



Fyzikální a ekonomické limity dopravního provozu na vysokorychlostních tratích

Jiří Pohl, Siemens, s.r.o. | Telč, 4.11. 2016

Výchozí stav: polarizace společnosti na bohatá města a chudý venkov

SIEMENS

Minulost

95 % obyvatelstva pracovalo v zemědělství, docházková vzdálenost na pole určila historickou strukturu osídlení (systém vesnic a malých měst)

Současnost

2 % obyvatelstva pracuje v zemědělství

Výhoda z rozsahu vede ke koncentraci veškerých aktivit (výroba, služby, vzdělání, zdravotnictví, kultura, sport, ...) do velkých měst a jejich okolí

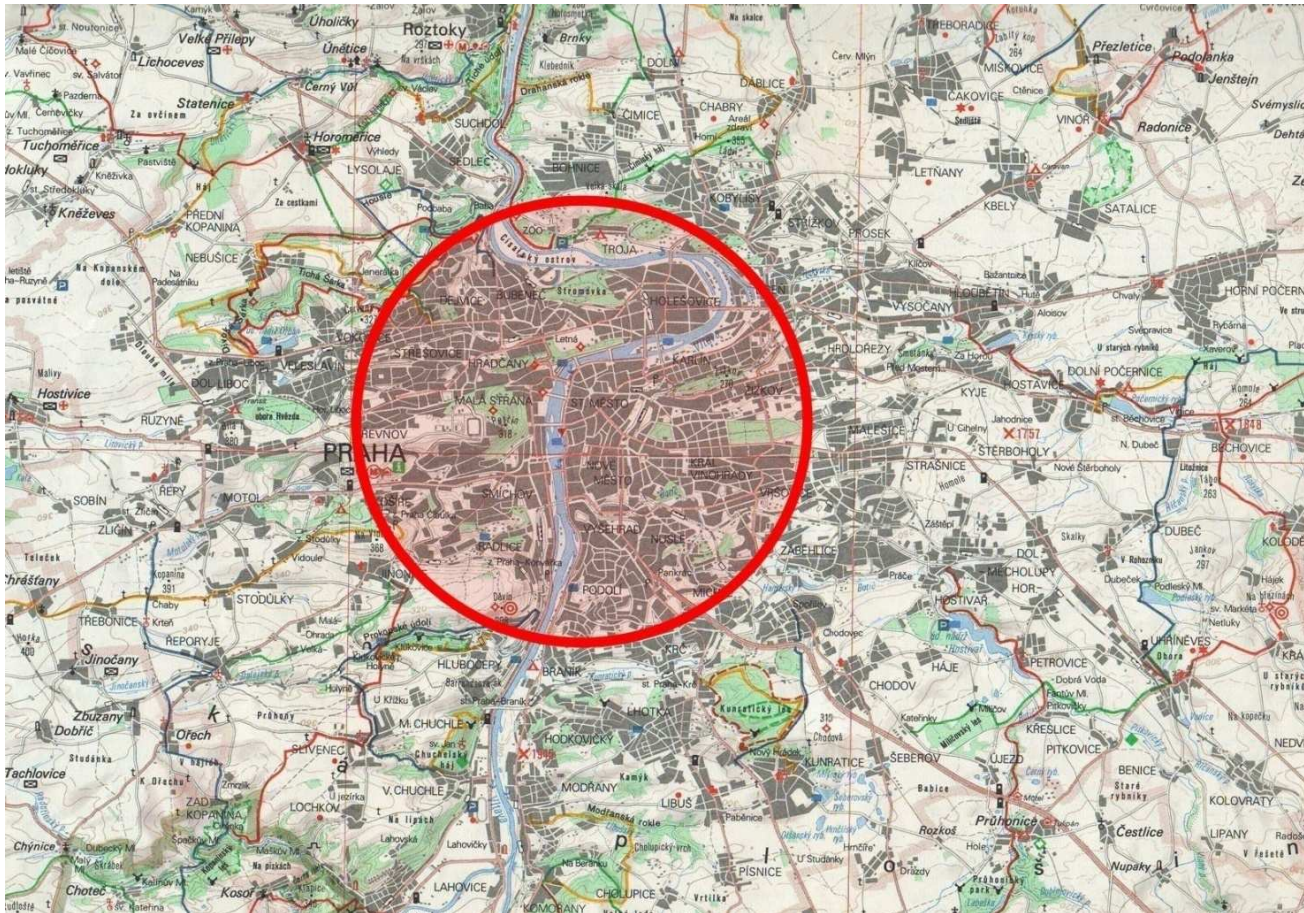
Výsledkem je polarizace společnosti:

- vznikla bohatá, přelidněná, vzdělaná, mladá, zaměstnaná a rozvíjející se města (včetně jim přilehlého venkova),**
- vznikl chudnoucí, postupně vysídlovaný, méně vzdělaný, stárnoucí, málo zaměstnaný a celkově upadající odlehlý venkov (včetně jemu přilehlých městeček).**

Hranicí mezi blahobytem a chudobou je izochrona denního dojíždění.

Praha 1974 – izochrona dostupnosti centra 30 minut (tramvaj, cestovní rychlost 18 km/h)

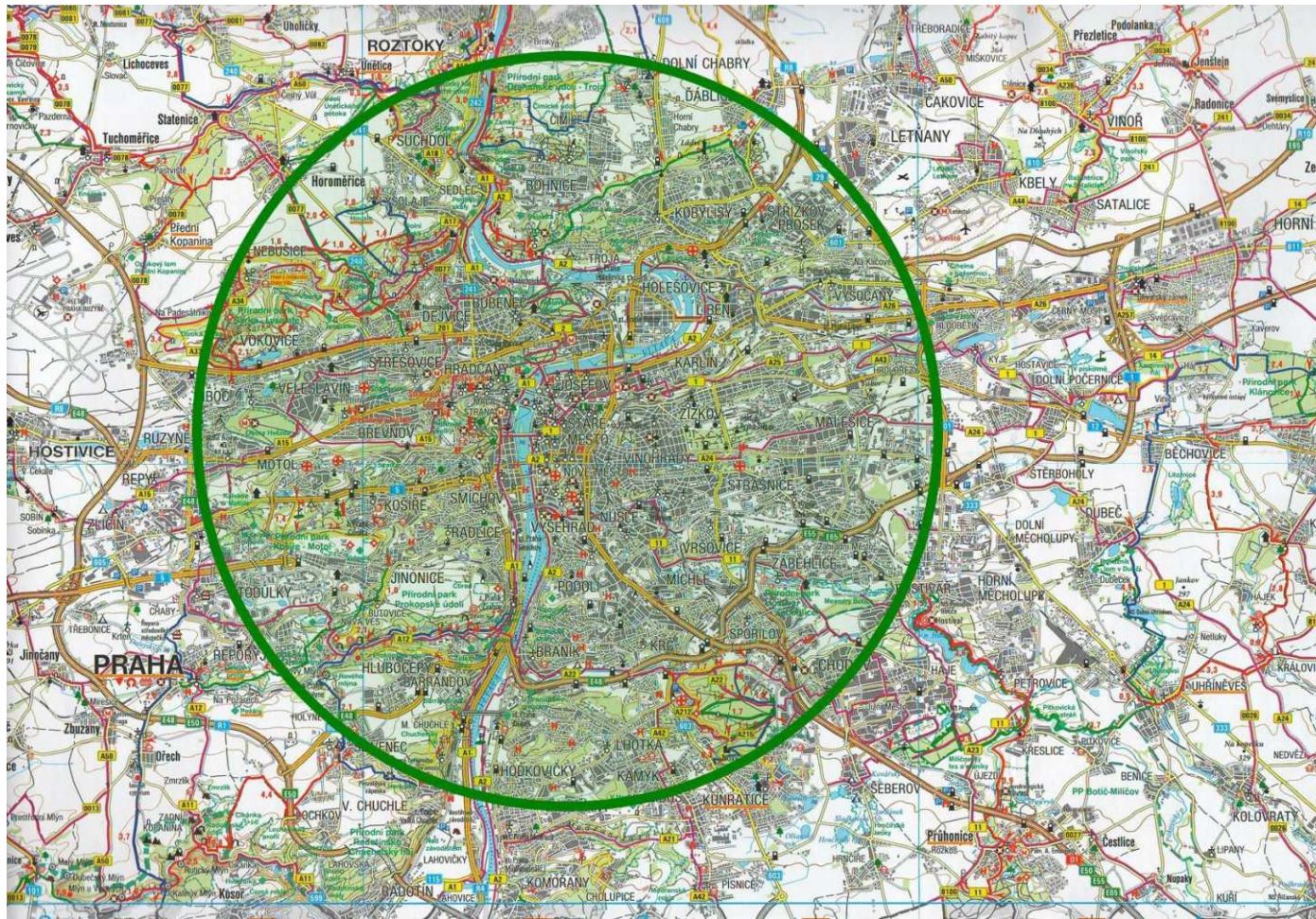
SIEMENS



Hranice souvislého osídlení města jsou určeny konečnými stanicemi linek tramvají 3 a 11 (Kačerov, Kobylisy, Liboc, Strašnice)

Praha 2014 – izochrona dostupnosti centra 30 minut (metro, cestovní rychlost 36 km/h)

SIEMENS



Hranice souvislého osídlení města jsou určeny konečnými stanicemi linek metra A, B, C (Háje, Zličín, Letňany, Černý Most, Hostivař)

Cíl: využití celé plochy území k hospodářskému, společenskému a rodinnému životu

SIEMENS

Izochrona denní dojížděky za prací, službami, vzdělání, zdravotnictvím, kulturou, či sportem, se stala hranicí mezi blahobytem a chudobou.

Doprava osob a zboží po rozsáhlejším 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.**

=> zadání (společenská poptávka): jezdit rychle a přitom energeticky nenáročně

Cíl: využití celé plochy území státu k hospodářskému, společenskému a rodinnému životu

SIEMENS

Nástrojem ke zvýšení poloměru izochrony denního dojíždění z místa bydliště do místa společenských aktivit jsou moderní formy mobility.

V současnosti je v ČR dominantním druhem dopravy osob individuální automobilismus (zajišťuje 61 % přepravních výkonů).

Individuální automobilismus je flexibilní a operativní, avšak má i zásadní negativa:

- nízká cestovní rychlost,**
- vysoká energetická náročnost (cca 0,45 kWh/os km),**
- vysoká závislost na fosilních palivech (uhlíková stopa cca 0,12 kg CO₂/os km)**
- velká ztráta času (77 % cestujících je zaneprázdněno řízením),**
- nízká produktivita využití investic do nákupu vozidel (jen 24 minut denně, 2 % času)**

91 % energie pro dopravu tvoří v ČR fosilní paliva – ropné produkty a zemní plyn (6 % biopaliva, 3 % elektřina)

Již ve střednědobém horizontu je nutná změna dopravního chování.

Energetická náročnost mobility

Možnosti volby:

I. valivý odpor $F_v = f_v \cdot m \cdot g$

a) pneumatika/vozovka: $f_v = 0,008$ (z bezpečnostních důvodů nelze snížit),

b) ocelové kolo/ocelová kolejnice: $f_v = 0,001$

II. aerodynamický odpor $F = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2$

a) individuální doprava: za čelní plochou S jsou umístěny 2 řady sedadel,

**b) hromadná doprava: za čelní plochou S je umístěno 15 řad sedadel (bus),
respektive 250 řad sedadel (vlak)**

III. účinnost motoru

a) spalovací motor: cca 36 % (téměř výhradně fosilní paliva – ropa a zemní plyn),

b) elektrický motor: cca 92 % (elektrická energie vyrobitelná i z obnovitelných zdrojů)

Energetická náročnost mobility

Měrná spotřeba energie je dána podílem fyzikální a dopravní práce:

$$e = A / D = F \cdot L / (m \cdot L) = F / m \text{ (kWh/tkm, respektive kWh/os. km)}$$

Měrná spotřeba energie závisí na valivém tření ($F_v = f_v \cdot m \cdot g$), aerodynamickém odporu ($F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2$) a účinnosti pohonů (η):

$$e = F / \eta = (F_v + F_a) / \eta = (f_v \cdot m \cdot g + 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2) / \eta$$

