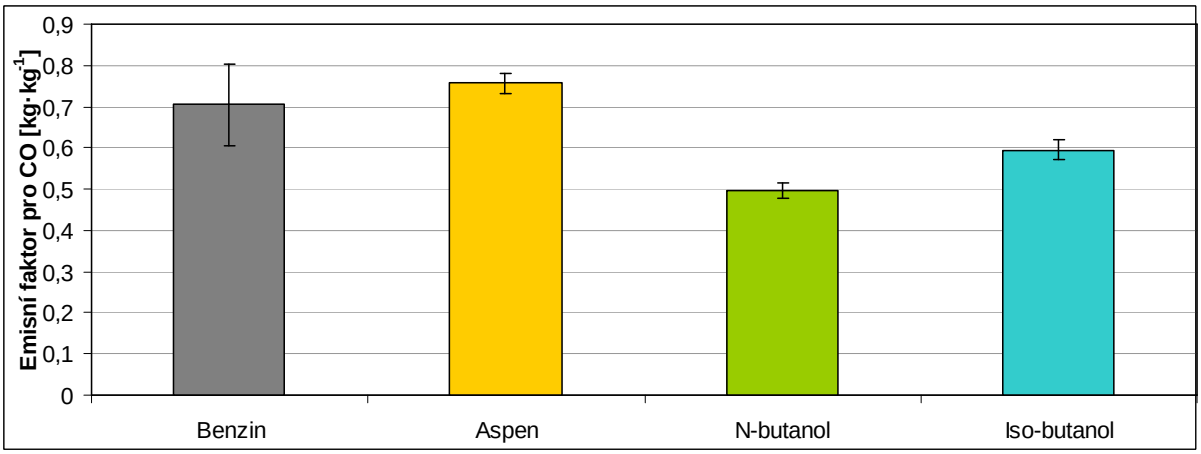
$$c_{wH_2O}\left[1+\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}\right)\right]=\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}+c_{wHC}\right)$$

