

Spolupráce letecké a (vysokorychlostní) železniční dopravy

Jiří Pohl, Siemens Mobility, s.r.o.
člen Výboru pro udržitelnou energetiku Rady vlády pro udržitelný rozvoj
člen Výboru pro udržitelnou dopravu Rady vlády pro udržitelný rozvoj

Podmínka funkčnosti lidské společnosti: komunikace

Komunikace má dvě formy:

- **přenos informací (telematika),**
- **přenos osob a věcí (doprava).**

Přenos informací zaznamenal v průběhu posledních let zásadní pokrok. Informace se podařilo oddělit od hmoty (papíru, filmu, ...) a jsou přenášeny formou kombinace nul a jedniček v elektromagnetickém poli.

V podobně mobilních telefonů, internetu a dalších forem se moderní informační technologie rychle rozšířily po celém světě.

Fyzikální podmínky jsou příznivé:

- **informace se v elektronické podobě šíří rychlostí světla,**
- **spotřeba energie je zcela minimální,**

Přenos informací moderními elektronickými technologiemi má velmi vysokou rychlost a nízkou energetickou náročnost. Proto se může rozvíjet velmi intenzivně i na velké vzdálenosti do odlehlých území (mobilní telefonní sítě, internet, ...).

Podmínka funkčnosti lidské společnosti: doprava

Doprava osob a zboží po území však naráží na dva limity:

- časovou náročnost (nepřímo úměrnou rychlosti: $T = L / v$),
- energetickou náročnost (úměrnou druhé mocnině rychlosti: $A = L \cdot k \cdot v^2$)

Avšak lidská společnost potřebuje takové formy mobility, které jsou:

- rychlé,
- energeticky nenáročné.

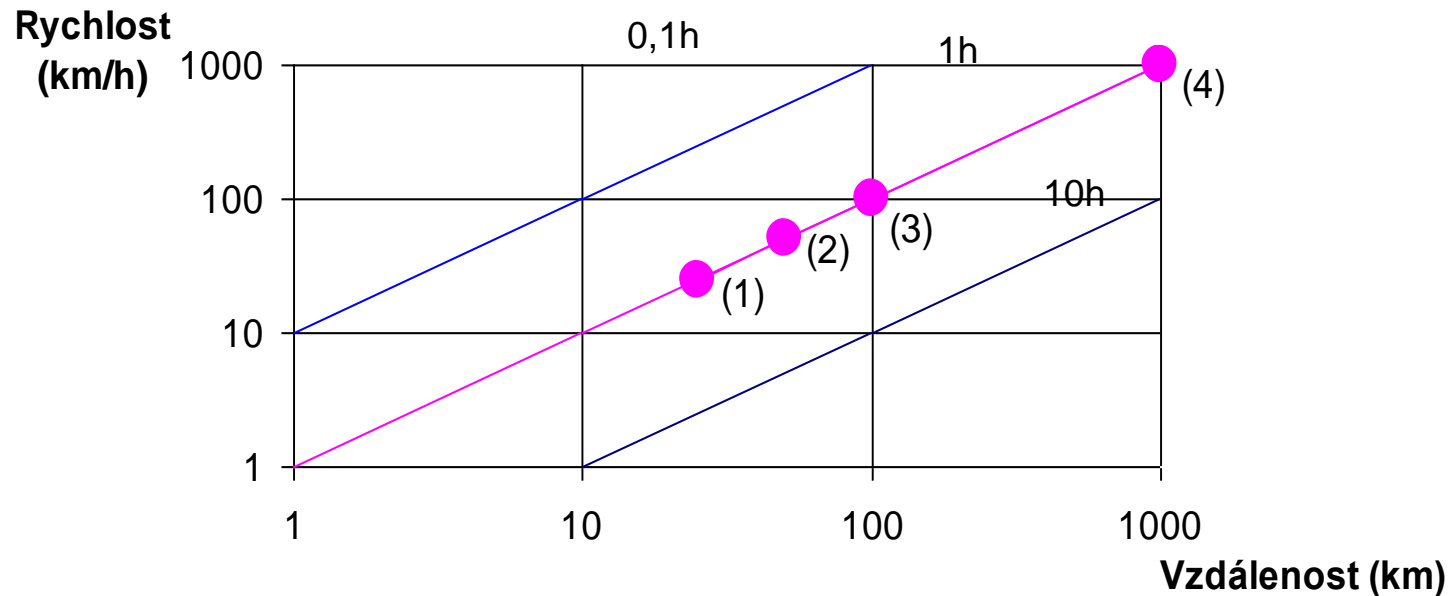
⇒ společenská poptávka: jezdit rychle a přitom energeticky nenáročně

Mobilita společnosti (žití v prostoru)

Člověk je ochoten denně cestovat tam a zpět zhruba 2 x 1 hodinu

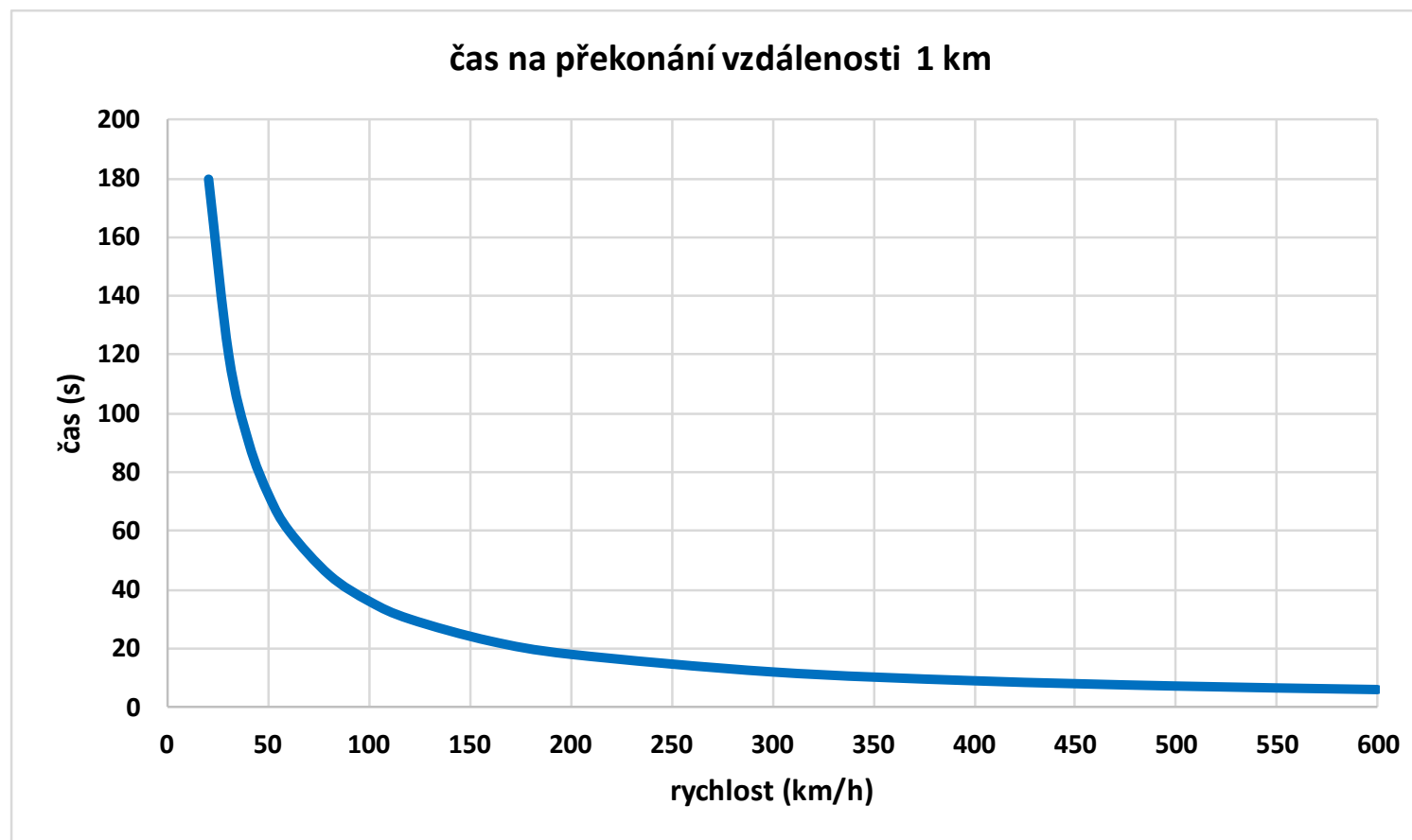
- cca 25 km po městě (IAD, MHD) $v = 25 \text{ km/h}$ (1)
- cca 50 km v rámci regionu (vlak, autobus) $v = 50 \text{ km/h}$ (2)
- cca 100 km mezi dvěma městy (vlak, IAD) $v = 100 \text{ km/h}$ (3)
- cca 1000 km po Evropě (letadlo) $v = 1000 \text{ km/h}$ (4)

⇒ vzdálenostem přizpůsobujeme rychlost přepravy (nevnímáme ujetou dráhu, ale čas strávený cestováním)



Čas potřebný k dopravě lze zkrátit vyšší rychlostí:

$$T = L/v$$



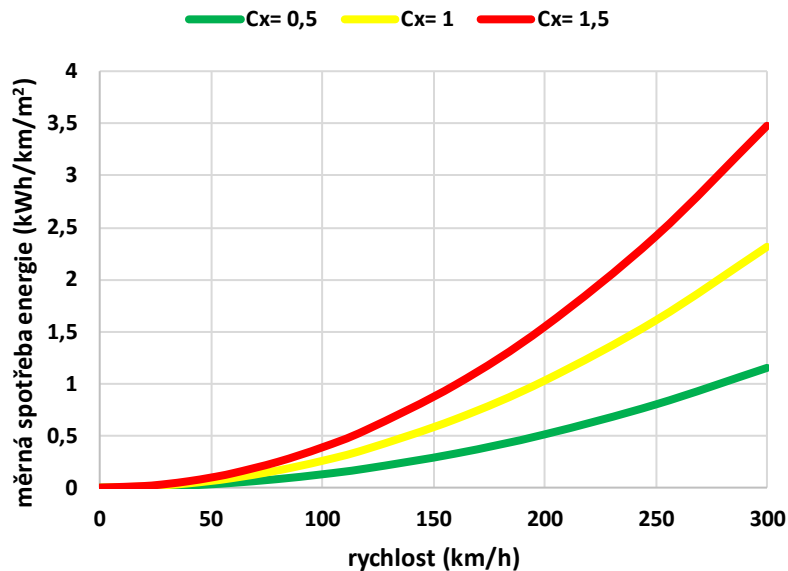
Energetická náročnost pohybu ve vzdušném prostředí

Energetickou náročnost pohybu vozidel i letadel ve vzdušném prostředí významně ovlivňuje aerodynamický odpor:

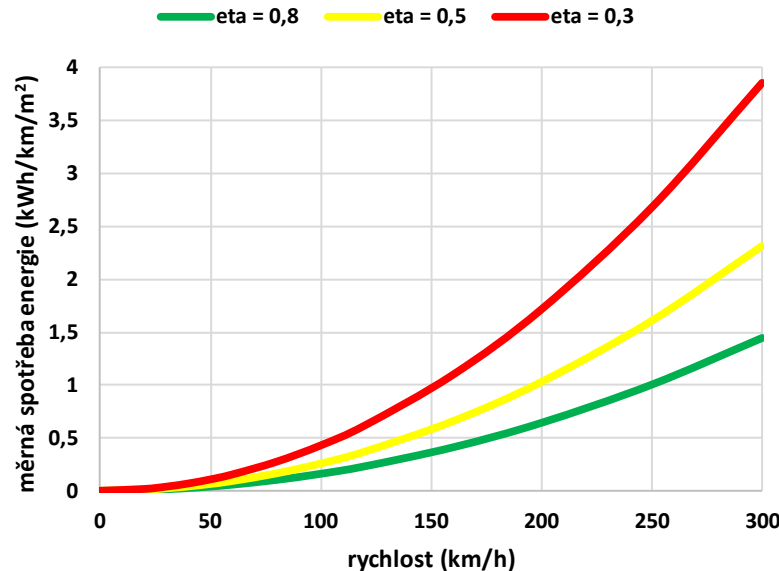
$$E = F \cdot L = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S / \eta$$

Kvadratickou závislost na rychlosti nelze odstranit, ale lze ovlivnit tvar, účinnost pohonu a měrnou hmotnost vzduchu (pohybem ve vysoké letové hladině).