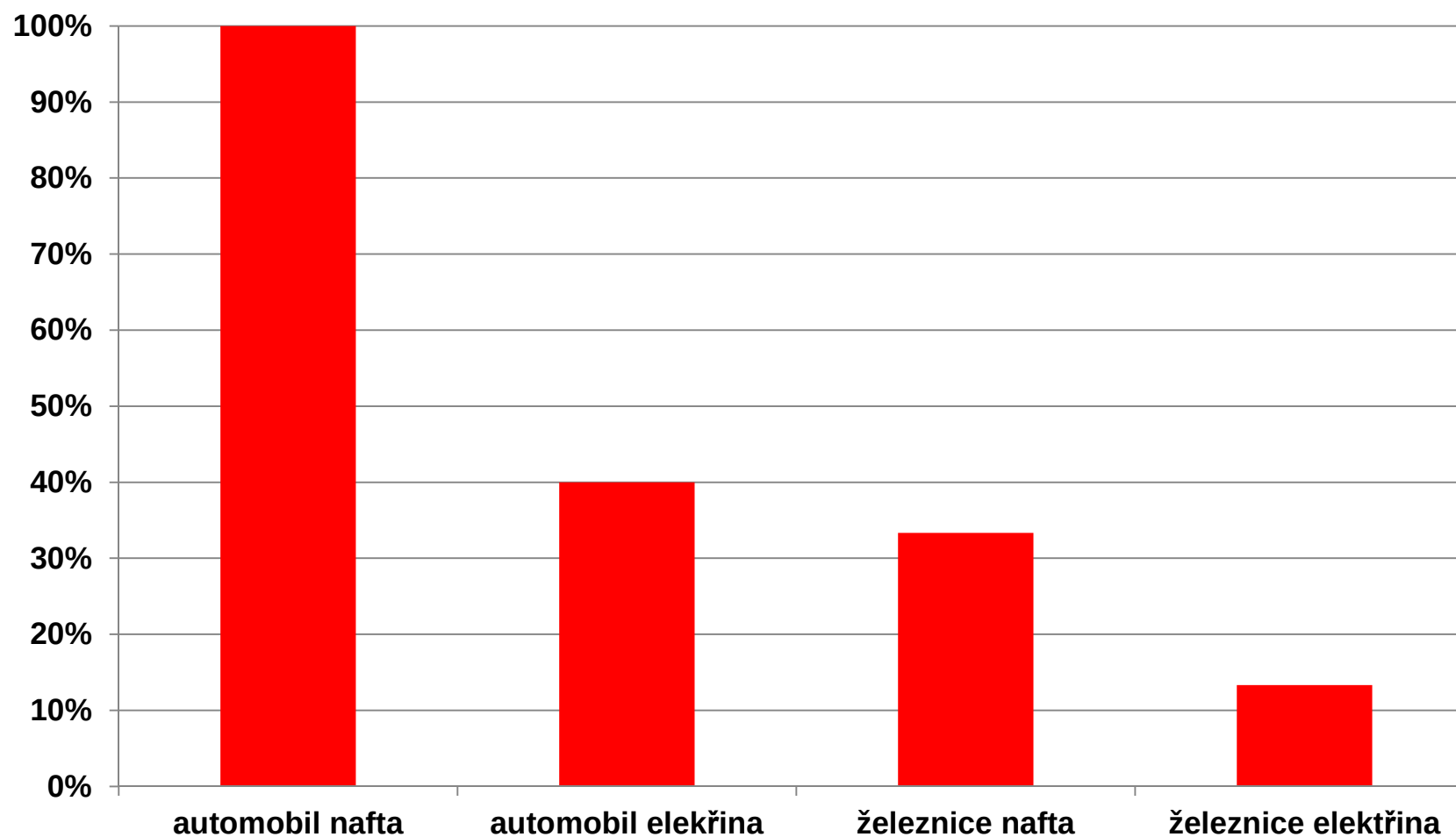
Ideální vozidlo:

- nízký součinitel valivého odporu f_v (tvrdá kola, tvrdá jízdní dráha),
- štíhlý aerodynamický tvar $C_x \cdot S$,
- vysoká účinnost pohonu η



Energetická náročnost mobility

poměrná energetická náročnost dopravy



Dekarbonizace mobility

Podle zákona zachování hmoty se při spalování uhlí, nafty i zemního plynu přesouvá uhlík v podobě CO₂ z podzemí na oblohu, do zemského obalu.

Oproti době předindustriální jsme již v zemském obalu zvýšili množství oxidu uhličitého z cca 3 500 miliard tun (280 ppm) na současných cca 5 000 miliard tun (400 ppm) a střední roční teplotu země jsem zvedli o cca 1 ° C.

V prosinci 2015 se 147 státníků a reprezentantů ze 196 zemí na konferenci v Paříži dohodlo, že by oteplení nemělo přesáhnout 1,5 až 2 stupně.

K naplnění tohoto cíle můžeme do zemského obalu poslat již jen:

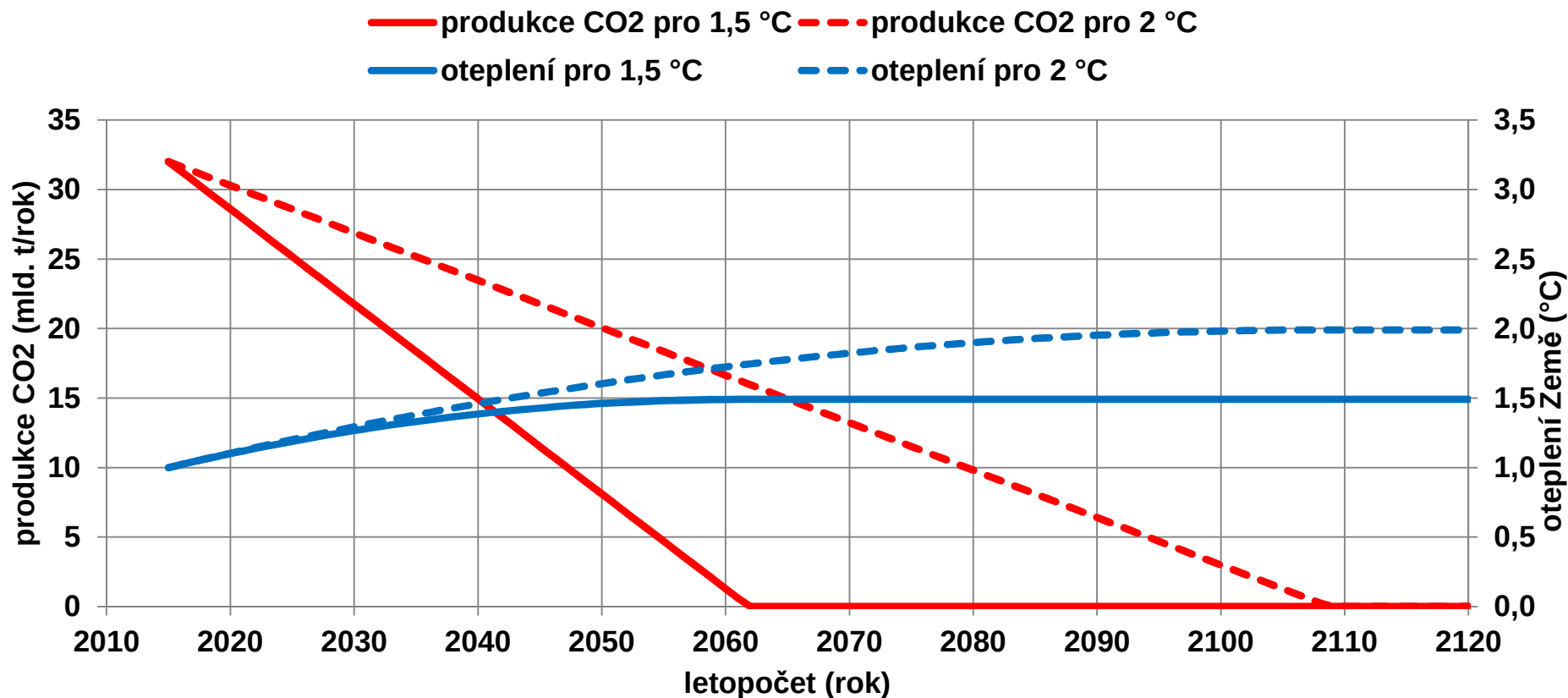
- a) 750 miliard tun CO₂ (pro oteplení o 1,5 ° C),
- b) 1 500 miliard tun CO₂ (pro oteplení o 2 ° C).

Přitom roční produkce CO₂ činila v roce 2015 32 miliard tun CO₂

Velká část geologických zásob uhlí, ropy a plynu nebude vytěžena, stane se bezcennou.

Plynulý scénář ukončení spotřeby fosilních paliv

řízení oteplení Země (plynulý scénář)



K omezení vlivu klimatických změn je nutno přestat používat fosilní paliva.

Doprava 4.0

Cíl: využití celé plochy území ČR k plnohodnotnému profesnímu, společenskému i rodinnému životu (dekoncentrace koncentrovaného osídlení)

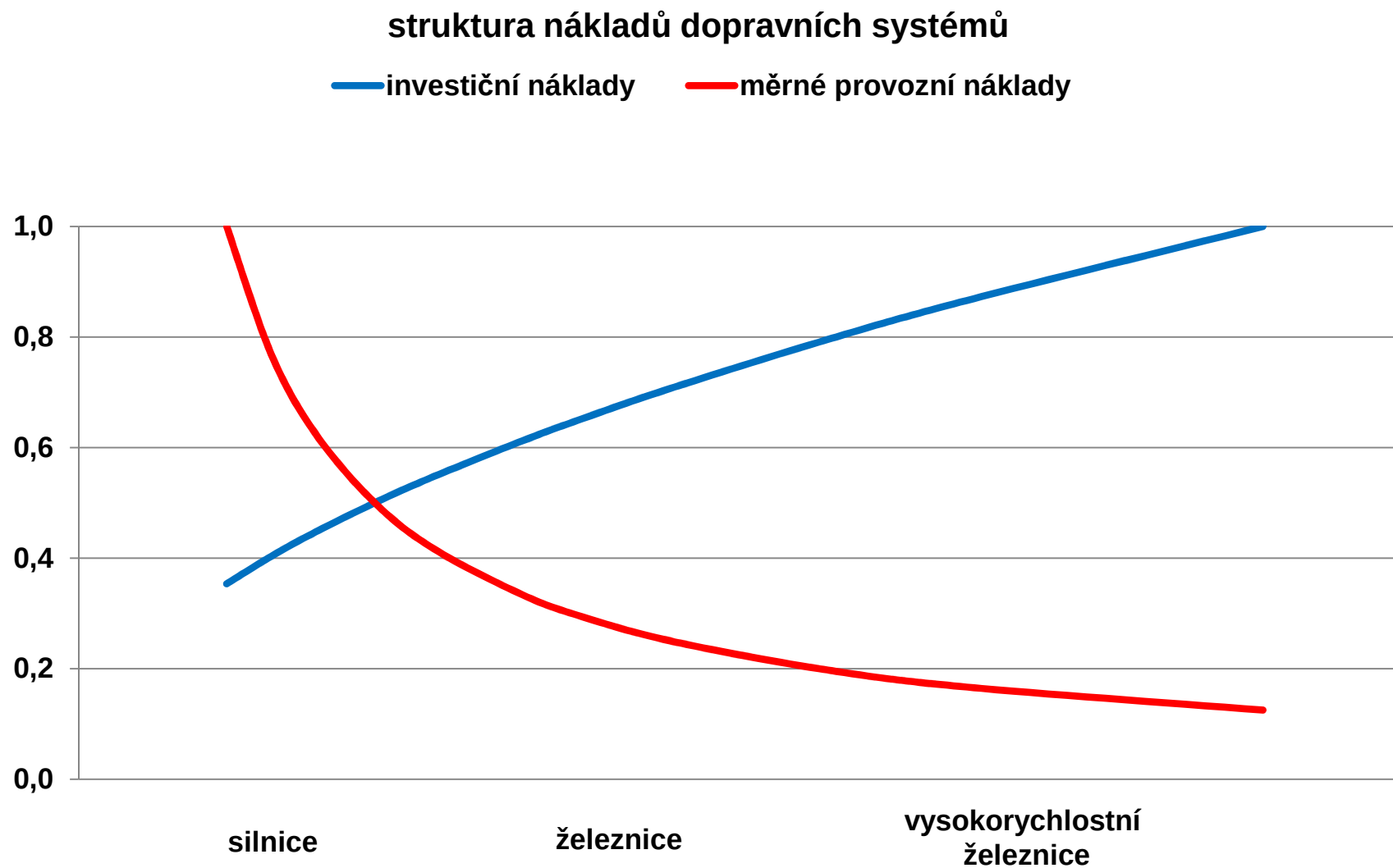
Podmínka:

- nízká energetická náročnost,
- trvalá udržitelnost (nezávislost na fosilních palivech),
- vlídnost k lidem (bezpečnost, pohodlí, úspora a využití času, ...).

Hierarchická struktura dopravních systémů (logika efektivnosti investic):

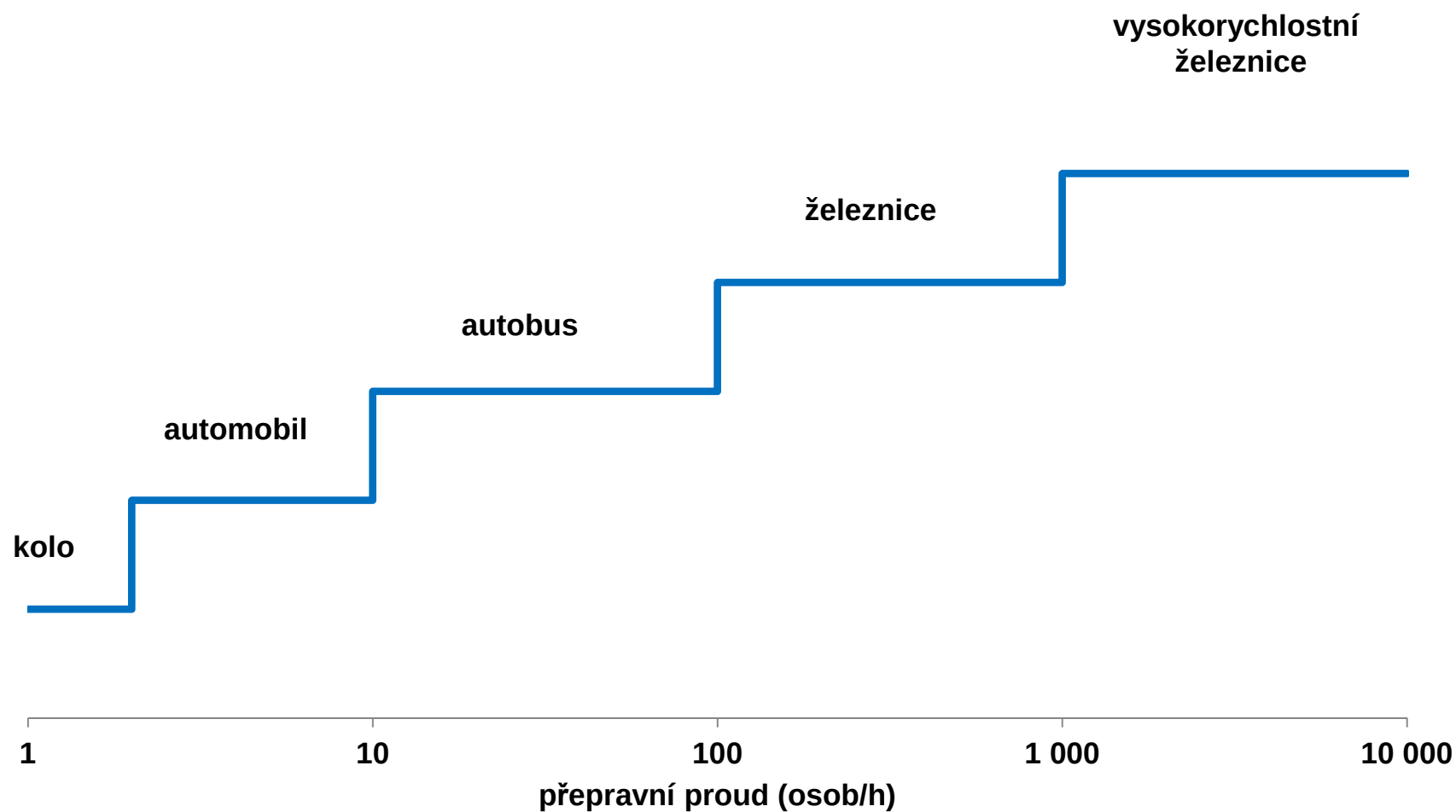
- nejsilnější přepravní proudy: elektrická železnice s liniovým napájením,
- silné přepravní proudy: akumulátorová železnice,
- slabší přepravní proudy: elektrobusy,
- slabé přepravní proudy: elektromobily,
- nejslabší přepravní proudy: pěší chůze, jízdní kolo.