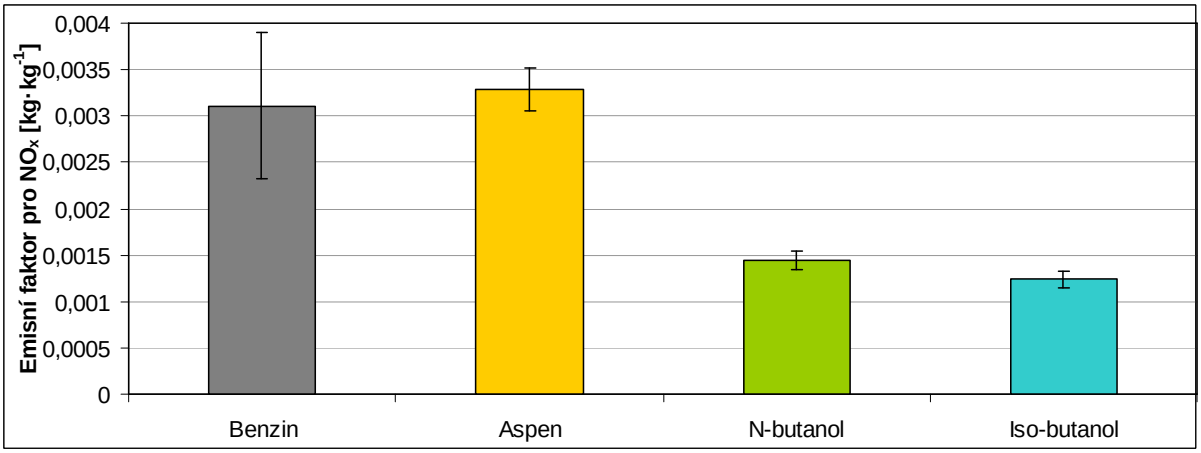
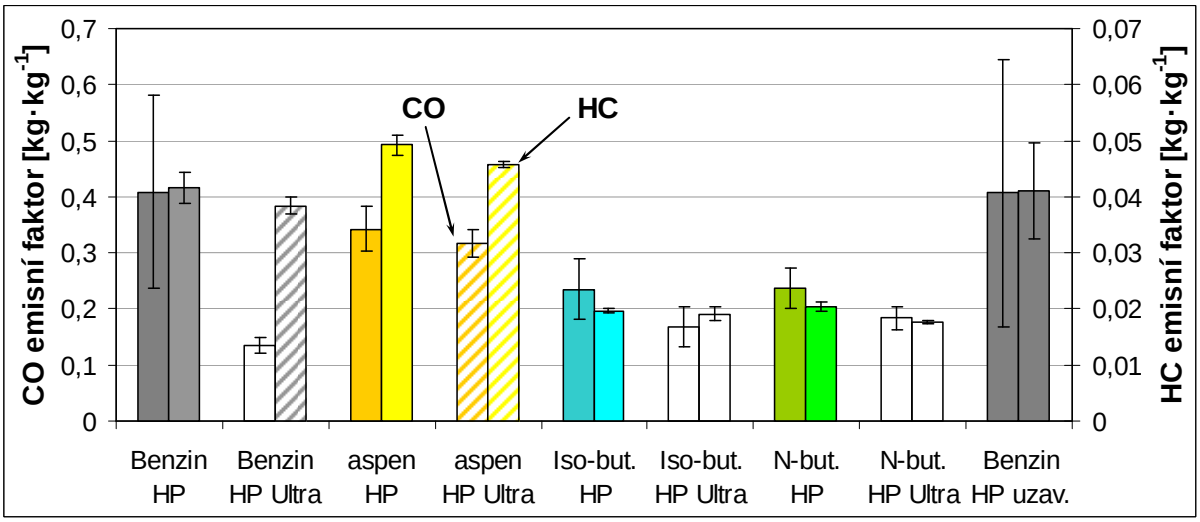
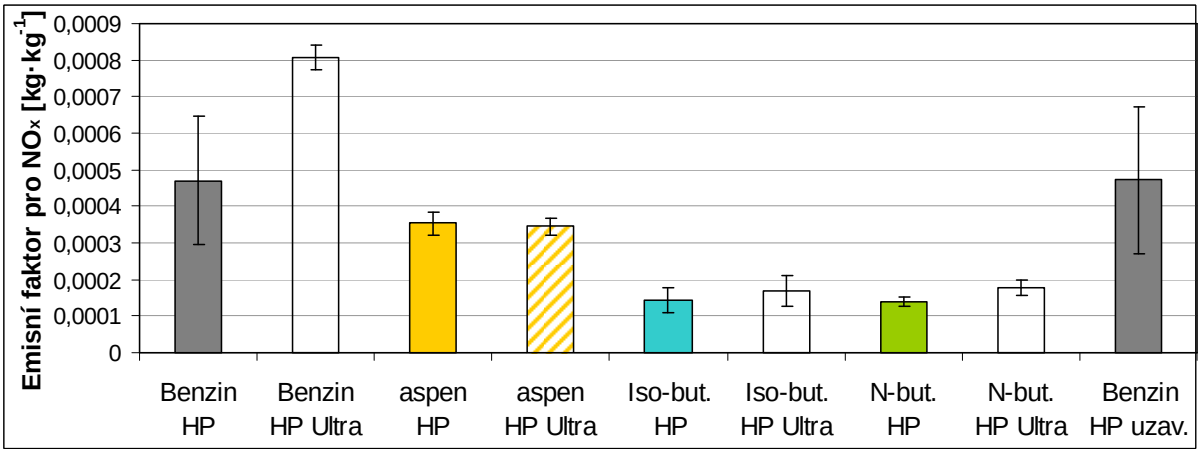
Nyní již lze konečně dospět ke vztahu pro koncentraci vodní páry v mokrých výfukových plynech

$$c_{wH_2O}=\frac{\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}+c_{wHC}\right)}{1+\frac{H}{2\;C}\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}\right)}=\frac{\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}+c_{wHC}\right)}{\frac{2\;C}{H}+\left(c_{dCO}+c_{dCO_2}\right)}$$

Příloha J: Emisní faktory pro malý čtyřdobý motor při jmenovitém výkonu







Příloha K: Emisní faktory pro malý dvoudobý motor při jmenovitém výkonu