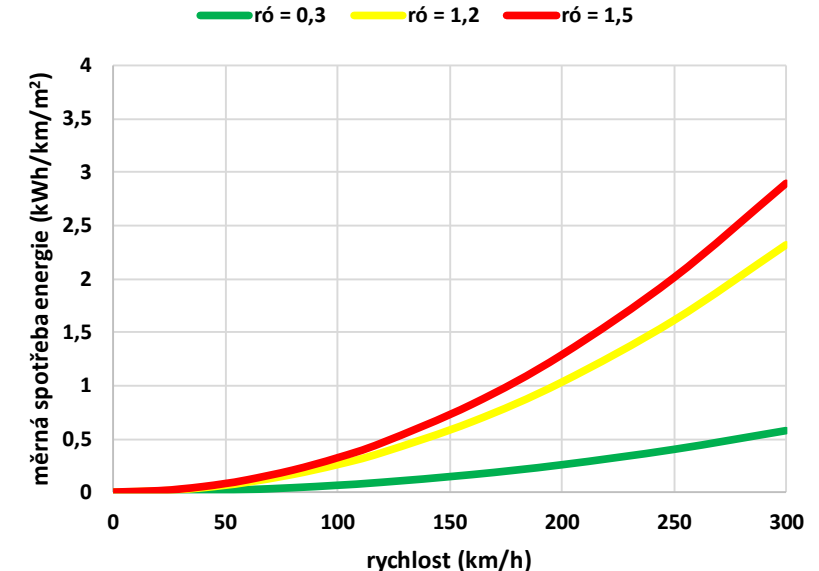
vliv činitele tvaru na měrný aerodynamický odpor



vliv účinnosti pohonu na měrný aerodynamický odpor



vliv měrné hmotnosti vzduchu na aerodynamický odpor



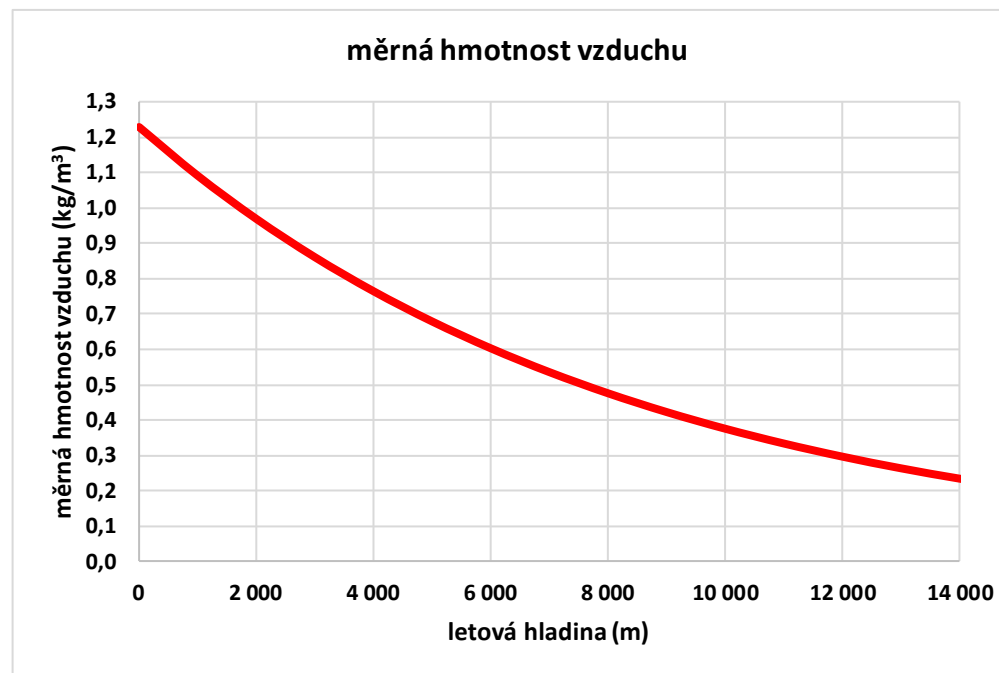
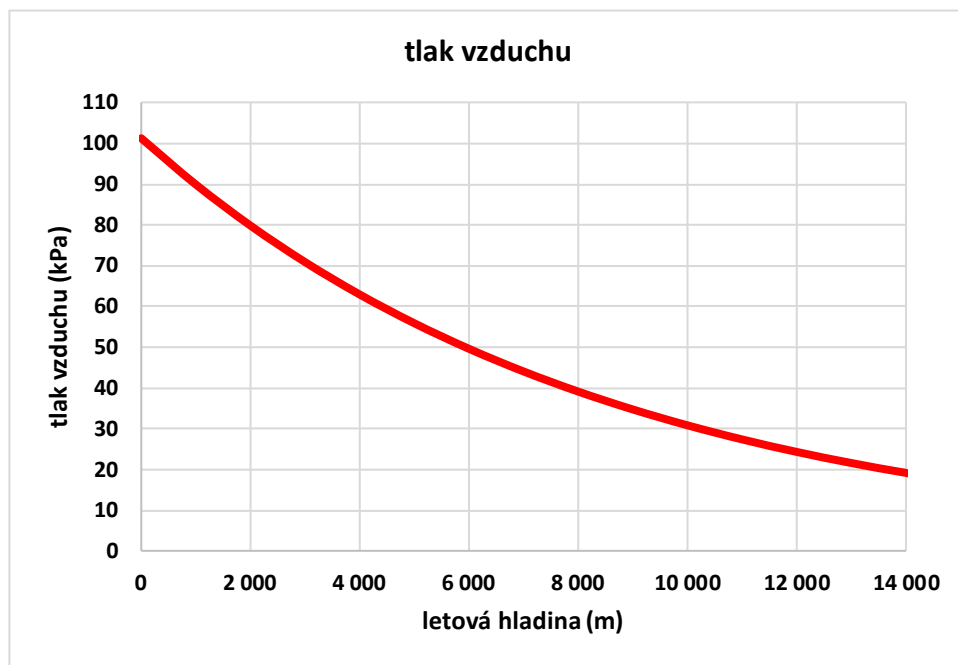
Létání ve vysokých hladinách

Tlak vzduchu i měrná hmotnost vzduchu klesají s rostoucí nadmořskou výškou:

$$p = p_0 \cdot e^{-\rho_0 \cdot g \cdot h / p_0}$$

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\rho_0 \cdot g \cdot h / p_0}$$

Pro využití tohoto efektu létají dopravní letadla v letové hladině 10 000 až 12 000 m, kde je měrná hmotnost a tedy i odpor vzduchu čtyřikrát nižší než nad povrchem Země (0,3 kg/m³ proti 1,2 kg /m³).

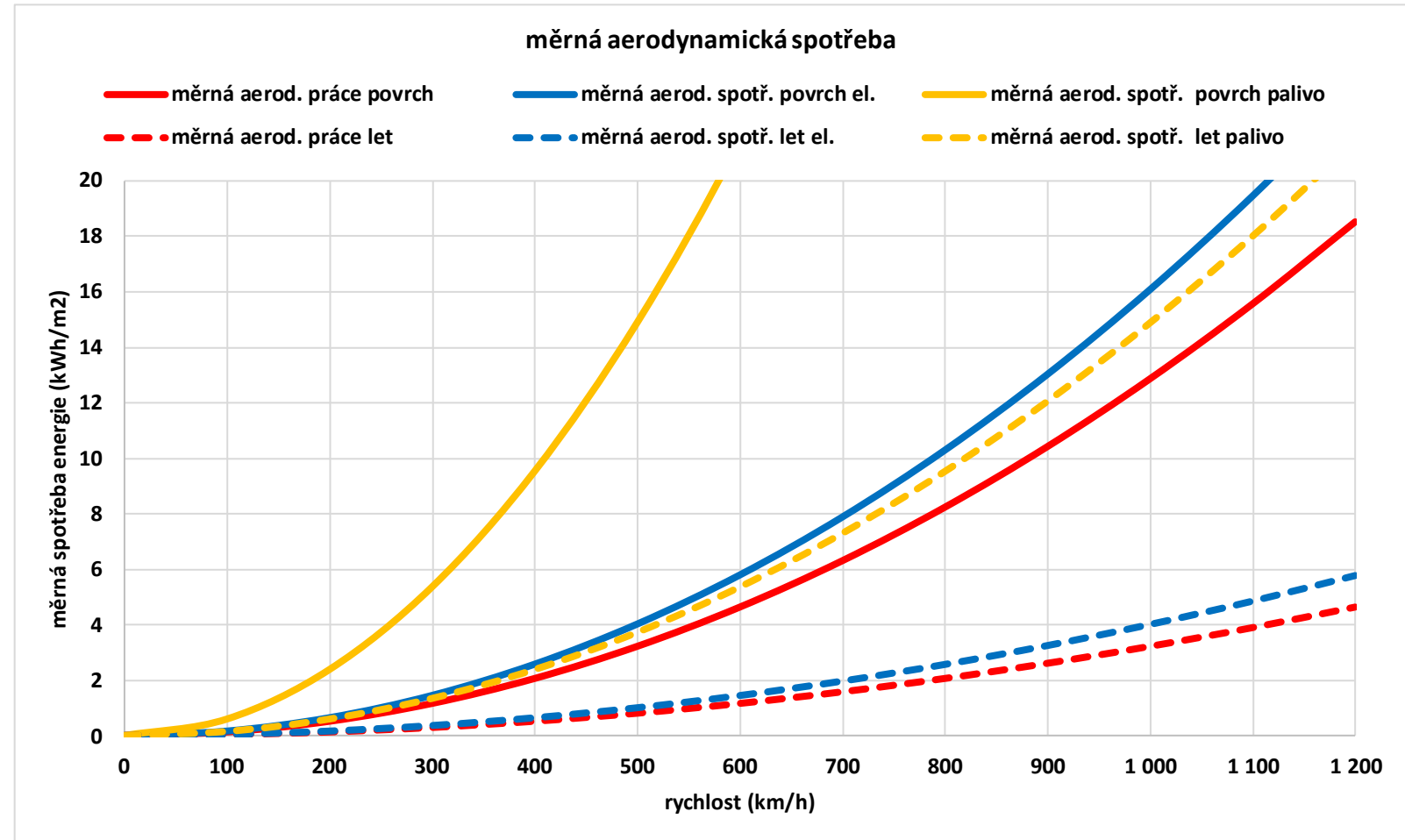


Energetická náročnost letu

Lety ve výšce 10 000 m až 12 000 m jsou energeticky výhodné.