Struktura nákladů dopravního systému



Volba dopravního systému

volba optimálního dopravního systému



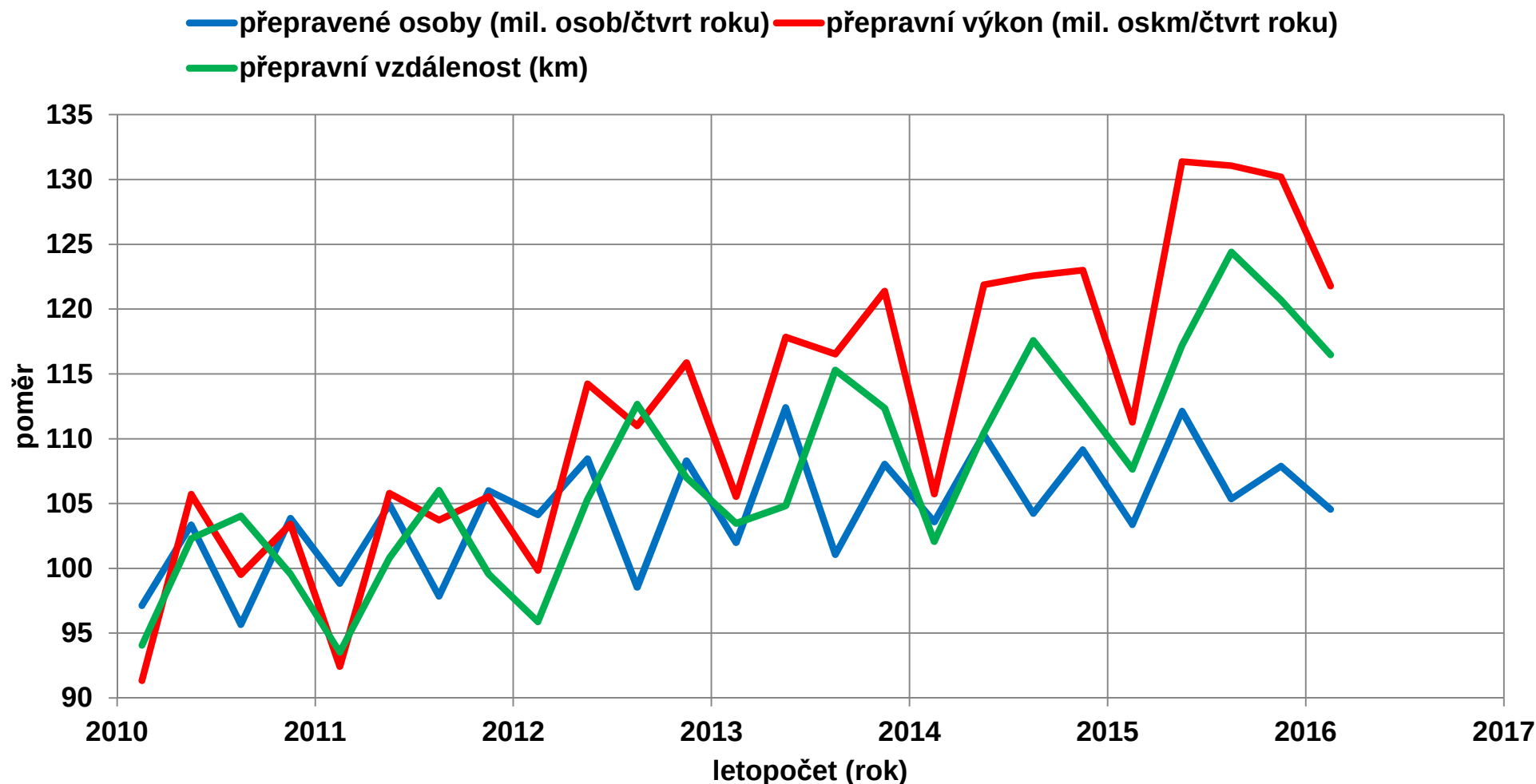
Změna dopravního chování je možná.

Železnice v ČR: meziroční nárůst o 6,4 %, celkem o 26 % za 5 let

Tahounem tohoto trendu je dálková doprava

SIEMENS

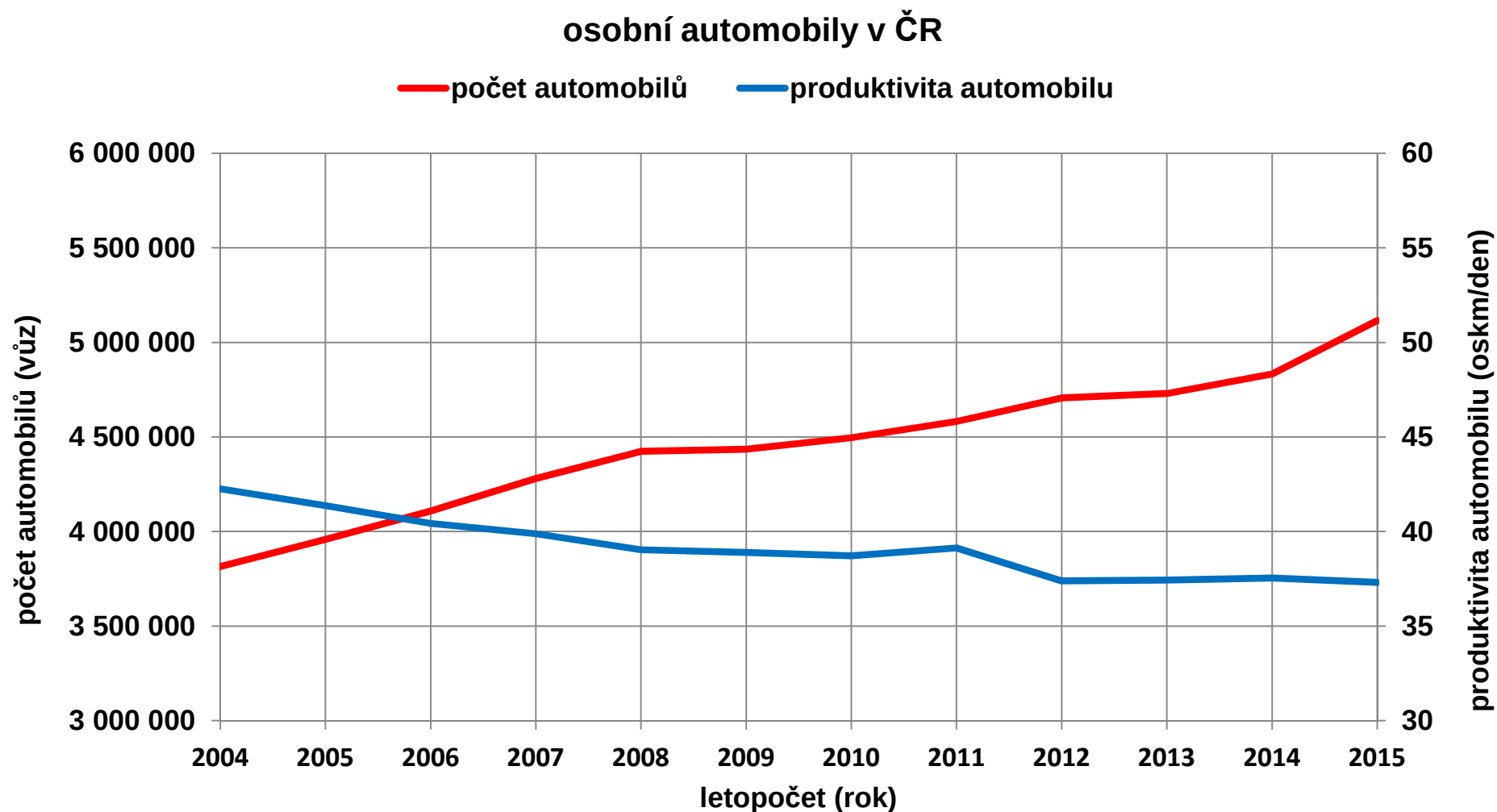
osobní železniční přeprava v ČR (2010: 100 %)



V odezvě na modernizaci koridorů a příchod nových vozidel roste přepravní poptávka.

ČR: počet automobilů roste rychleji, než jejich přepravní výkony
=> produktivita osobních automobilů klesá

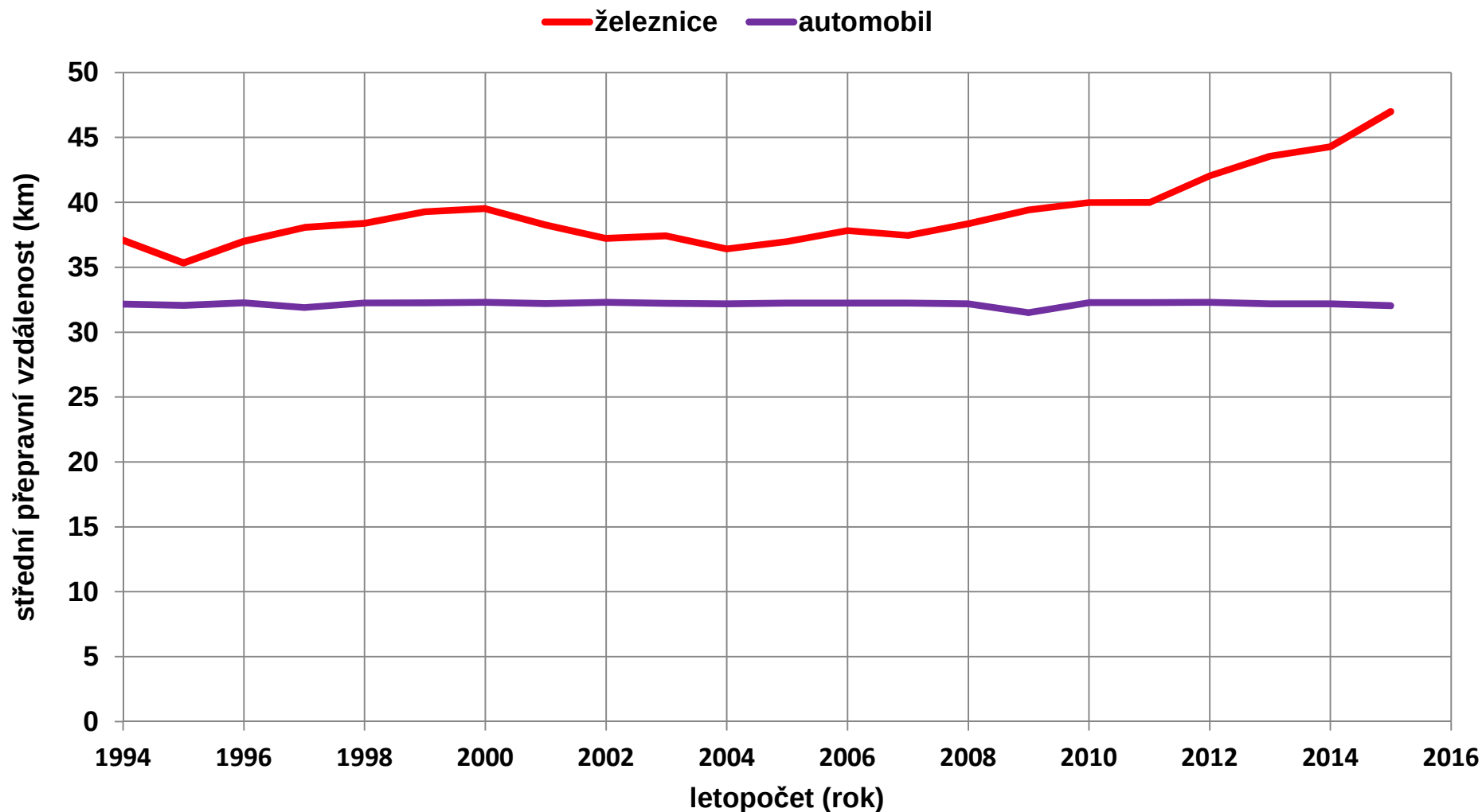
SIEMENS



**Střední přepravní vzdálenost vlaky roste, IAD stagnuje
=> cestující se naučili jezdit autem na vlak**

SIEMENS

střední přepravní vzdálenost automobilové a osobní železniční dopravy v ČR

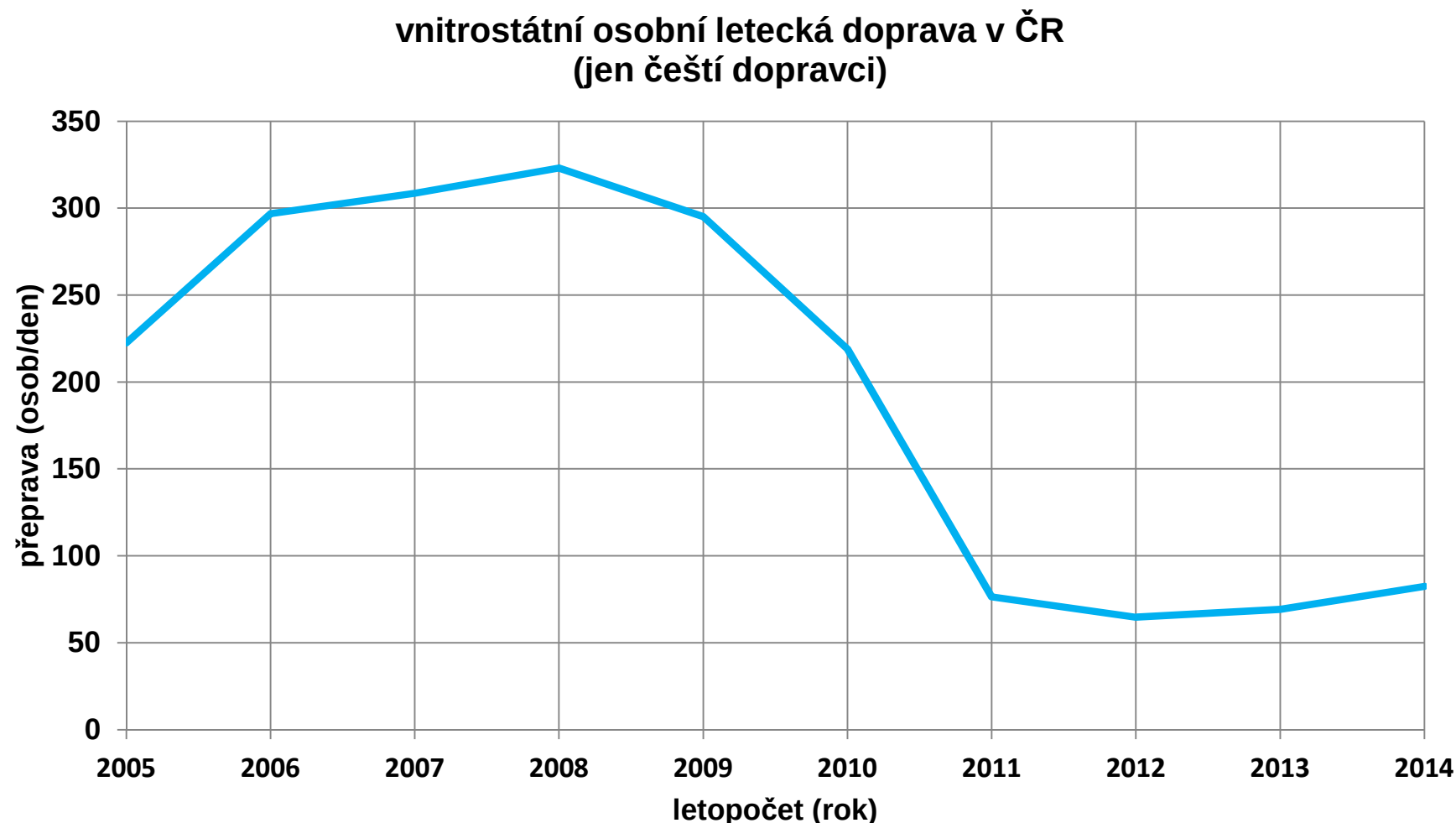


Příklad flexibility cestujících

Pokles vnitrostátních letů po zavedení SC linky

Praha - Ostrava

SIEMENS



V odezvě na zkrácení doby cesty a zaručenou úroveň cestovního pohodlí přešli cestující z letecké dopravy na železnici.

Vysokorychlostní vlaky

Pěšky – chůze rychlostí 5 km/h: spotřeba 8 kWh/100 km

Automobil – jízda rychlostí 130 km/h: spotřeba 12,5 kWh/sedadlo/100 km

Železnice – jízda rychlostí 300 km/h: spotřeba 4 kWh/sedadlo/100 km

Letadlo – let rychlostí 900/300 km/h: spotřeba 40 kWh/sedadlo/100 km

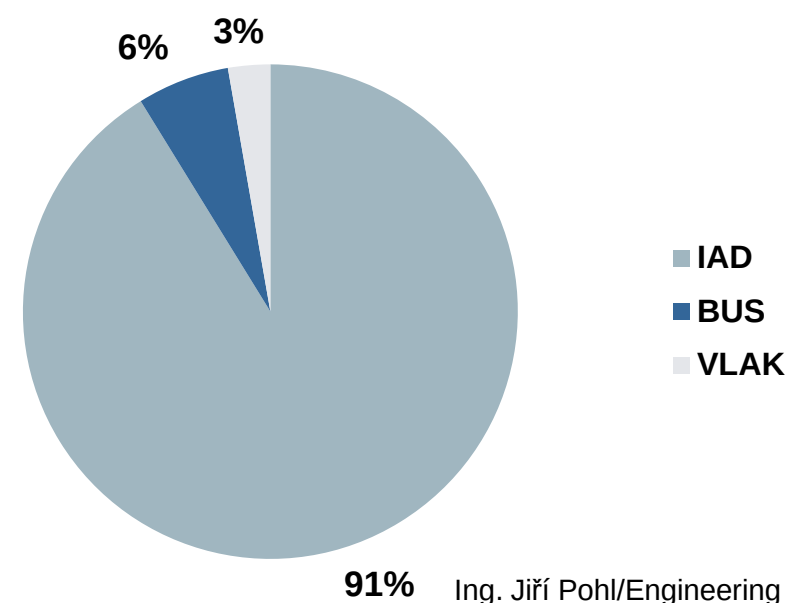


Praha – Brno: přepravní průzkum KORDIS JMK – struktura přepravy

SIEMENS

Praha - Brno		Průzkum Kordis 2013				
Denně v součtu obou směrů						
					hh:mm	min
IAD	91%		47 844	91,2%	2:00	120
BUS	6%	69%	3 161	6,0%	2:30	150
VLAK	3%	31%	1 450	2,8%	2:42	162
hromadná	9%	100%	4 611	8,8%		
celkem	100%		52 455	100,0%		

osobní přeprava mezi Prahou a Brnem



Ekonomická analýza nákladů a výnosů

Ekonomická analýza dopravních projektů je podle Věstníku Ministerstva dopravy ČR č. 11/2013 založena na celospolečenských výnosech daných:

- úsporou vnitřních nákladů,**
- úsporou vnějších nákladů,**
- úsporou času.**

Všechny tyto položky závisí na počtu cestujících, využívajících příslušnou investici.

a) Konverze

Přechod cestujících ze silniční dopravy (individuální automobilismus, autobus) na vysokorychlostní železnici generuje úsporu ve všech výše uvedených položkách. Počet osob je podmíněn časovou a cenovou atraktivitou vysokorychlostní železnice.

b) Indukce

Vznik nových cest vysokorychlostní železnici generuje další hodnoty, též je podmíněn časovou a cenovou atraktivitou vysokorychlostní železnice.

Rychlost působí dvojitým účinkem – zvyšuje počet cestujících (atraktivita) a zvětšuje výnos z úspory času.

Výnosy podle Věstníku Ministerstva dopravy ČR č. 11/2013

SIEMENS

hodnota času stráveného cestováním			
dopravní prostředek	čas	hodnota času	
		Kč/os.h	
auto	pracovní	653	
autobus	pracovní	524	
vlak	pracovní	653	
auto	nepracovní	276	
autobus	nepracovní	199	
vlak	nepracovní	276	
vnější náklady osobní dopravy			
dopravní systém	automobil	autobus	železnice
	Kč/1000 os.km	Kč/1000 os.km	Kč/1000 os.km
nehody	1 697	146	42
hluk	269	61	184
znečištění ovzduší	816	924	231
změny klimatu	750	420	250
celkem	3 532	1 551	707

Konverze

Z průzkumu Kordis vyplývá, že jak doba cesty, tak cena jízdenky jsou rozhodujícími faktory konverze.

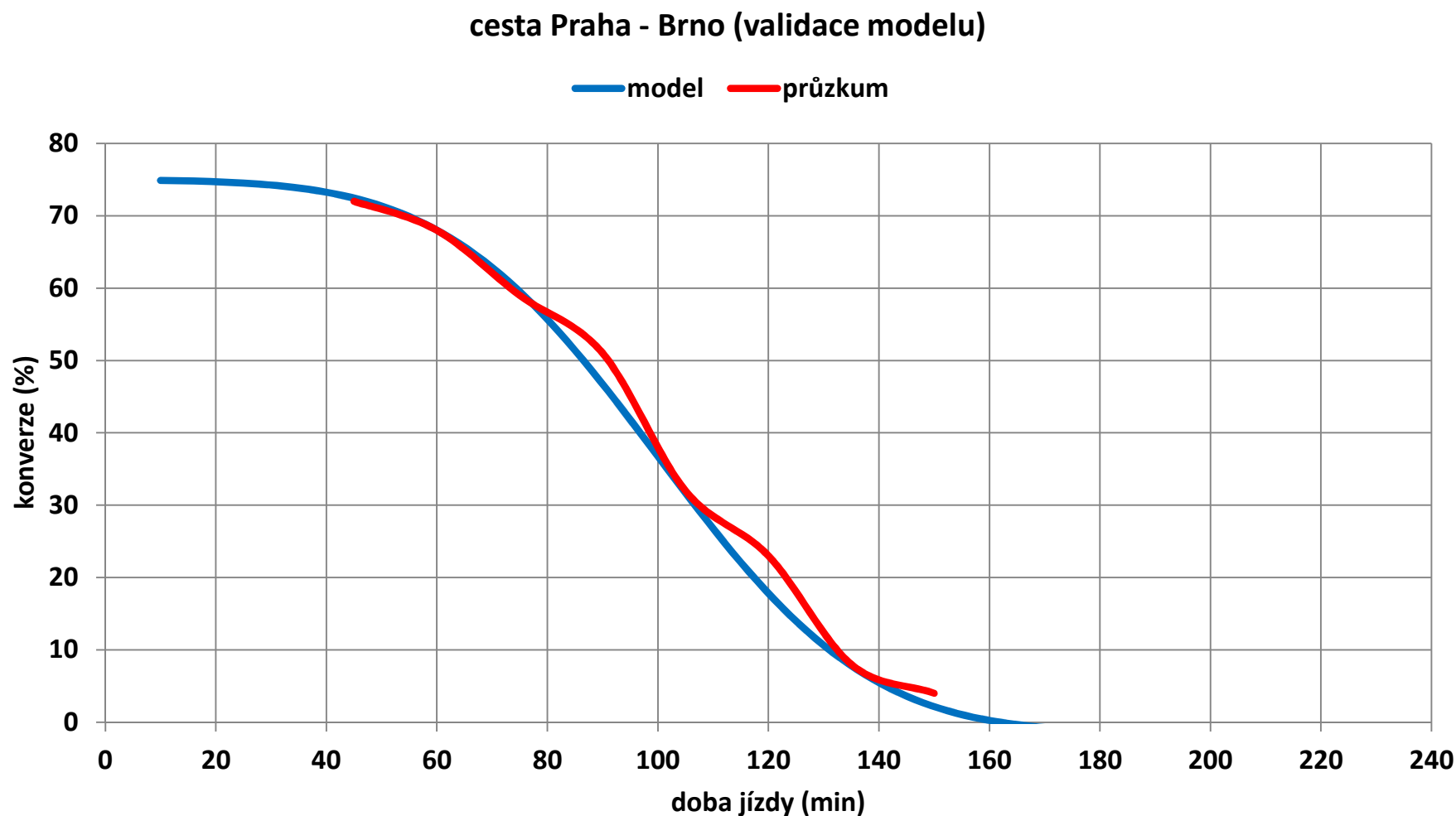
Jak při jednodimenzionálním hodnocení rozhodování osob (zvláště čas, zvláště cena), tak při dvoudimenzionálním hodnocení rozhodování osob (společně čas a cena) statistických dat lze dospět k velmi dobré shodě s Gaussovým rozdělením.

Kritérium času

- a) střední hodnota potřebné doby jízdy vysokorychlostní železnice není totožná se střední hodnotou doby jízdy automobilem (120 minut), ale musí kratší (100 minut) – vliv horší dostupnosti nádraží a intervalu mezi vlaky,**
- b) směrodatná odchylka činí 30 min (variační koeficient 25 %),**
- c) posun maxima o 25 % (nikdy nepojedou vlakem),**
- d) posun minima o 3 % (již jsou ve vlaku)**

Praha – Brno: přepravní průzkum KORDIS JMK – konverze cestujících z IAD na železnici

SIEMENS



Magický bod: 55 minut

Konverze

Kritérium ceny

Distribuční funkce je také velmi blízká Gaussovu rozdělení, ale má vyšší rozptyl (variační koeficient 40 %)

Rozhodování lidí je ovlivněno Baťovým syndromem (efekt „X99“):