V řídkém ovzduší klesá aerodynamický odpor a s ním též spotřeba energie na jeho překonání. A to zhruba na jednu čtvrtinu ve srovnání s podmínkami těsně nad povrchem Země.

Tento benefit je však dosti oslabován nízkou účinností tepelných motorů.

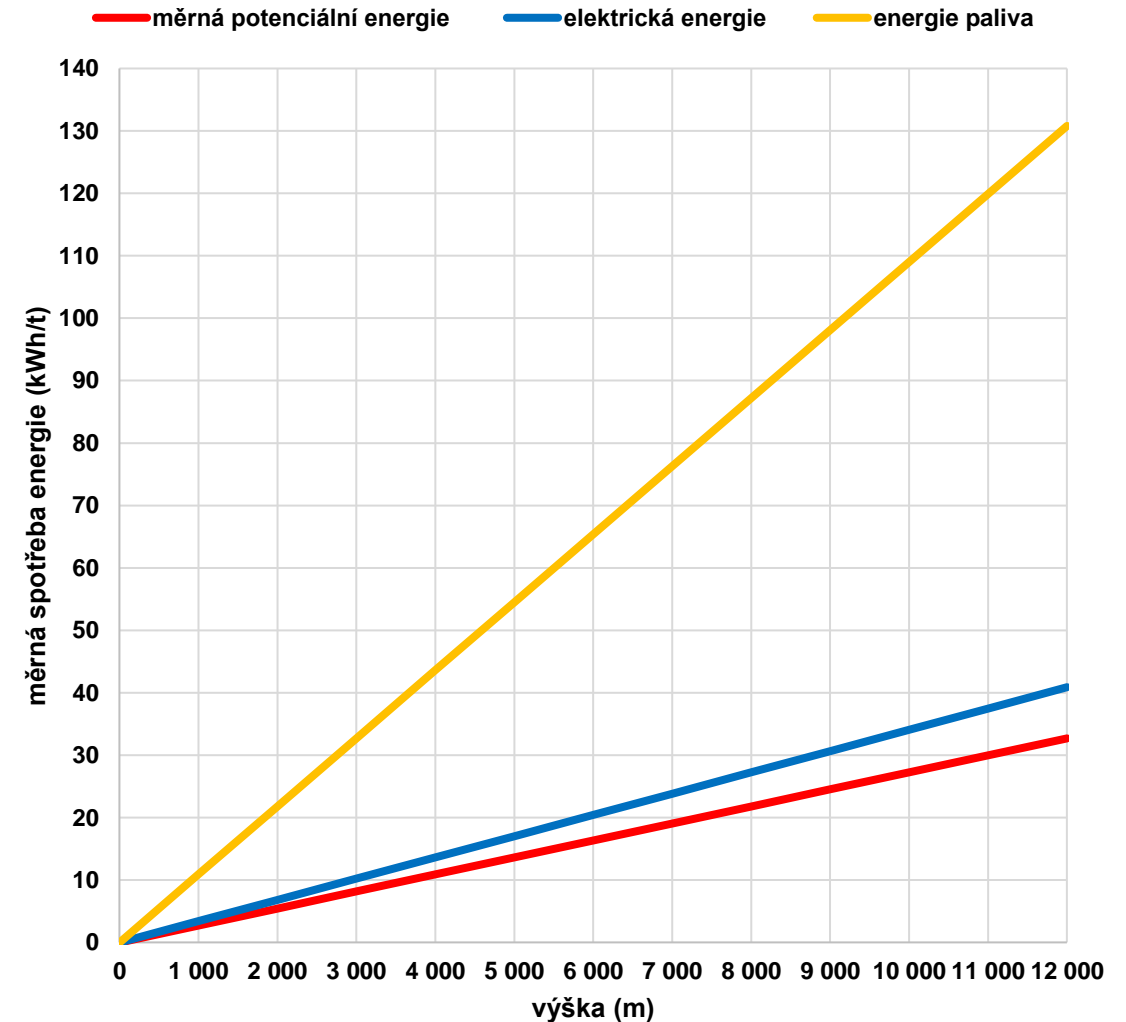


Potenciální energie letu

Avšak k docílení výhodných aerodynamických podmínek letu je potřeba po startu zvednout letadlo do výšky cca 12 km, což vyžaduje vytvořit potenciální energii 33 kWh na 1 t hmotnosti letadla.

Tepelný letecký motor při tom spotřebuje cca 130 kWh energie paliva na 1 t hmotnosti letadla.

měrná spotřeba potenciální energie

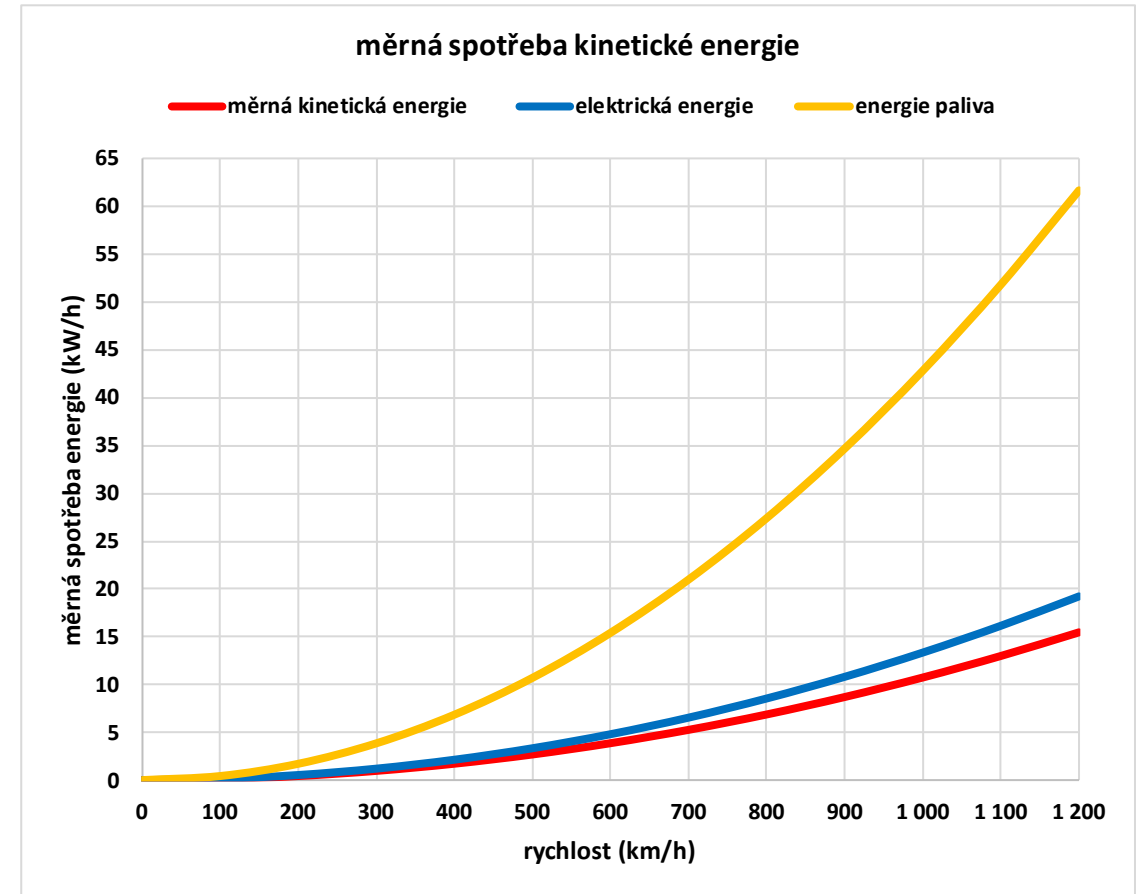


Kinetická energie letu

Nízká měrná hmotnost vzduchu se sebou nese kromě žádoucího poklesu odporu vzduchu i nechtěný pokles vztlakové síly působící na křídla letadla. Pro udržení letadla v této výšce proto musí letadlo letět dostatečně rychle, zhruba rychlostí 900 km/h.

Po startu je proto nutno letadlo urychlit na rychlost cca 900 km/h, což vyžaduje vytvořit kinetickou energii 9 kWh na 1 t hmotnosti letadla.

Tepelný letecký motor při tom spotřebuje cca 35 kWh energie paliva na 1 t hmotnosti letadla.



Potenciální a kinetická energie letu

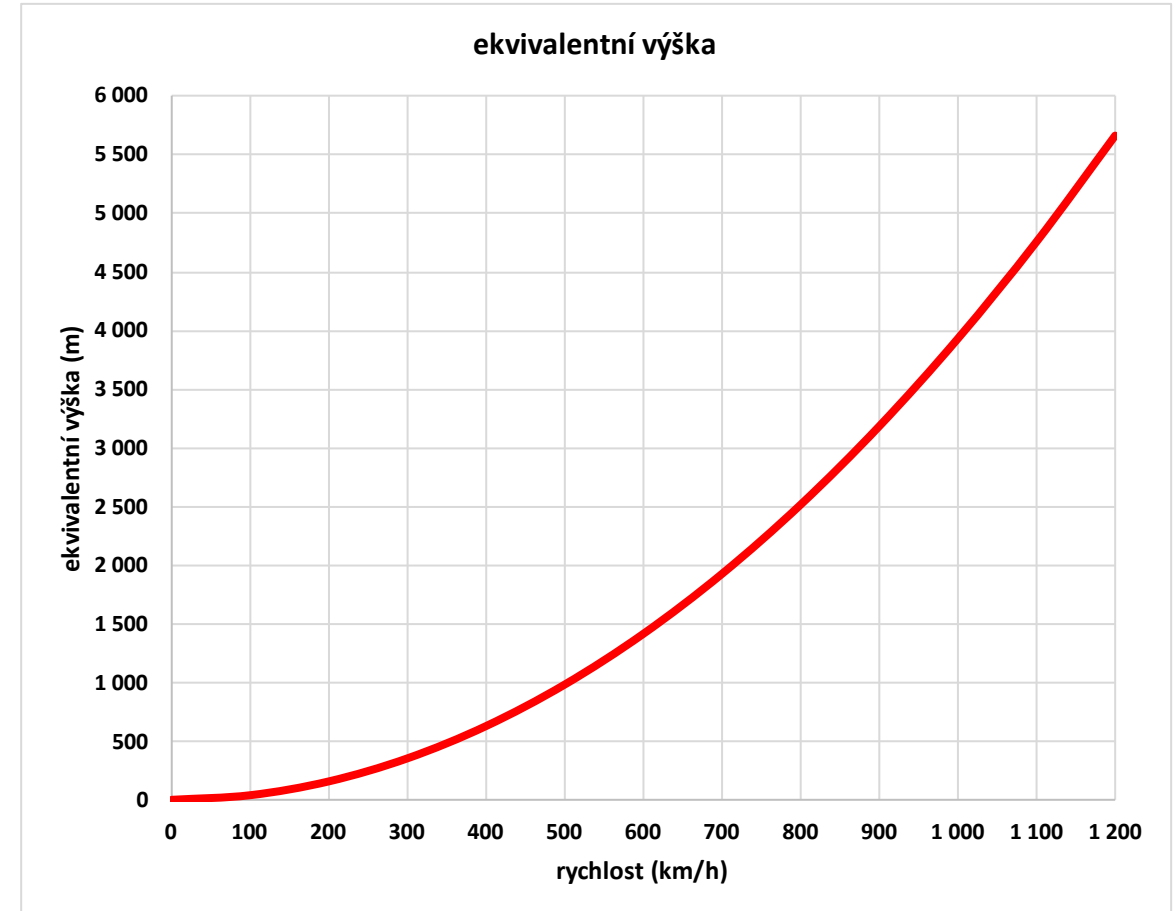
Zrychlení letadla na rychlost 900 km/h je ekvivalentem jeho zdvižení do výšky 3 200 m.