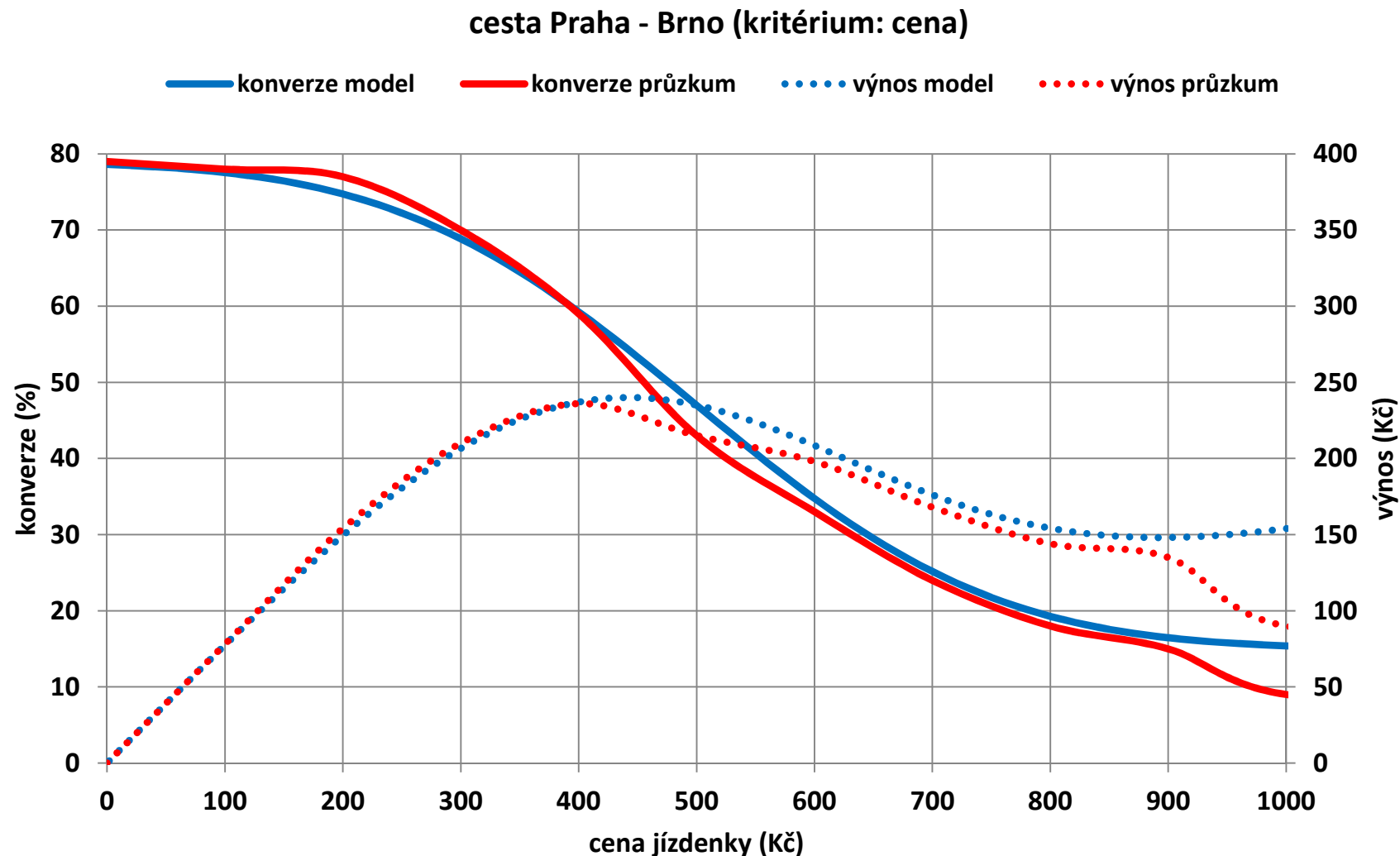
- za 1 000 Kč skoro nikdo,
- za 500 Kč jen část,
- za 199 Kč skoro všichni.

U celkového výnosu se uplatňuje Lafaierovo pravidlo výběru daní:

- optimum výnosu z jízdného je při ceně jízdenky kolem 400 Kč,
- optimum celkového výnosu je při ceně jízdenky kolem 200 Kč
(při době cesty 55 minut je společenský výnos na jednoho cestujícího 1 728 Kč).

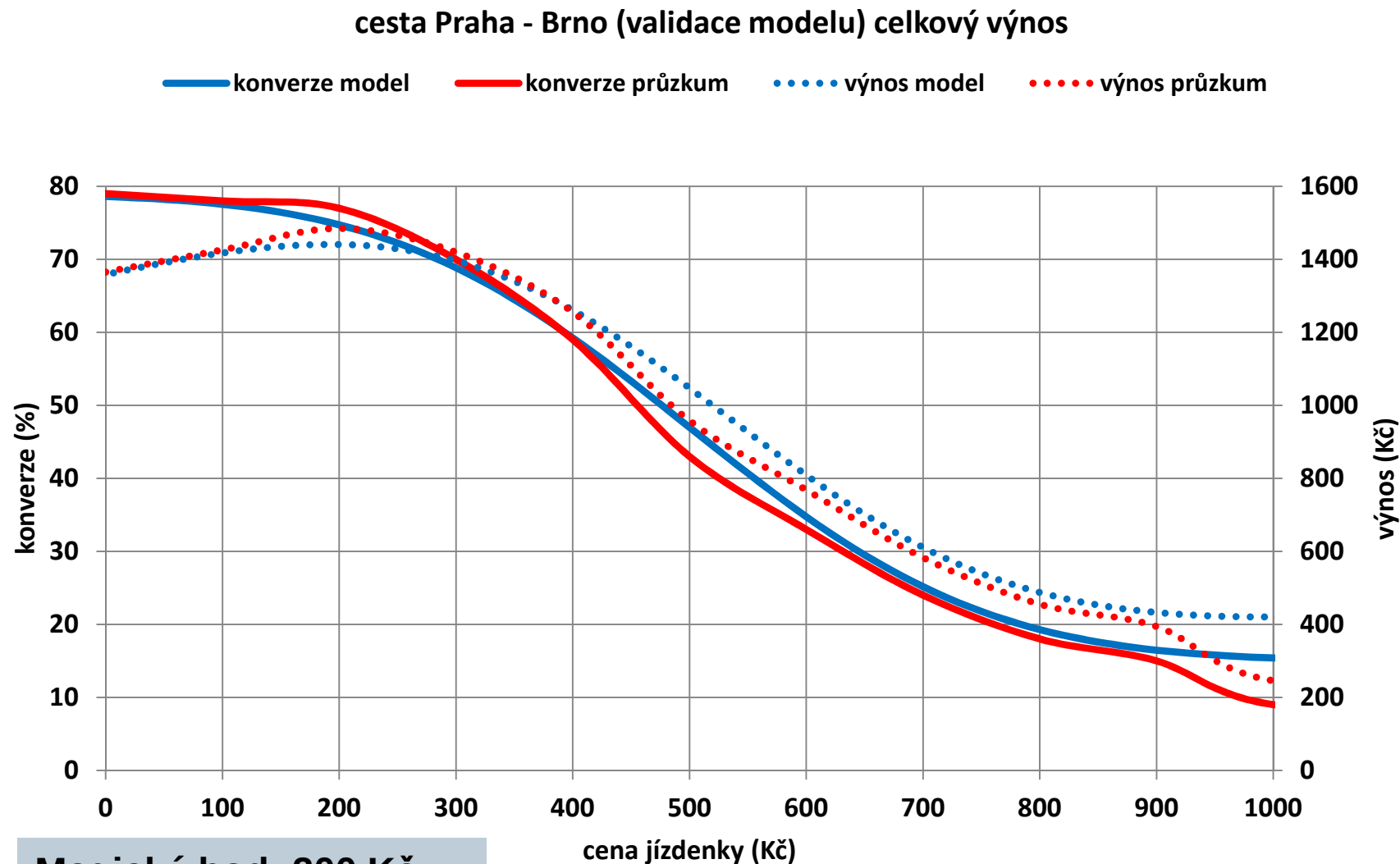
Praha – Brno: přepravní průzkum KORDIS JMK – konverze cestujících z IAD na železnici: výnos z jízdného

SIEMENS



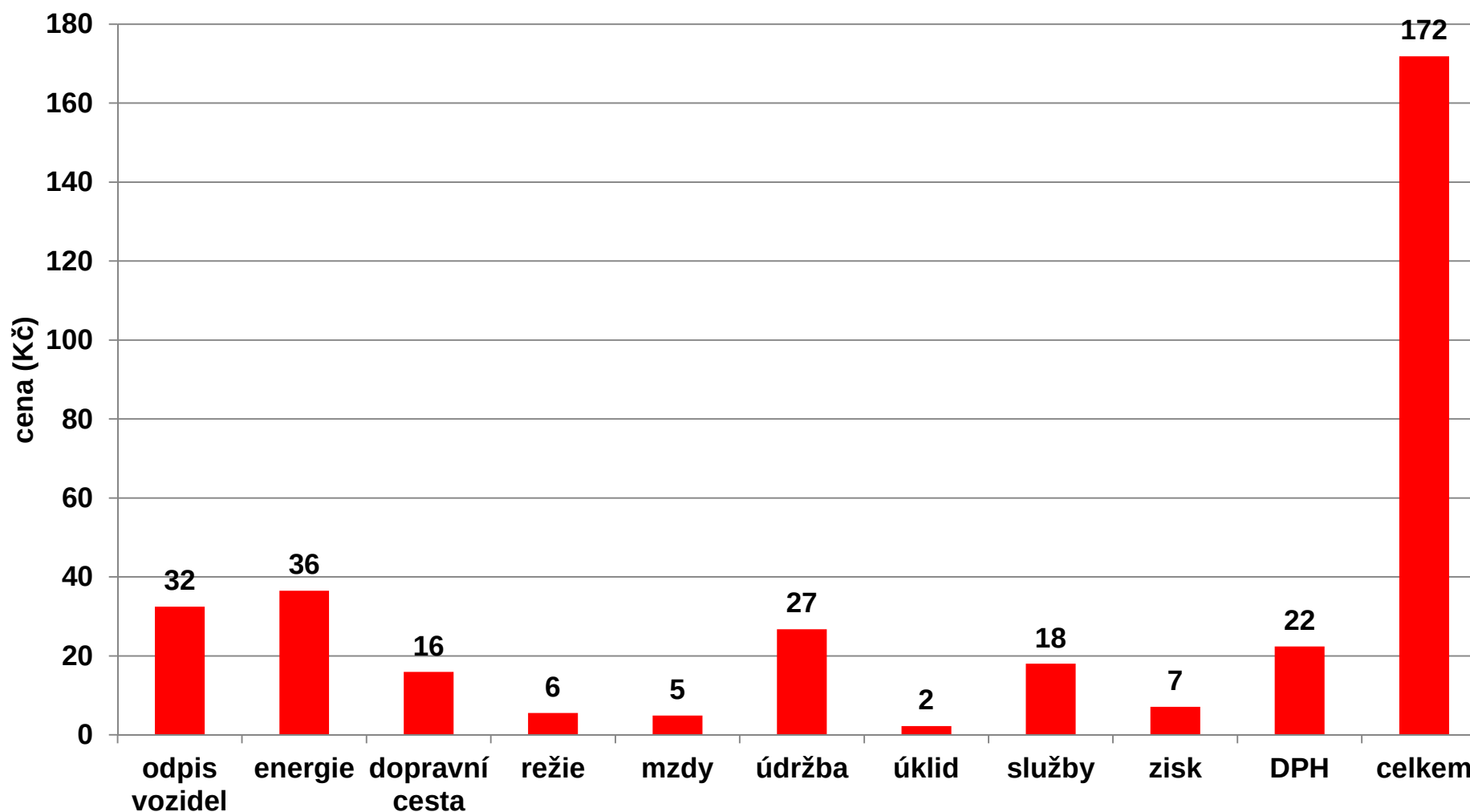
Praha – Brno: přepravní průzkum KORDIS JMK – konverze cestujících z IAD na železnici: celkový výnos

SIEMENS



Struktura provozních nákladů (ceny jízdenky)

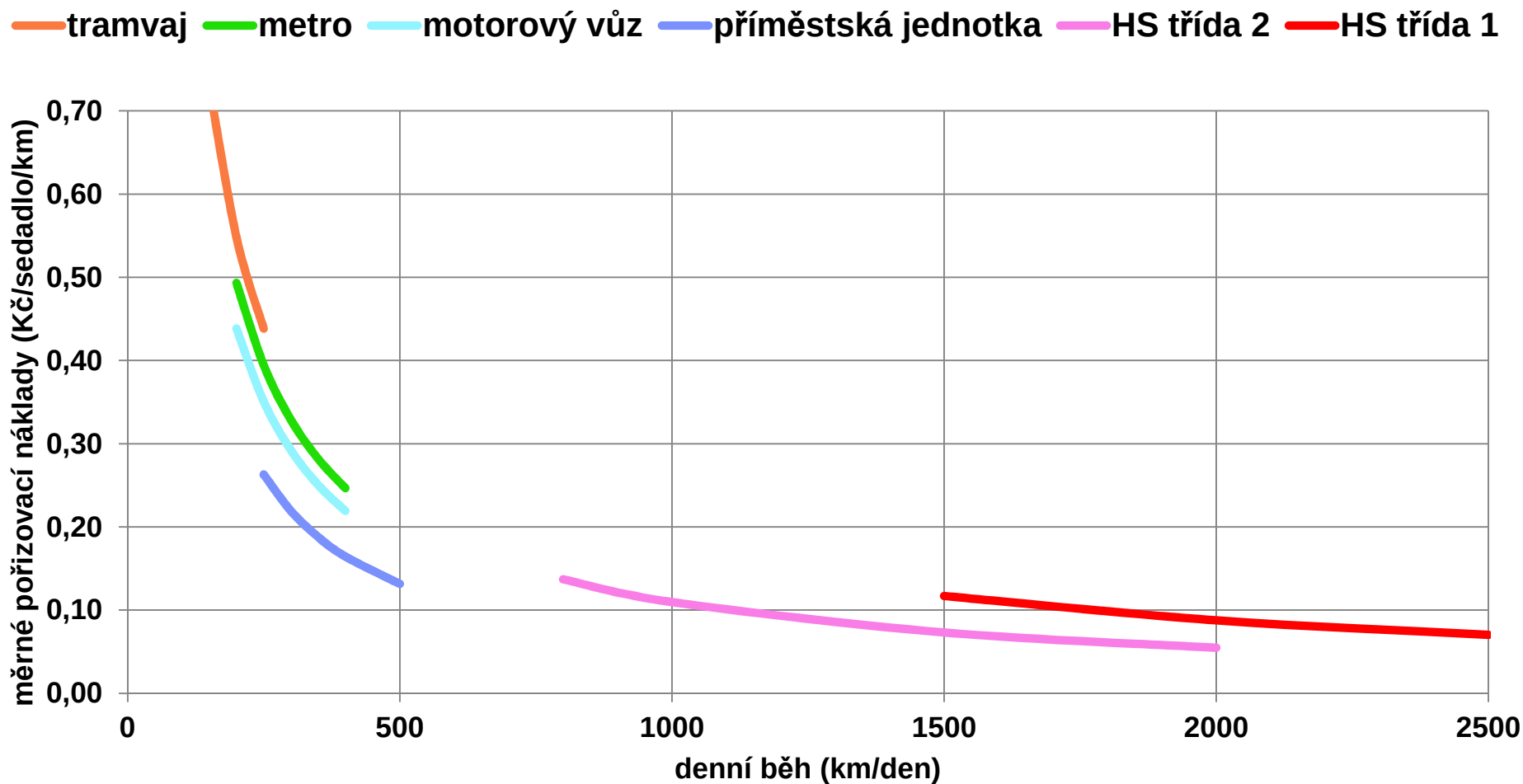
cena jízdenky vysokorychlostní železnice Praha - Brno (300 km/h, 54 min)



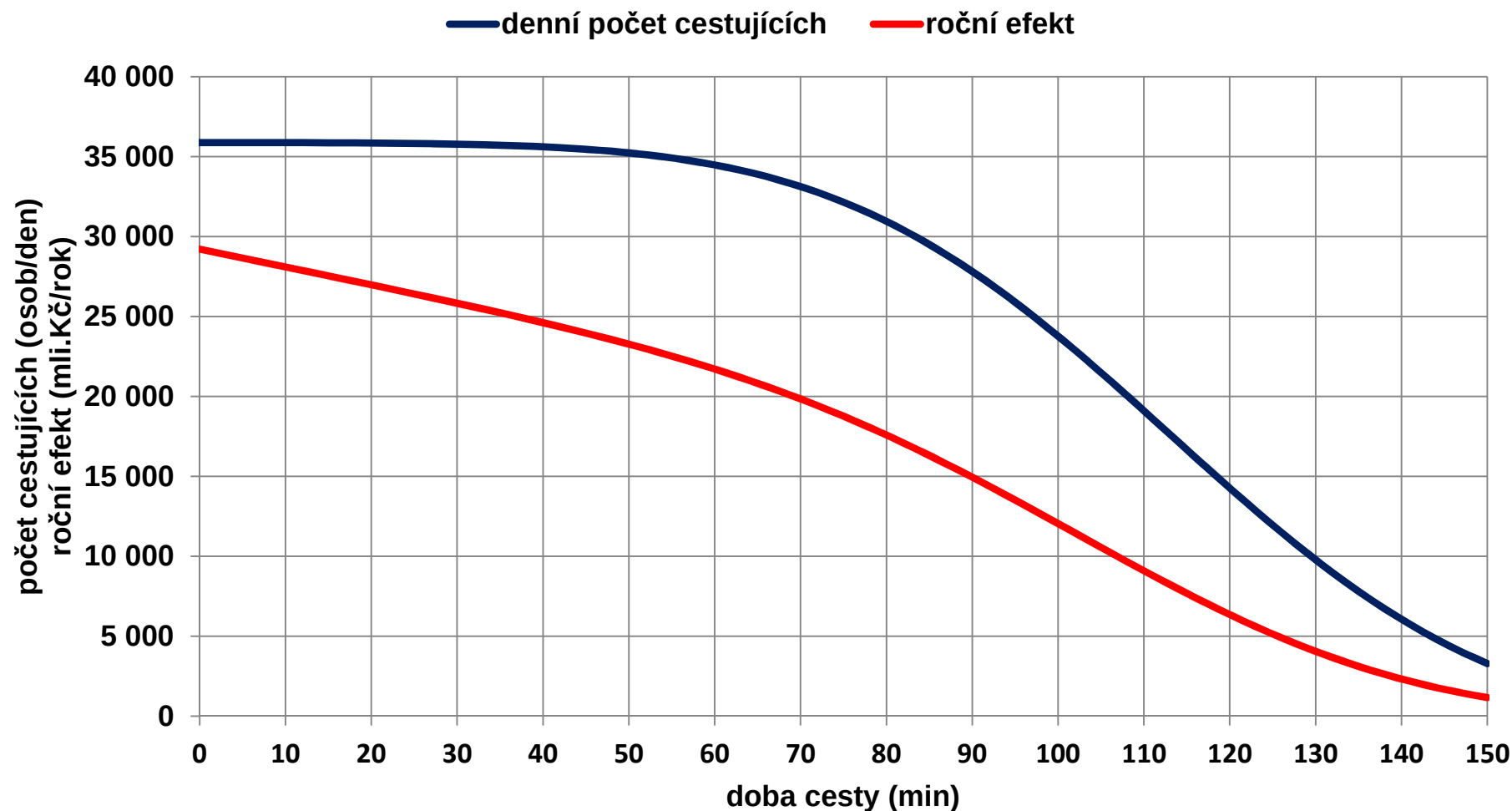
Rychlost snižuje dráhový gradient nákladů úměrných času (odpisy a mzdy)

SIEMENS

Ekonomika provozu kolejového vozidla



konverze cestujících mezi Prahou a Brnem z IAD na železnici



Indukce cestujících HS železnicí

Po odečtení doby spánku, práce, rodinného života, volnočasových aktivit a servisních činností zbude člověku každý den určitý čas na dopravu.

Za tento čas T se při rychlosti v dopraví na vzdálenost L :

$$L = T \cdot v$$

Pokud dojde ke zvýšení rychlosti na hodnotu v' mají lidé dvě možnosti:

a) cestovat na větší vzdálenost (zvětšení počtu cestujících N):

$$L' = T \cdot v' \Rightarrow N' = (v' / v) \cdot N$$

b) cestovat kratší dobu a zbylý čas využít k jiným aktivitám (zachování počtu cestujících):

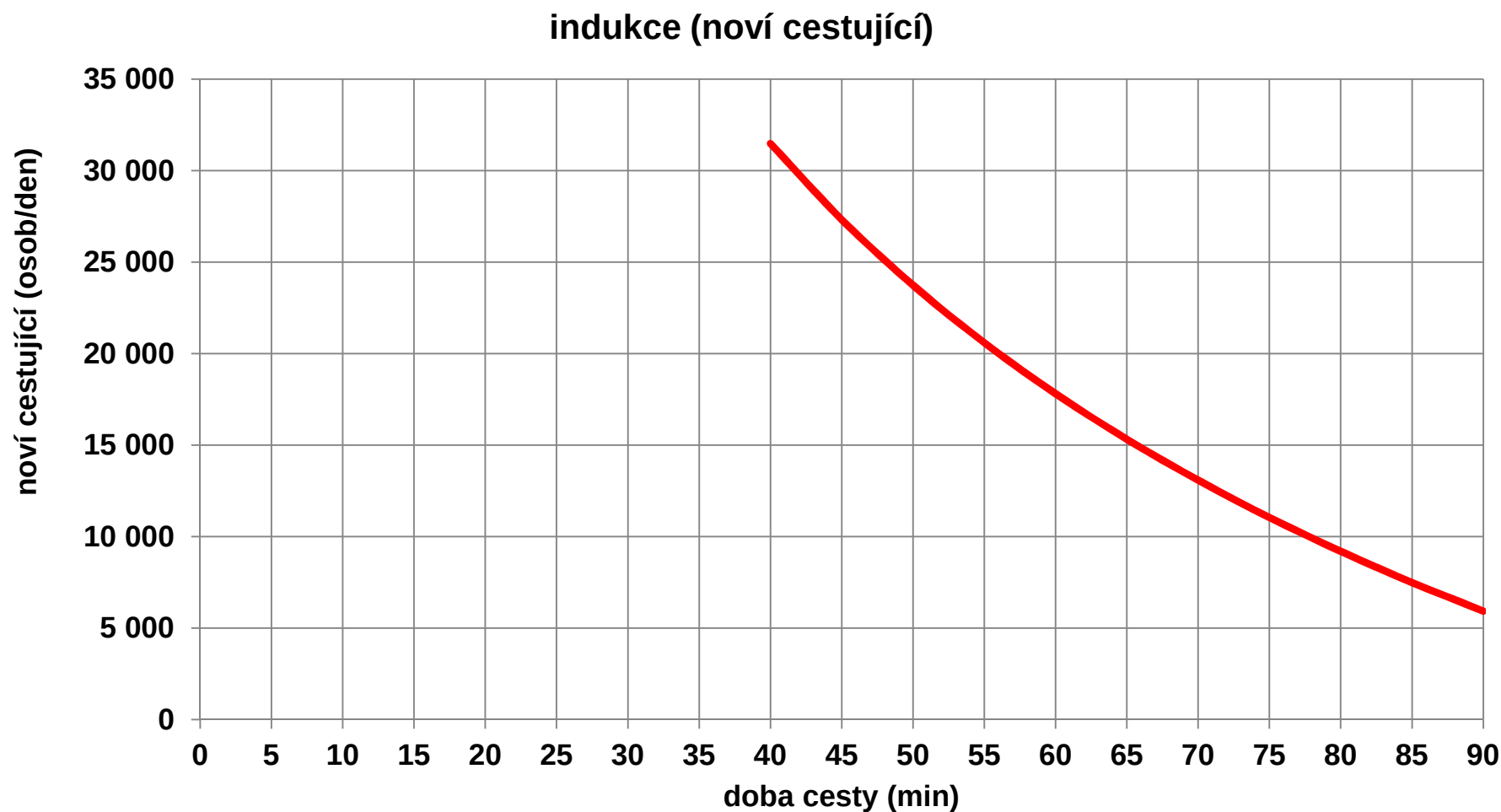
$$T' = L / v' \Rightarrow N' = N$$

Při stejném vnímání obou hodnot (mobilita, úspora času) lidé rozdělí efekt na oba činitele. Výsledkem je odmocninová funkční závislost růstu počtu cestujících:

$$N' = (v' / v)^{0,5} \cdot N$$

Praha – Brno: indukovaná přepravní poptávka (exponent 0,5)

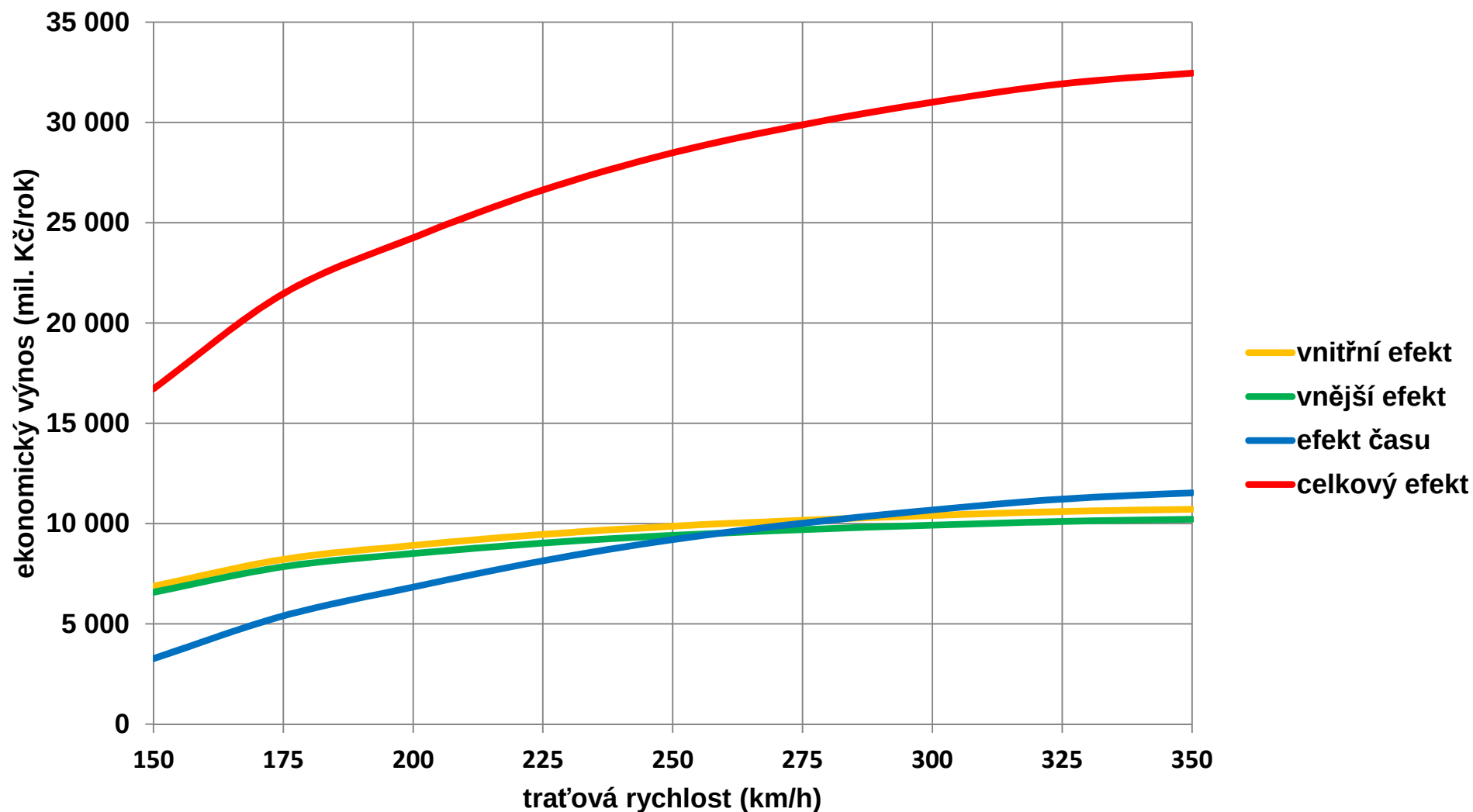
SIEMENS



HS Praha – Brno: struktura ekonomických přínosů (cestující: konverze i indukce)

SIEMENS

HS trať Praha - Brno:
vliv traťové rychlosti na ekonomický přínos



Optimalizace investičních a provozních nákladů vysokorychlostního železničního systému moderními technologiemi

SIEMENS

subsystém trať (INS)

- minimalizace délky mostů a tunelů využitím velkých podélných sklonů (35 ‰),
- minimalizace poloměrů oblouků použitím vysokých hodnot převýšení,
- naprosté minimum stanic a výhybek,
- vysoká stabilita geometrické polohy koleje docílená pevnou jízdní dráhou

subsystém energie (ENE)