Pro vytvoření podmínek hospodárného letu (zdvižení do výšky 12 000 m a uvedení do pohybu rychlostí 900 km/h) je potřeba vynaložit celkovou (potenciální a kinetickou) energii 42 kWh na 1 t hmotnosti letadla.

Tepelný letecký motor při tom spotřebuje cca 166 kWh energie paliva na 1 t hmotnosti letadla.

Pro srovnání:

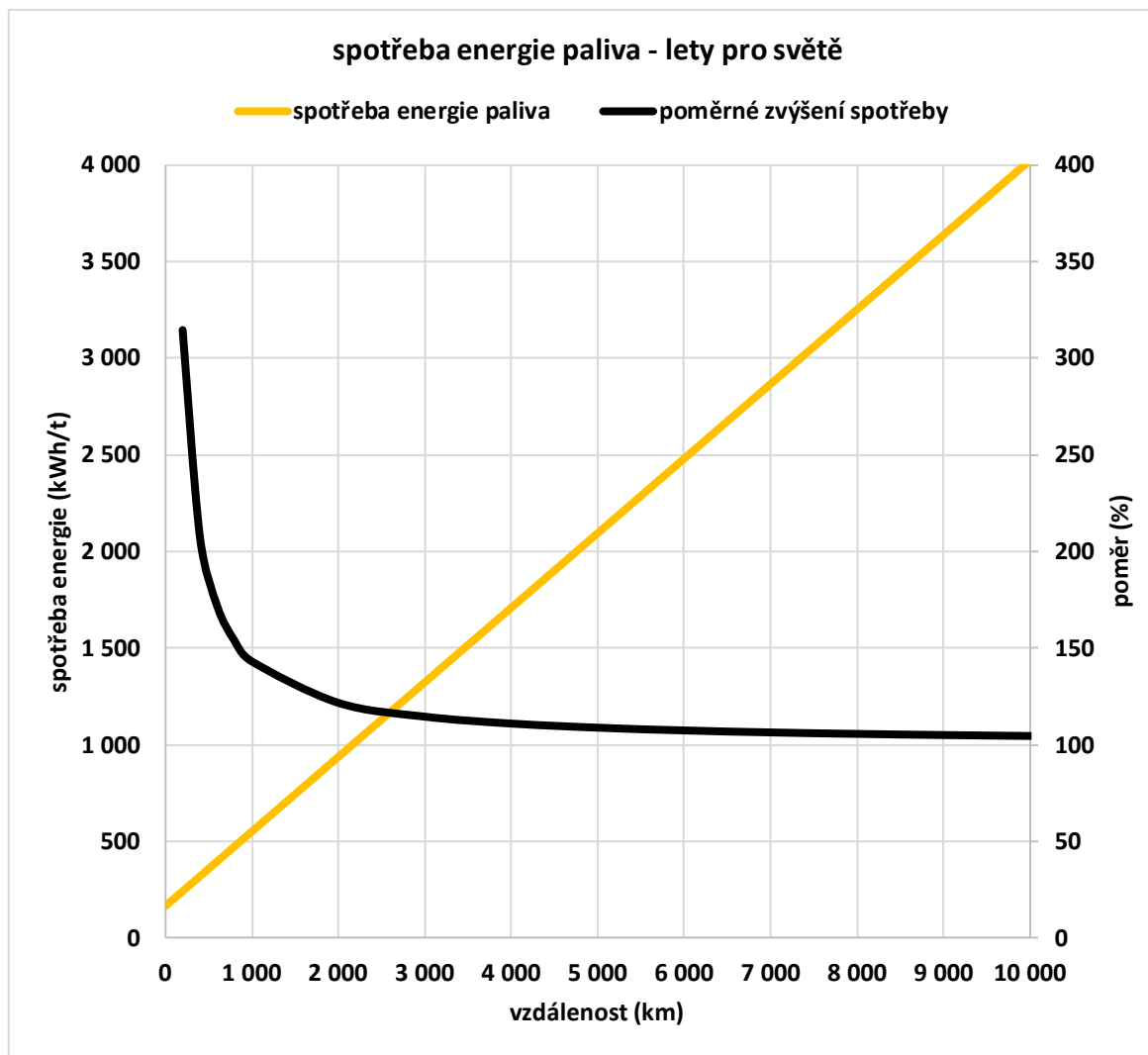
- konvenční EC/IC vlak (160 km/h) s měrnou spotřebou energie 0,025 kWh/tkm vystačí s energií 166 kWh/tkm pro jízdu na vzdálenost 6 640 km,
- vysokorychlostní EC/IC vlak (300 km/h) s měrnou spotřebou energie 0,040 kWh/tkm vystačí s energií 166 kWh/tkm pro jízdu na vzdálenost 4 150 km.



Energetická náročnost letu - svět

Po vynaložení energie paliva 166 kWh/t, potřebné na vytvoření podmínek hospodárného letu, již pokračuje monotónní let v hladině 12 000 m rychlostí 900 km/h s měrnou spotřebou energie paliva cca 0,39 kWh/km, tedy 390 kWh/1 000 km.

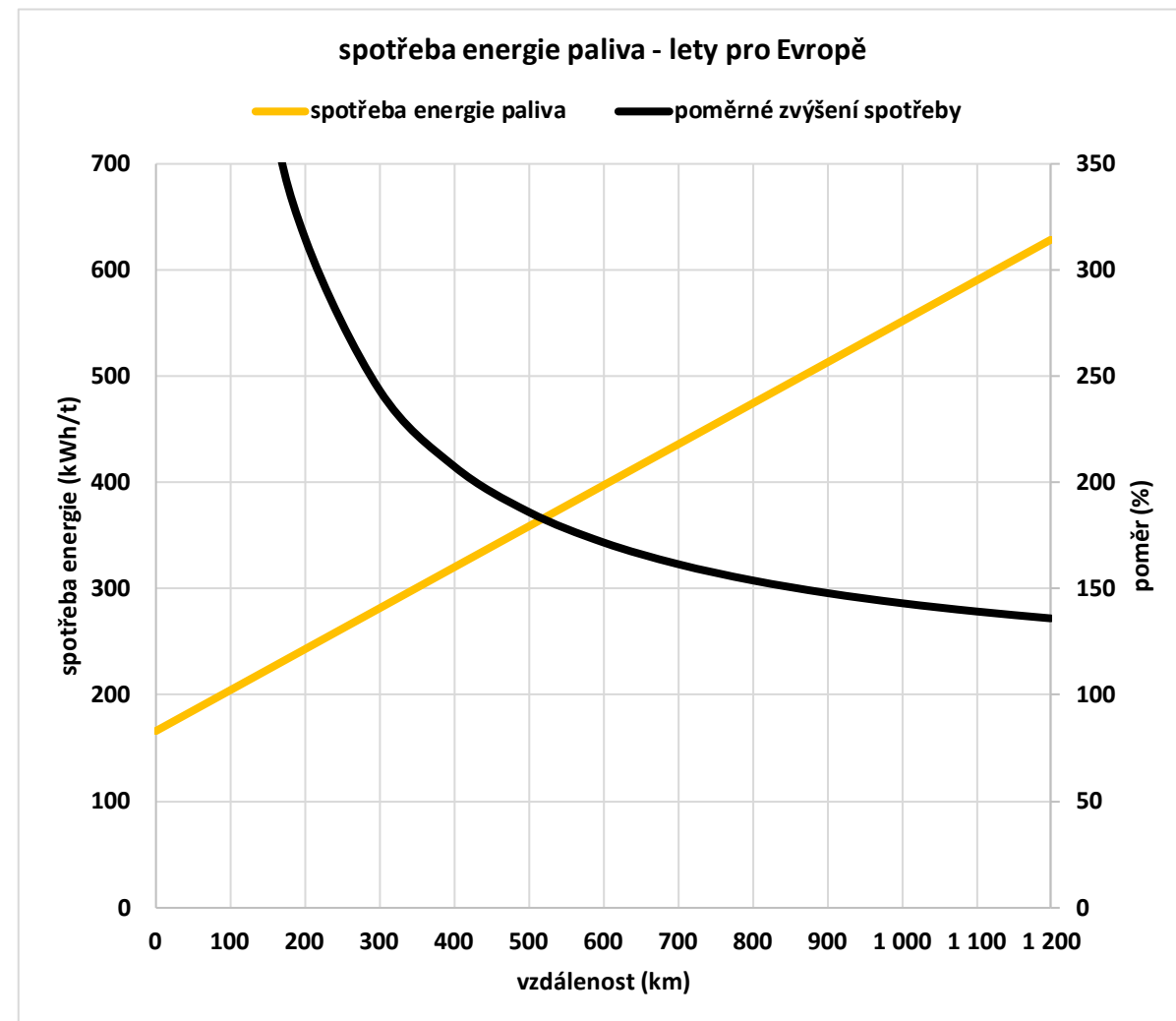
Při dálkových (zaoceánských) letech na vzdálenost několika tisících km se energie paliva 166 kWh/t, potřebná ke startu letadla (k vytvoření podmínek hospodárného letu), podílí na celkové spotřebě energie paliva jen nepatrně – zvyšuje ji jen o několik procent.



Energetická náročnost letu - Evropa

Avšak při krátkých letech nad pevninou (po Evropě) je energie paliva 166 kWh/t, spotřebovaného k vytvoření podmínek hospodárného letu v hladině 12 000 m rychlostí 900 km/h, velmi významnou složkou celkové spotřeby energie paliva. Vlastní let rychlostí 900 km/h s měrnou spotřebou energie paliva cca 0,39 kWh/km, tedy 39 kWh/1 00 km je totiž velmi krátký.

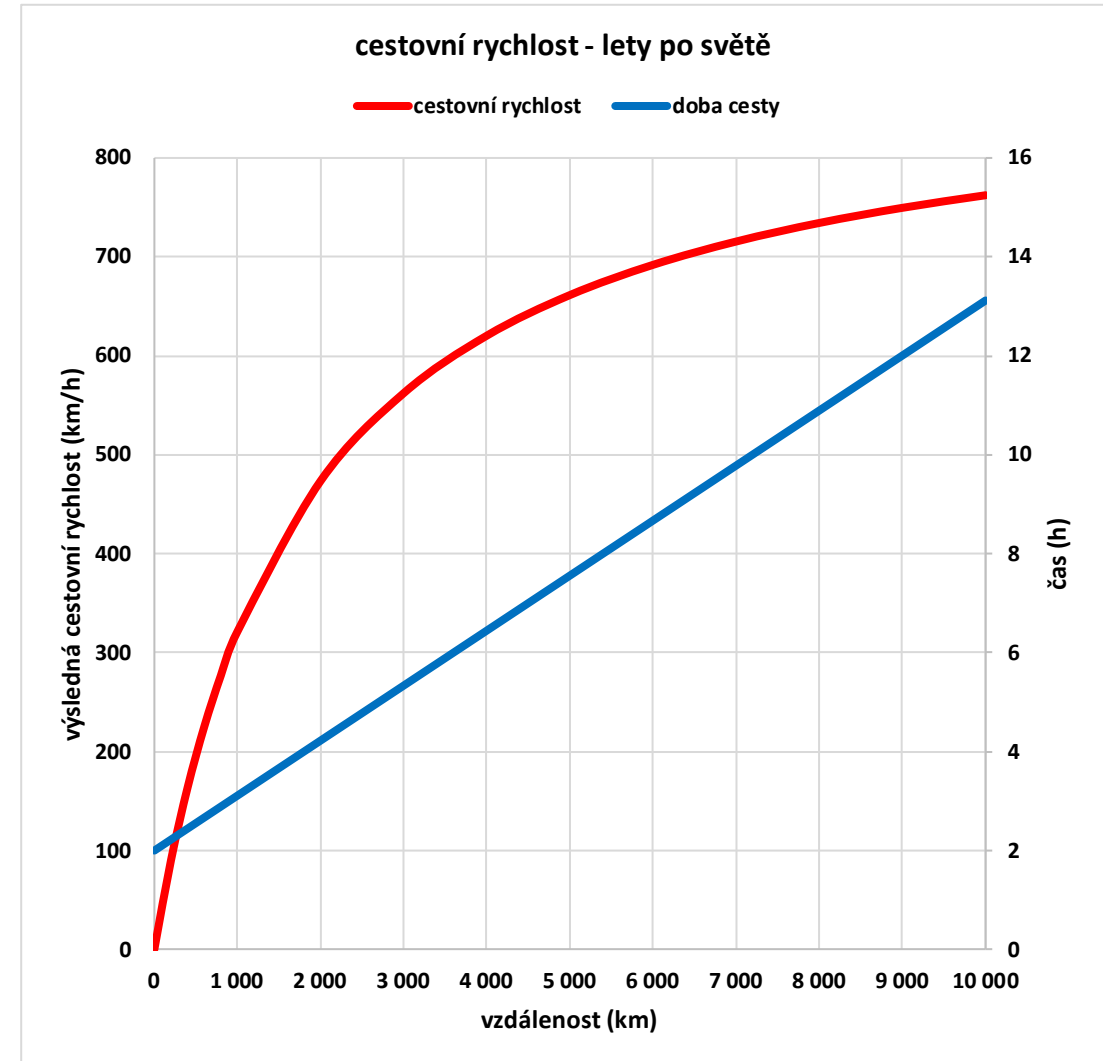
Při letech na vzdálenost jen několika set km se energie paliva 166 kWh/t, potřebná ke startu letadla (k vytvoření podmínek hospodárného letu), podílí na celkové spotřebě energie paliva velmi významně – zvyšuje ji až násobně.



Časová náročnost letu - svět

Podobně jako spotřeba energie paliva, potřebného na vytvoření podmínek hospodárného letu, působí i vliv ztrátových časů. Ztráta času před odletem (doprava na letiště, procesy před odletem, spolu cca 1,5 hodiny) a ztráta času po příletu (procesy po příletu, doprava z letiště, spolu cca 0,5 h) dosahují v součtu cca 2 hodiny. Za tento čas by bylo letadlo schopno rychlostí 900 km/h překonat vzdálenost 1 800 km.

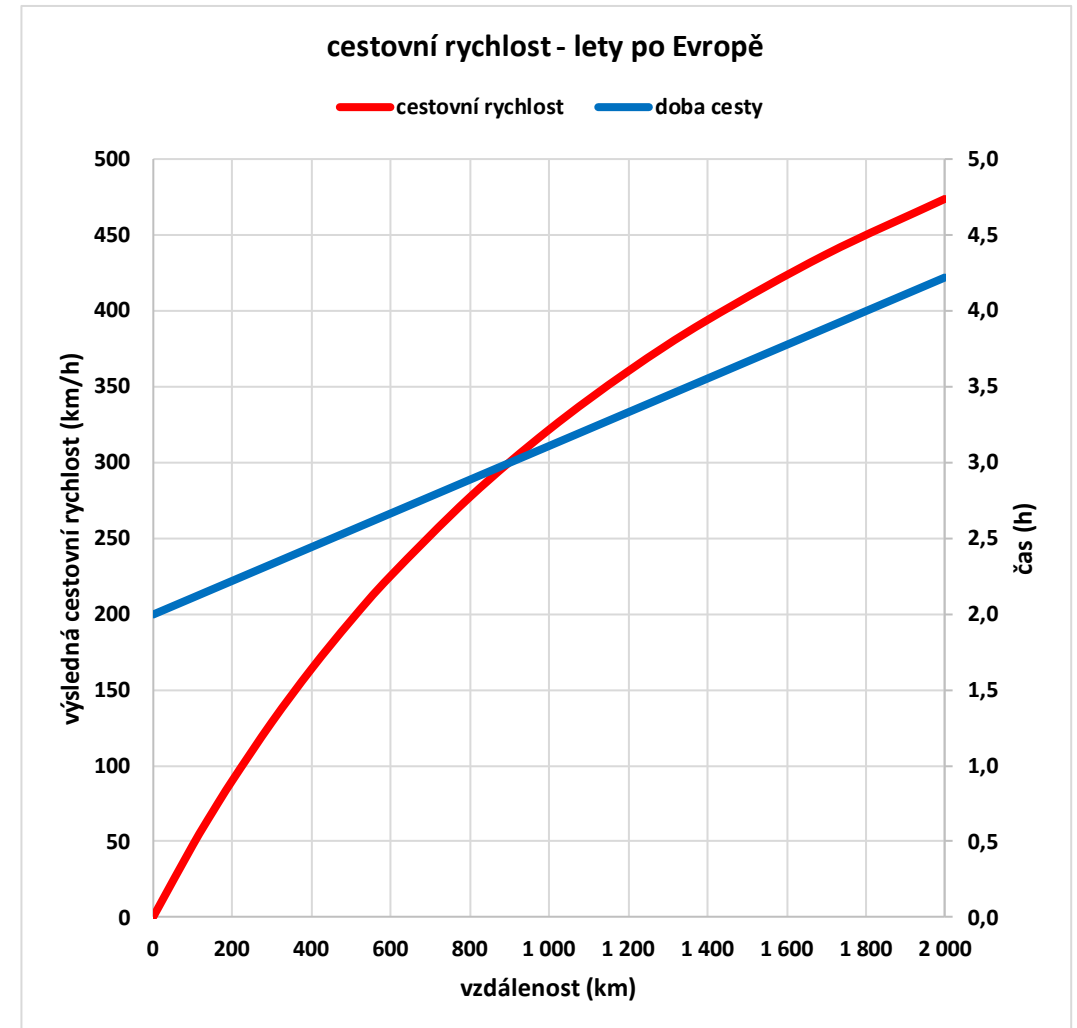
Při dálkových (zaoceánských) letech na vzdálenosti několika tisících km se ztrátové časy před odletem a po příletu podílí na celkové spotřebě času jen nevýrazně, převládá doba letu. Proto je i výsledná cestovní rychlost letecké přepravy vysoká (kolem 750 km/h), blízká rychlosti letu 900 km/h.



Časová náročnost letu - Evropa

Avšak při krátkých letech nad pevninou (po Evropě) jsou ztrátové časy před odletem a po přiletu velmi významnou složkou celkové doby cestování. Vlastní let rychlostí 900 km/h je totiž docela krátký.

Při krátkých letech nad pevninou (po Evropě) na vzdálenosti několika set km se ztrátové časy před odletem a po přiletu podílí na celkové spotřebě času velmi výrazně, převyšují vlastní dobu letu. Proto je i výsledná cestovní rychlost letecké přepravy dost nízká (kolem 300 km/h), tedy je jen zlomkem rychlosti letu 900 km/h.

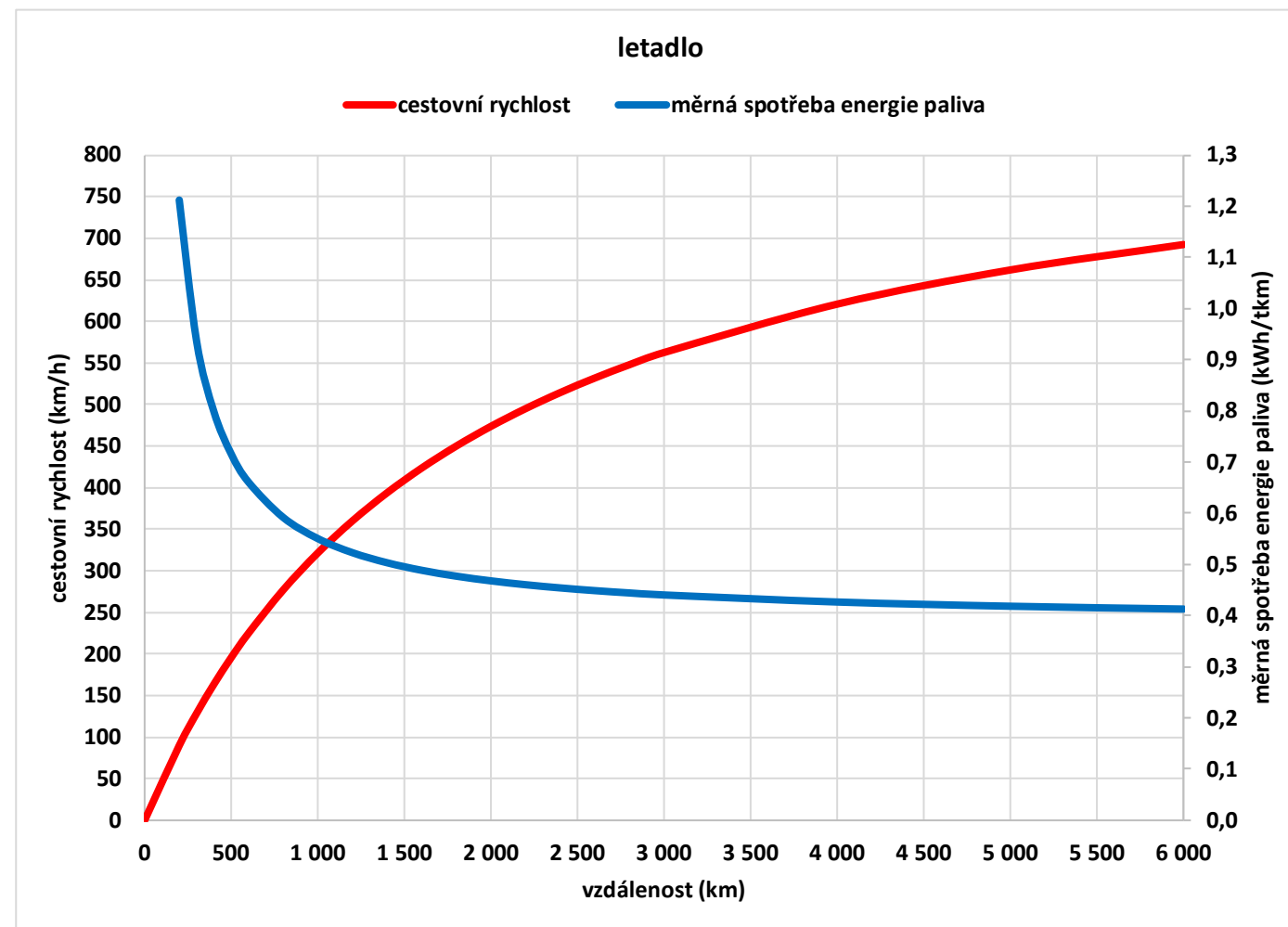


Role letecké dopravy

Z hlediska obou popisovaných jevů, tedy spotřeby energie i spotřeby času na cestování, se letadlo jeví výhodně na dálkové (záoceanické) lety na vzdálenosti několika tisíc km a nevýhodně pro krátké lety nad pevninou, na vzdálenosti několika set km.