- minimalizace počtu trakčních napájecích stanic použitím systému 2 x 25 kV,
- minimalizace požadavků na distribuční síť 3 x 110 kV použitím aktivních balancérů,

subsystém řízení a zabezpečení (CCS)

- jednotný evropský vlakový zabezpečovač ETCS level 3,
- žádné kabely a žádné aktivní prvky v kolejišti, jen pevné balízy a rádiový přenos,
- bez návěstidel, bez železničních přejezdů, minimum výhybek

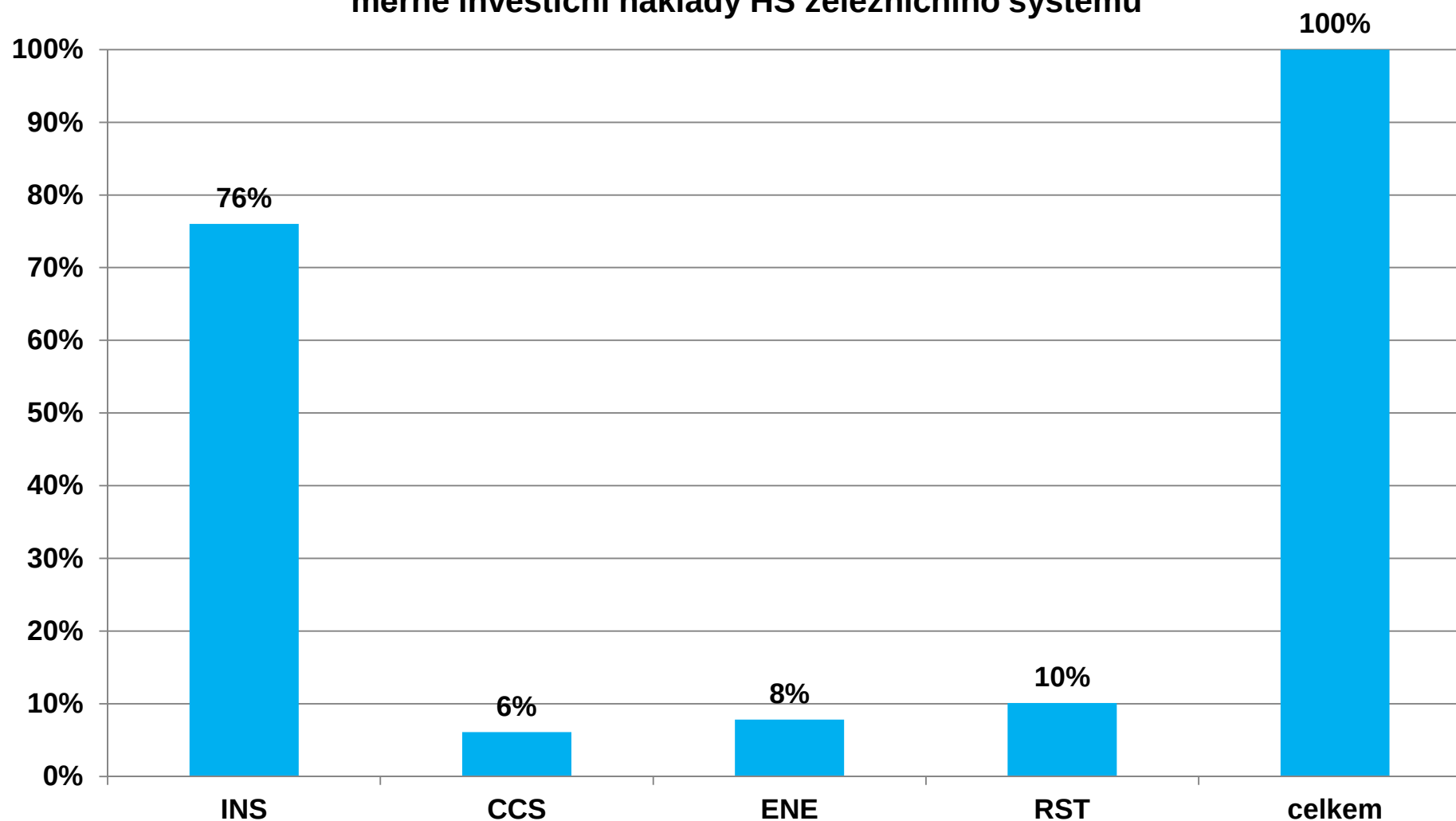
subsystém vozidla (RST)

- ve srovnání s konvenčními vozidly sice dvojnásobná cena (1,6 mil. Kč/sedadlo versus 0,8 mil. Kč/sedadlo) ale trojnásobný denní proběh (2 100 km/den versus 700 km/den), tedy nižší měrné náklady než u konvenčních kolejových vozidel.

Struktura nákladů vysokorychlostního železničního systému

SIEMENS

měrné investiční náklady HS železničního systému

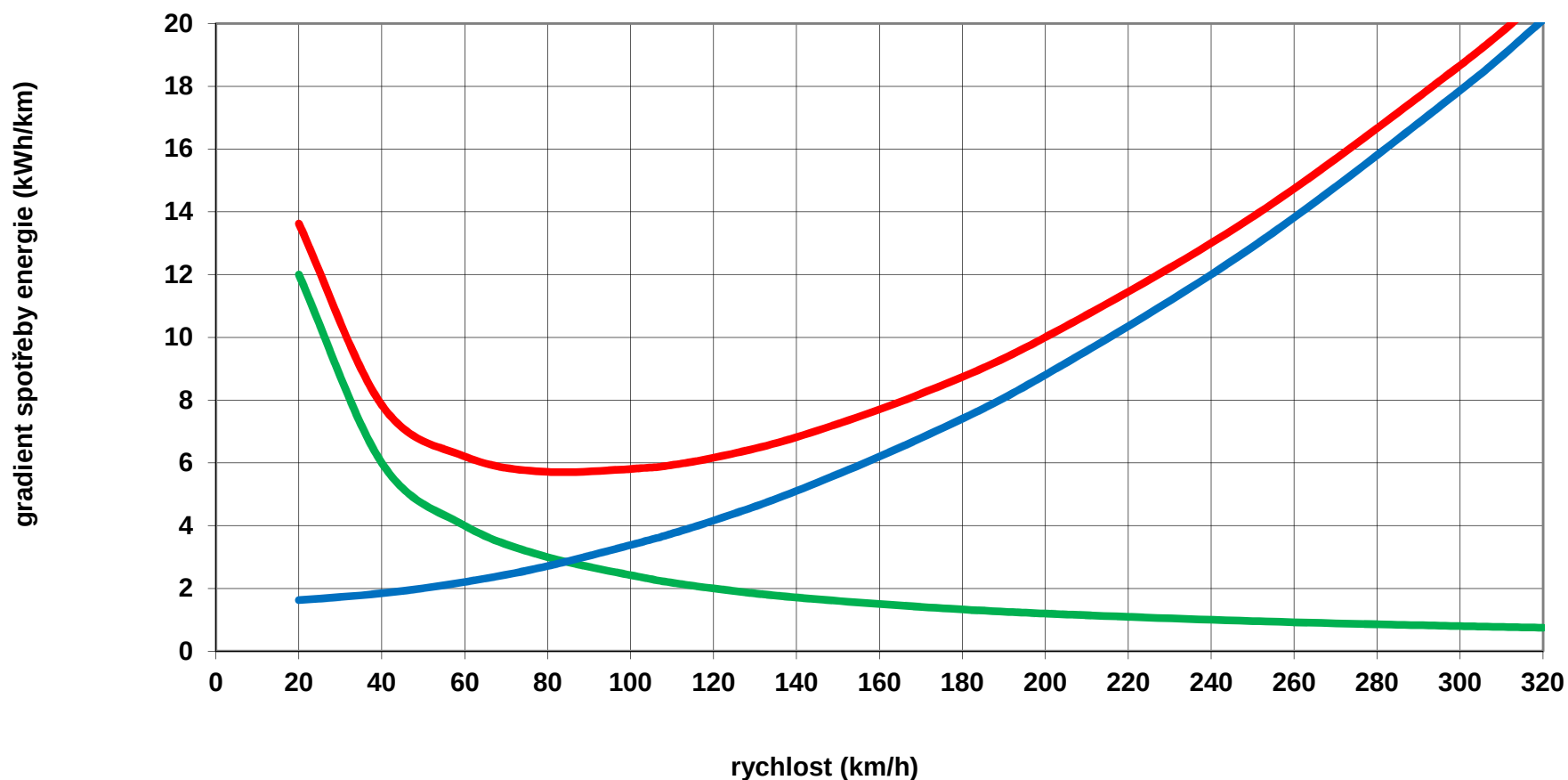


Spotřeba energie pro rovnoměrnou jízdu na rovné otevřené trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS

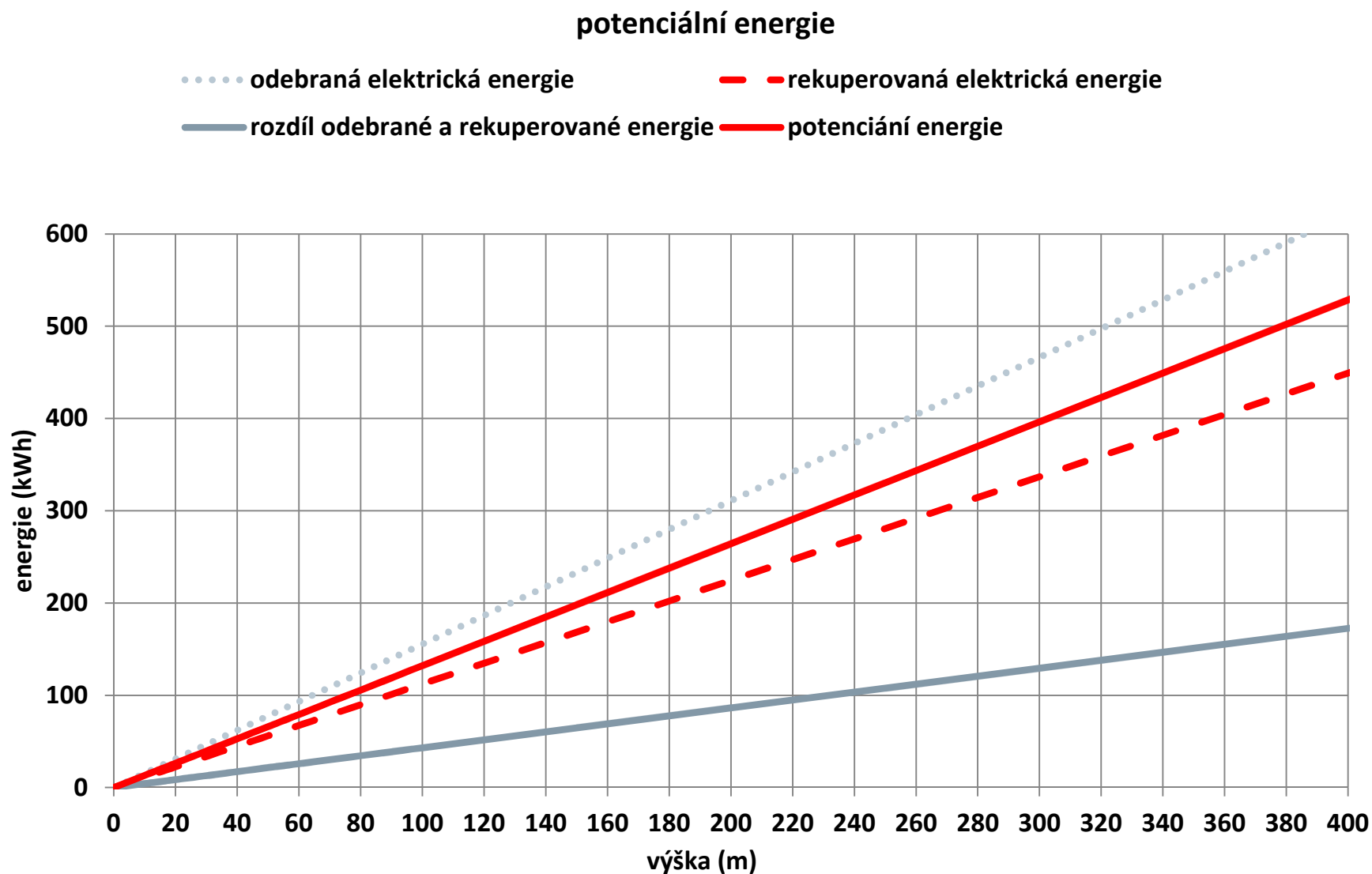
Gradient spotřeby energie na rovné otevřené trati