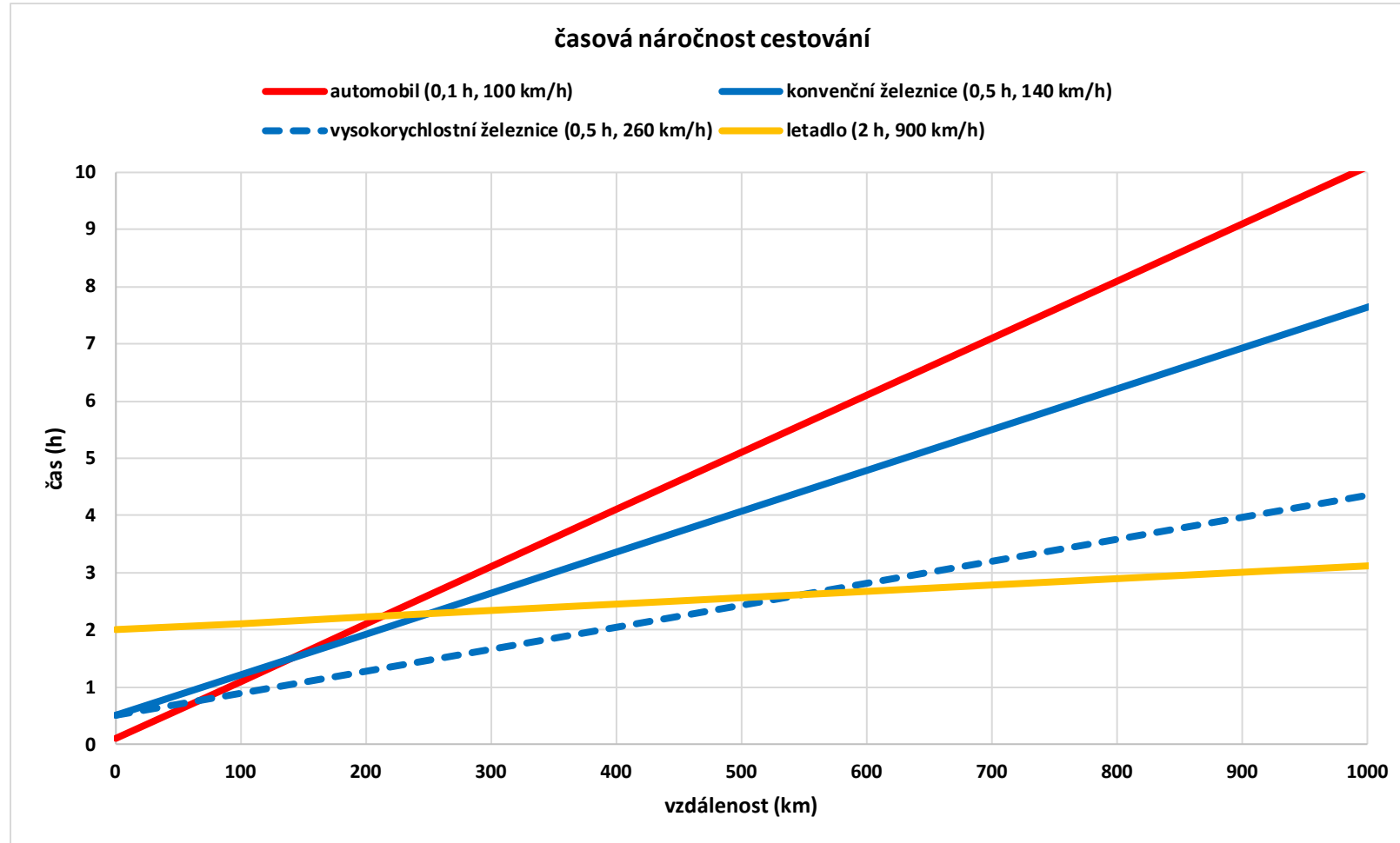
Základem multimodální mobility je vzájemná kooperativnost a komplementárnost jednotlivých druhů dopravy tak, aby každý dopravní mód byl používán tam a jenom tam, kde pracuje efektivně.

To v případě letecké dopravy jsou dálkové (záoceanické) lety, nikoliv lety nad pevninou na vzdálenost několika set km.



Časová náročnost dopravy

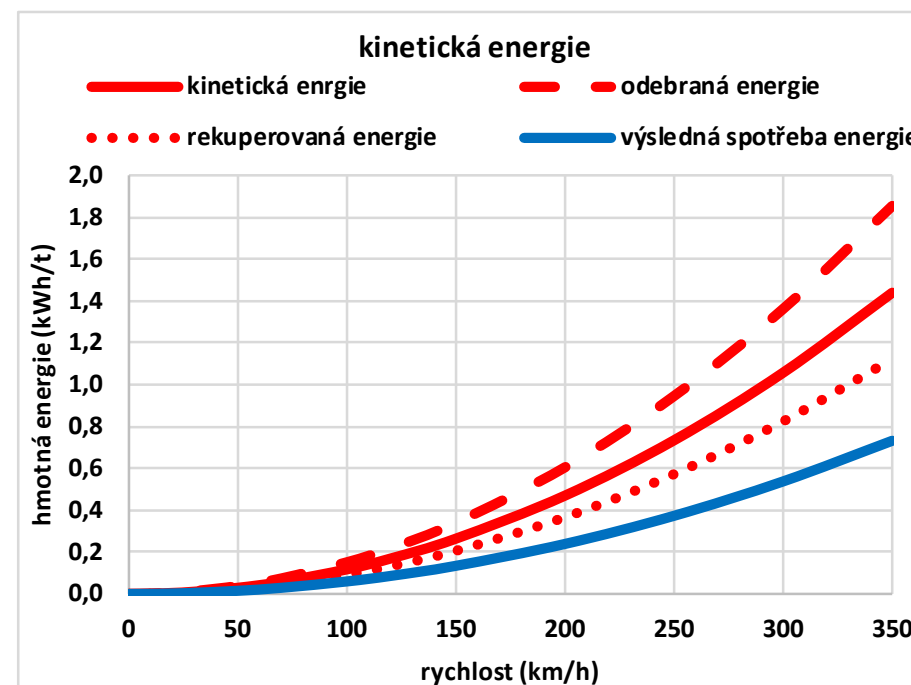
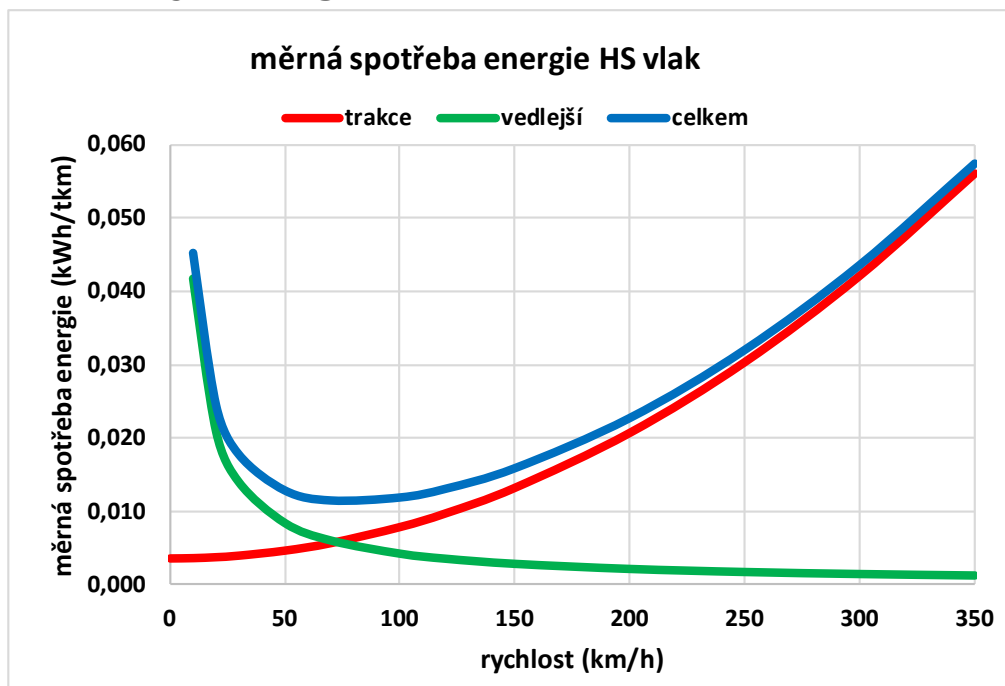
Ve směrech silných a pravidelných přepravních proudů dokáže zajistit nejkratší cestovní časy železnice, zejména vysokorychlostní.



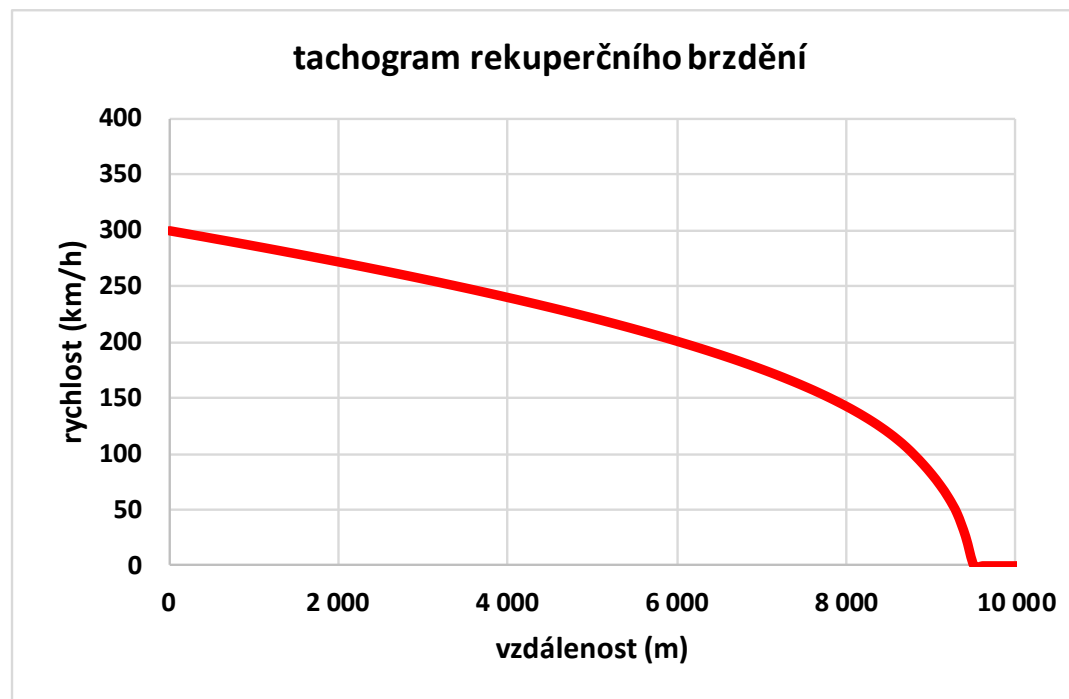
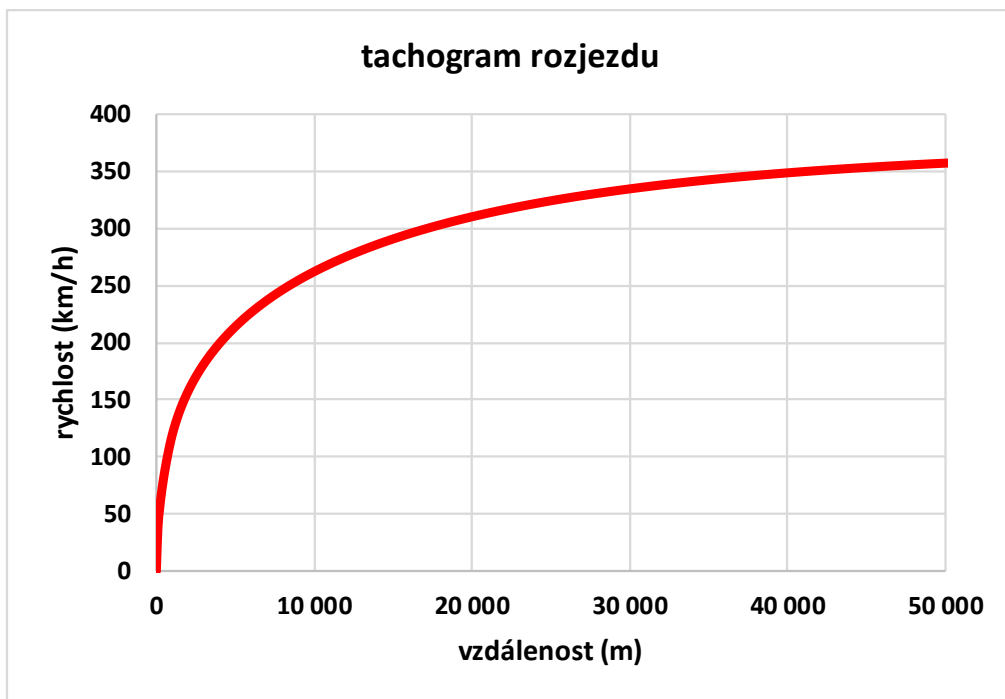
Energetická vysokorychlostních železnic

Vysokorychlostní železnice je vhodným dopravním systémem pro přepravu osob a kusových zásilek na vzdálenosti ve stovkách kilometrů:

- dlouhý štíhlý tvar - nízký aerodynamický odpor,
- vysoká účinnost elektrického trakčního pohonu,
- úspory energie rekuperačním brzděním

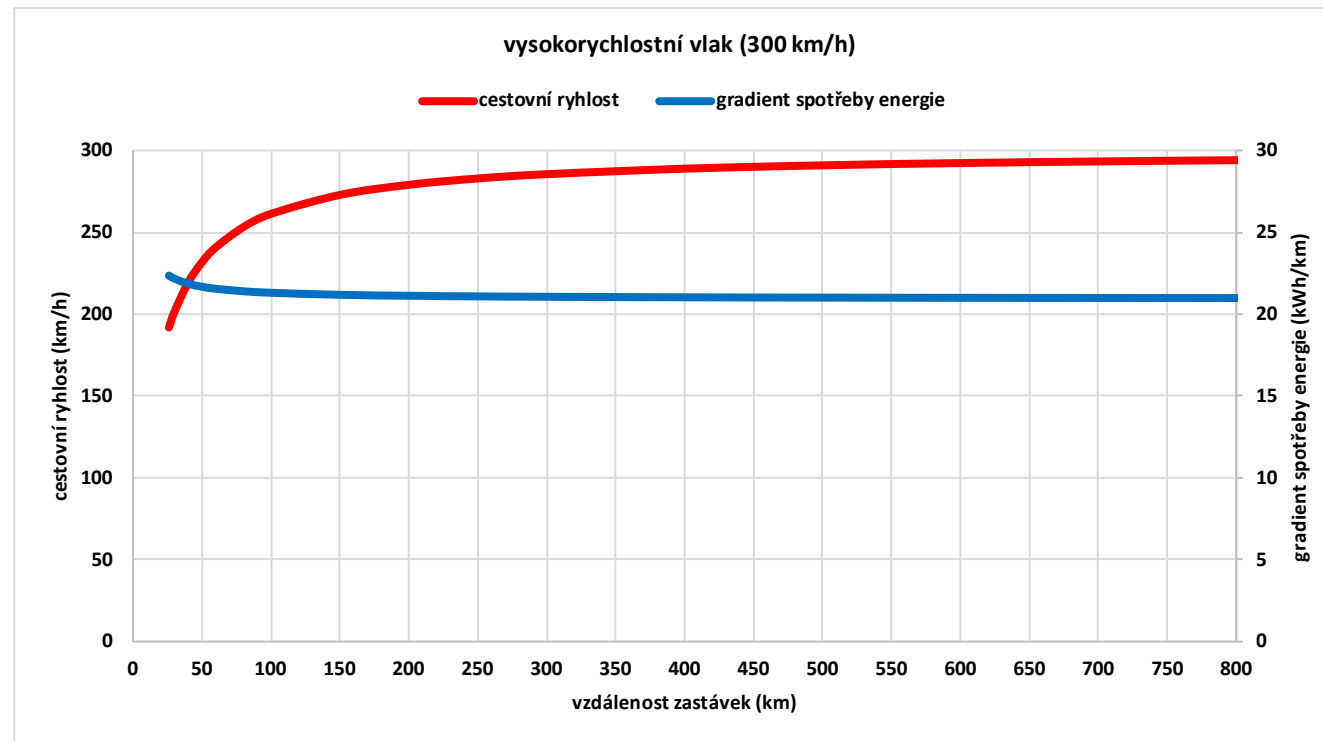


Vysokorychlostní vlaky jsou schopny rychlého rozjezdu a intenzivního (rekuperačního) brzdění a jsou proto vhodné pro dopravní spojení nejen pro dlouhé (stovky km) ale i pro středně dlouhé vzdálenosti mezi městy.



Flexibilita vysokorychlostních vlaků

Ve srovnání s letadly nemusejí vysokorychlostní vlaky při rozjezdu vytvářet velkou potenciální a kinetickou energii. Proto zvládnou zajistit i přepravy na kratší vzdálenosti téměř se stejnou cestovní rychlostí a s téměř stejnou měrnou spotřebou energie, jako přepravy na dlouhé vzdálenosti.



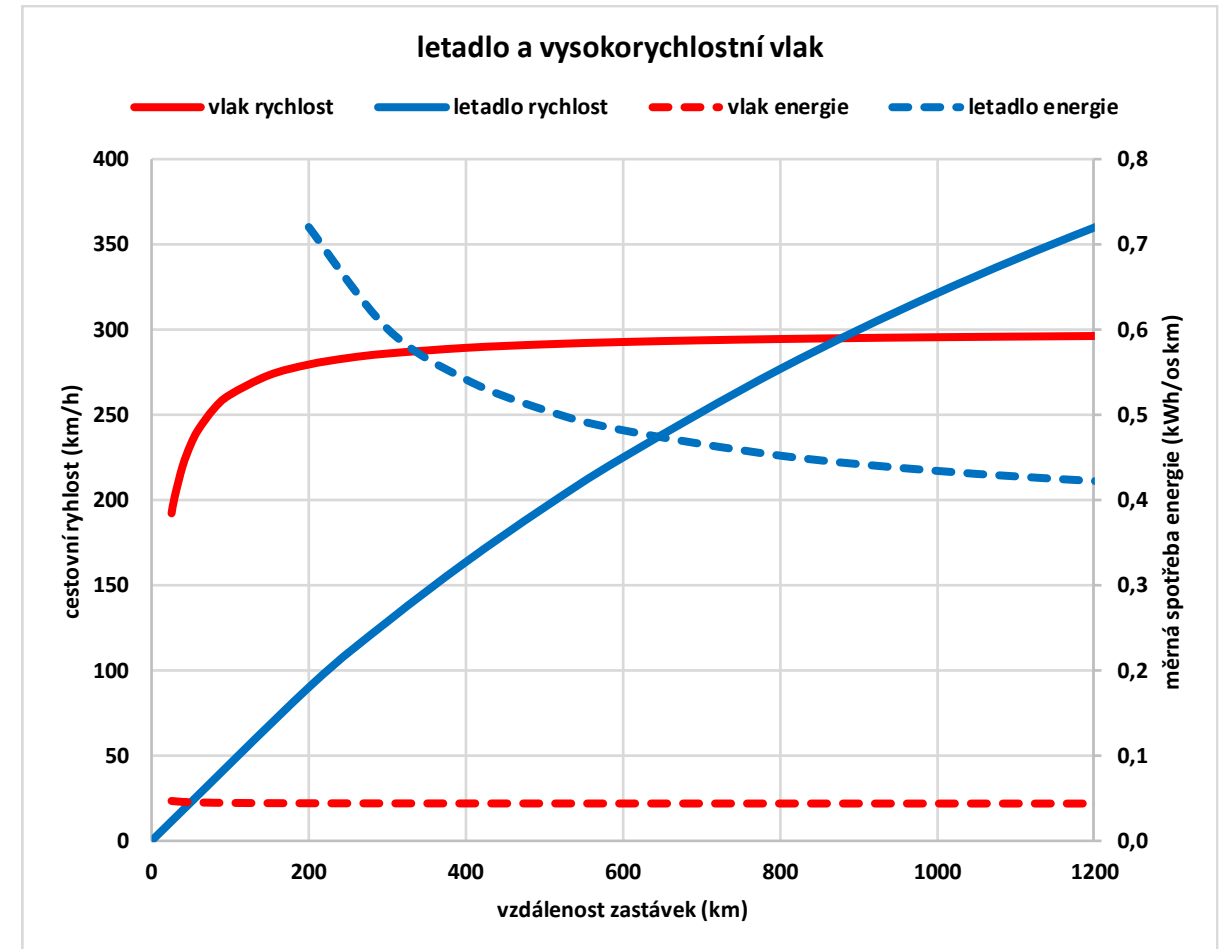
Kooperace a komplementárnost letecké a železniční dopravy

Pro leteckou dopravu je typická velká základní spotřeba energie nutná pro vytvoření podmínek letu (vyzdvižení a urychlení letadla) a velká základní spotřeba času (cesty a procesy před odletem a pro přiletu).

U letů na velké vzdálenosti nejde o významné položky, ale u letů na krátké vzdálenosti výrazně zvyšují jejich energetickou i časovou náročnost.

Naopak železnice zvládá přepravy na krátké a střední vzdálenosti rychle a s velmi nízkou energetickou náročností.

- ⇒ lety na krátké vzdálenosti nejsou efektivní, je rozumné je nahradit vysokorychlostní železnicí s řádově nižší energetickou a emisní náročností,
- ⇒ letadlům náleží zejména dálkové lety, zejména do zámoří.

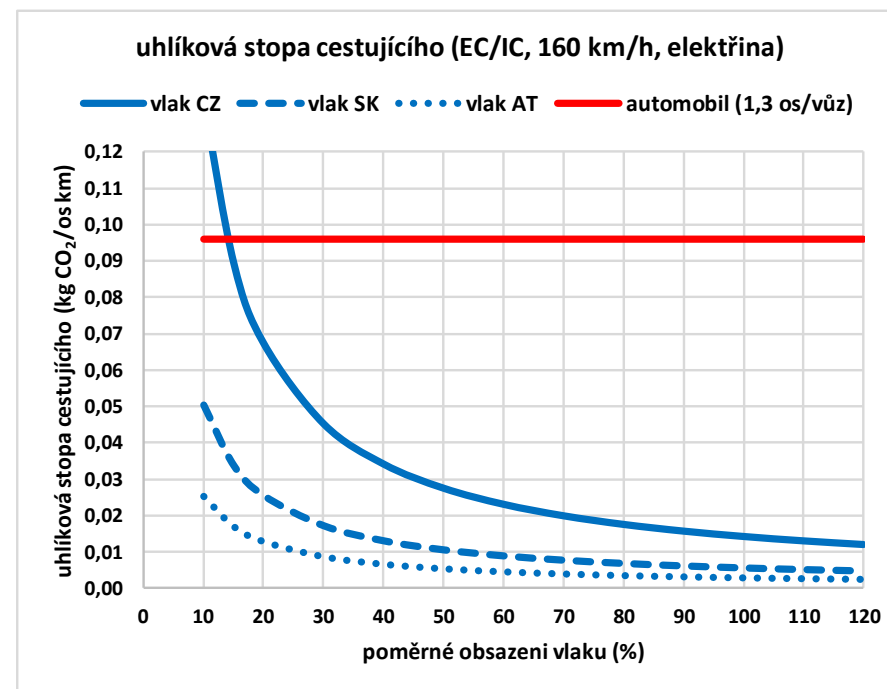
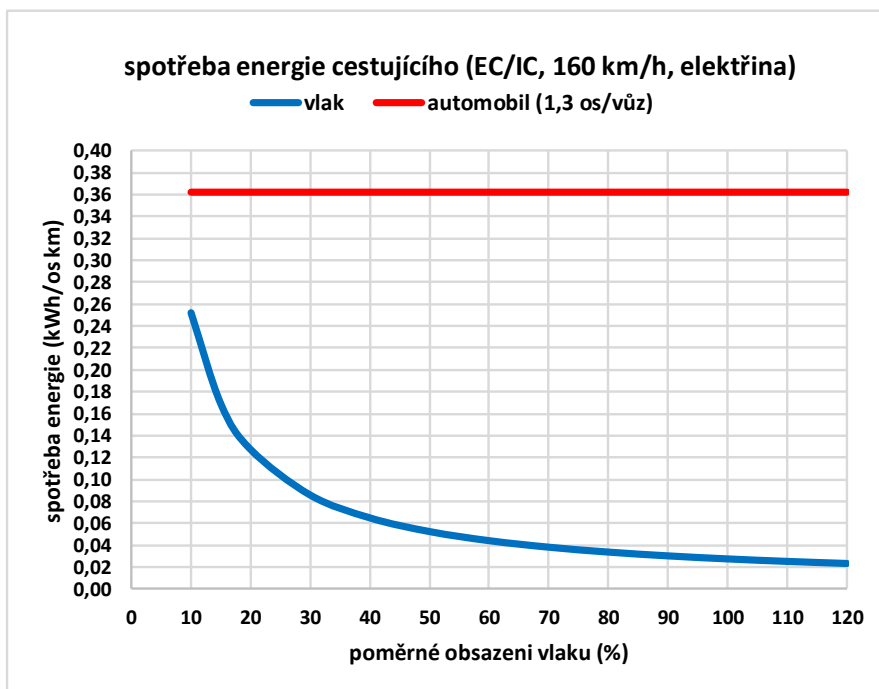


Multimodální mobilita

Základem multimodální mobility není konkurence (schopnost porazit druhého) jednotlivých druhů dopravy, ale kooperativnost (schopnost spolupracovat) a komplementárnost (schopnost doplňovat se):

- silné a pravidelné přepravní proudy: veřejná hromadná doprava (kolejová s liniovou elektrifikací),
- slabé a nepravidelné přepravní proudy: individuální doprava (pěšky, koloběžka, kolo, automobil).

=> efektem jsou výrazné extramodální úspory energie a emisí – globálních (CO₂) i lokálních (NO_x, PM, PAH, ...)



Nástroje k extramodálním úsporám energie a exhalací v osobní dopravě: rychlost a pohodlí

SIEMENS
Ingenuity for life

Převod osobní dopravy ze silnic na elektrizované železnice:

- nižší spotřeba energie,
- zásadní snížení exhalací oxidu uhličitého, způsobujících klimatické změny,
- úplné odstranění exhalací poškozujících zdraví obyvatelstva,
- aktivní využití času stráveného cestováním (train office)

Podmínka: rychlost a kvalita => „pohodlím k úsporám energie“

Příklad:

Firma posílá jednou týdně jednoho pracovníka z Prahy do Brna automobilem. Na jednu služební cestu tam a zpět spotřebuje 24 litrů paliva, tedy 240 kWh energie, a vytvoří 64 kg CO₂.

Tatáž cesta moderním vlakem reprezentuje při 50 % obsazení spotřebu elektrické energie 25 kWh, což je ekvivalent spotřeby 1,2 litru nafty, a produkci 13 kg CO₂.



Roční úspora (48 cest):

- 10 300 kWh energie
- 2 400 kg CO₂

K vytvoření stejné úspory CO₂ by firma musela za svého pracovníka vysázet 0,35 ha nového lesa s absorpční schopností 6,8 t CO₂/rok a jeho dřevo uschovat (nespálit a nezetlít).

Nástroje k extramodálním úsporám energie a exhalací v nákladní dopravě: rychlost a úspora řidičů

SIEMENS
Ingenuity for life

Převod nákladní dopravy ze silnic na elektrizované železnice:

- nižší spotřeba energie,
- zásadní snížení exhalací oxidu uhličitého, způsobujících klimatické změny,
- úplné odstranění exhalací poškozujících zdraví obyvatelstva,
- výrazná úspora pracovních sil (řidičů)

Podmínka: rychlost a dochvilnost => „jistotou a bezstarostností k úsporám energie“

Příklad:

Firma posílá jednou týdně 1 dvacetistopý ISO kontejner z Prahy do Ostravy a zpět automobilem. Na jednu cestu tam a zpět spotřebuje 144 litrů paliva, tedy 1 440 kWh energie, a vytvoří 382 kg CO₂.

Tatáž cesta moderním vlakem reprezentuje spotřebu elektrické energie 195 kWh, což je ekvivalent spotřeby 19,5 litru nafty, a produkci 102 kg CO₂.



Roční úspora (52 cest):

- 65 000 kWh energie
- 15 000 kg CO₂

K vytvoření stejné úspory CO₂ by firma musela za svůj kontejner vysázet 2,1 ha nového lesa s absorpční schopností 6,8 t CO₂/rok a jeho dřevo uschovat (nеспálit a nezetlít).

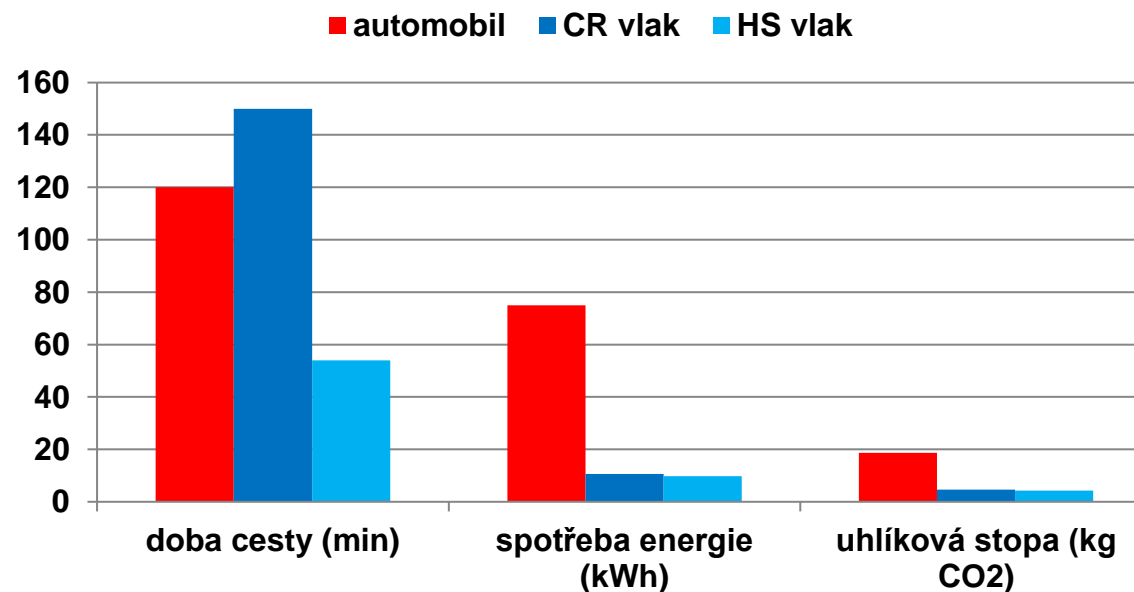
Vysokorychlostní železnice Praha - Brno

Není důvod ztrácet čas (2 hodiny) a energii (75 kWh a 19 kg CO₂ na osobu) jízdou automobilem z Prahy do Brna.

Vysokorychlostní vlak to zvládne za 50 minut (centrum – centrum), respektive za 40 minut (terminál P + CH + R Nehvizdy – terminál P + CH + R Vídeňská) k práci využitelného času (train office).

Spotřebuje k tomu jen 10 kWh a 4 kg CO₂ (perspektivně při elektřině z OZE: 0 kg CO₂) na osobu.

jedna cesta jednoho cestujícího Praha - Brno



Děkuji Vám za Vaši pozornost!

SIEMENS
Ingenuity for life



Jiří Pohl
Senior Engineer
Enginering
Siemens Mobility, s.r.o.

Siemensova 1
155 00 Praha
Česká republika

Mobilit: +420 724 014 931

E-mail: jiri.pohl@siemens.com