— vedlejší spotřeba — trakční spotřeba — celková spotřeba



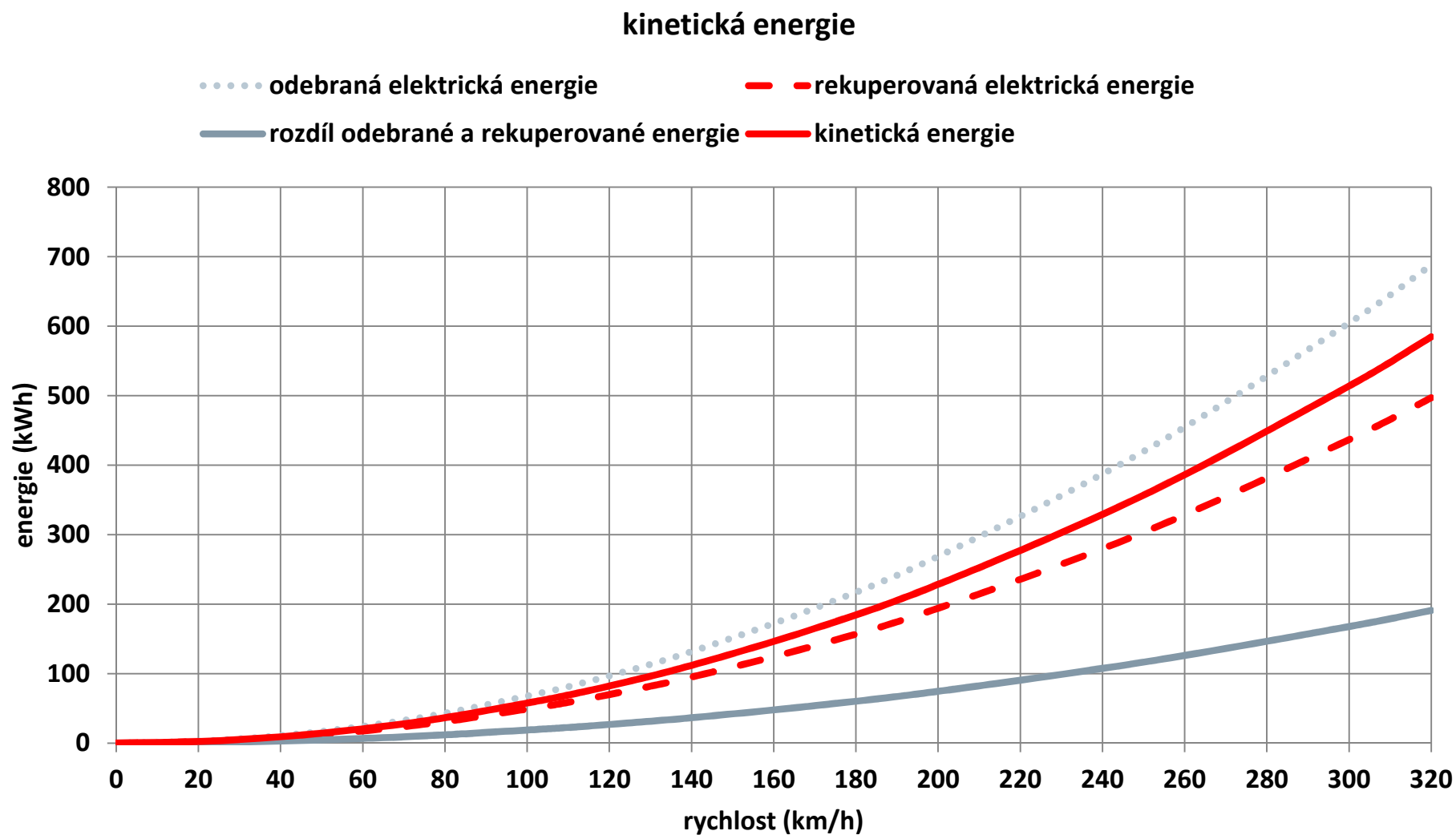
Spotřeba energie pro překonání výšky (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS

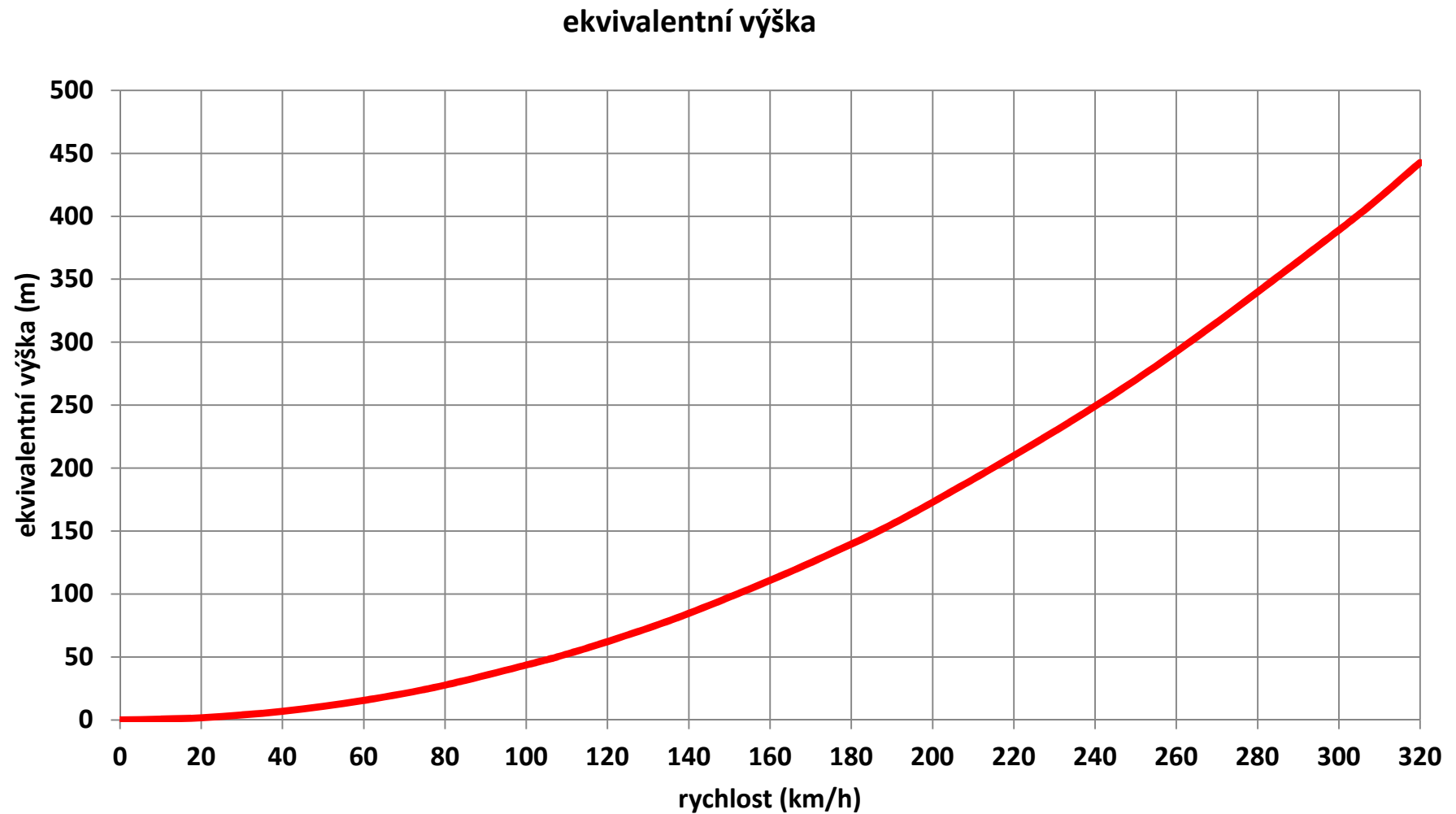


Spotřeba energie pro získání rychlosti (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS



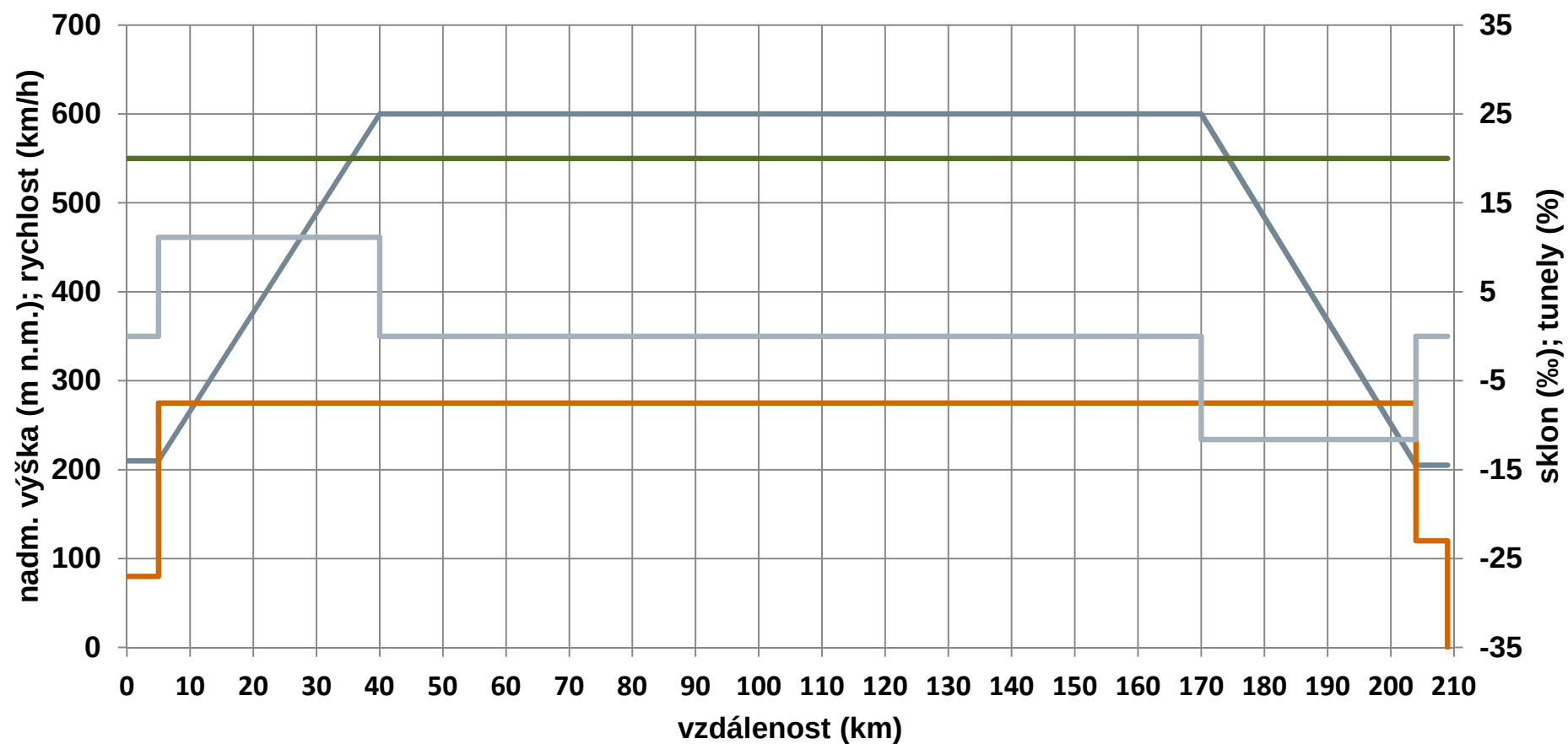
Vzájemná relace kinetické a potenciální energie



HS trať Praha – Brno

rychlostní a podélný profil

— výška — rychlost — sklon — tunely

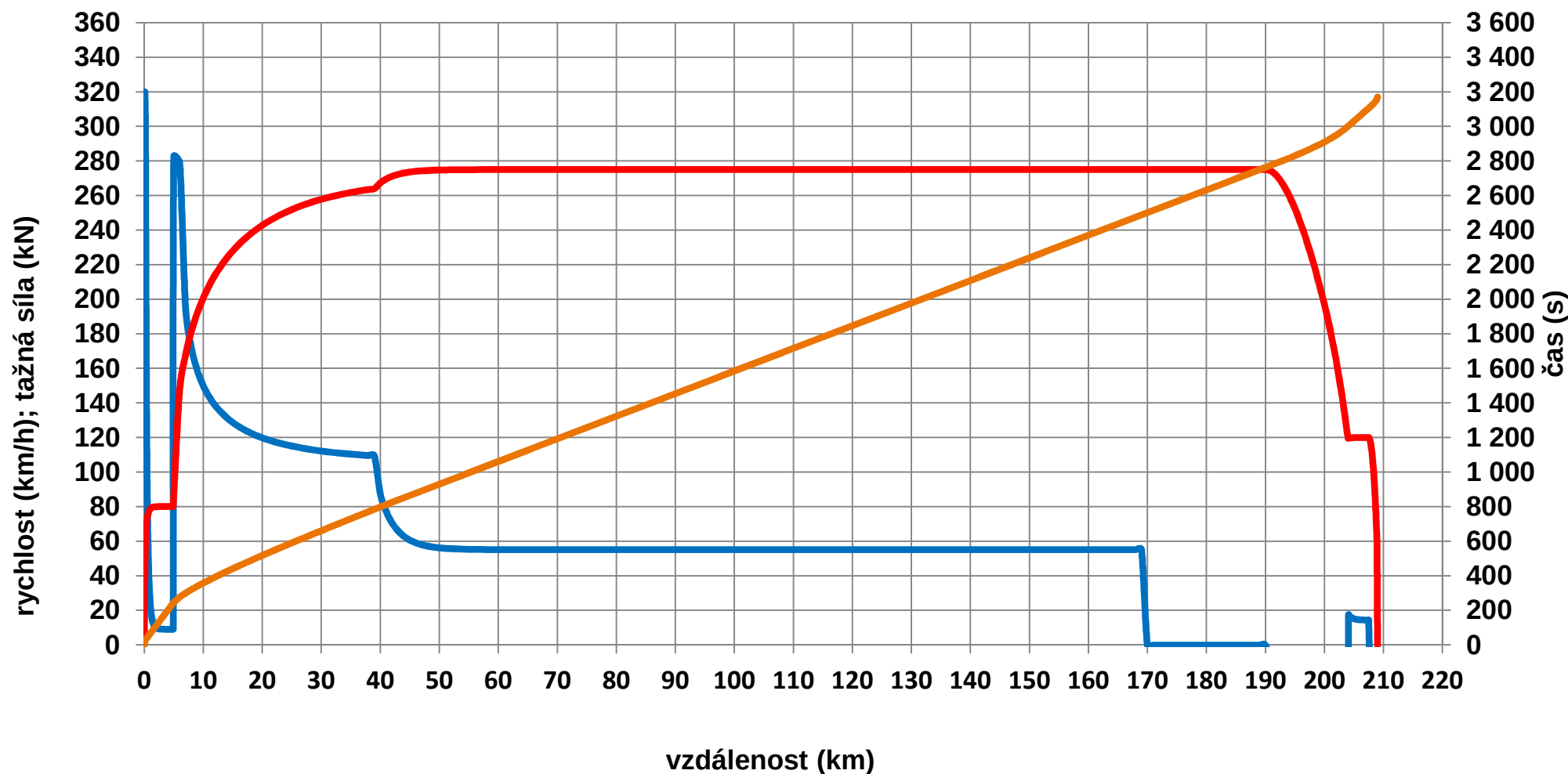


HS trať Praha – Brno 209 km, 53 min (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS

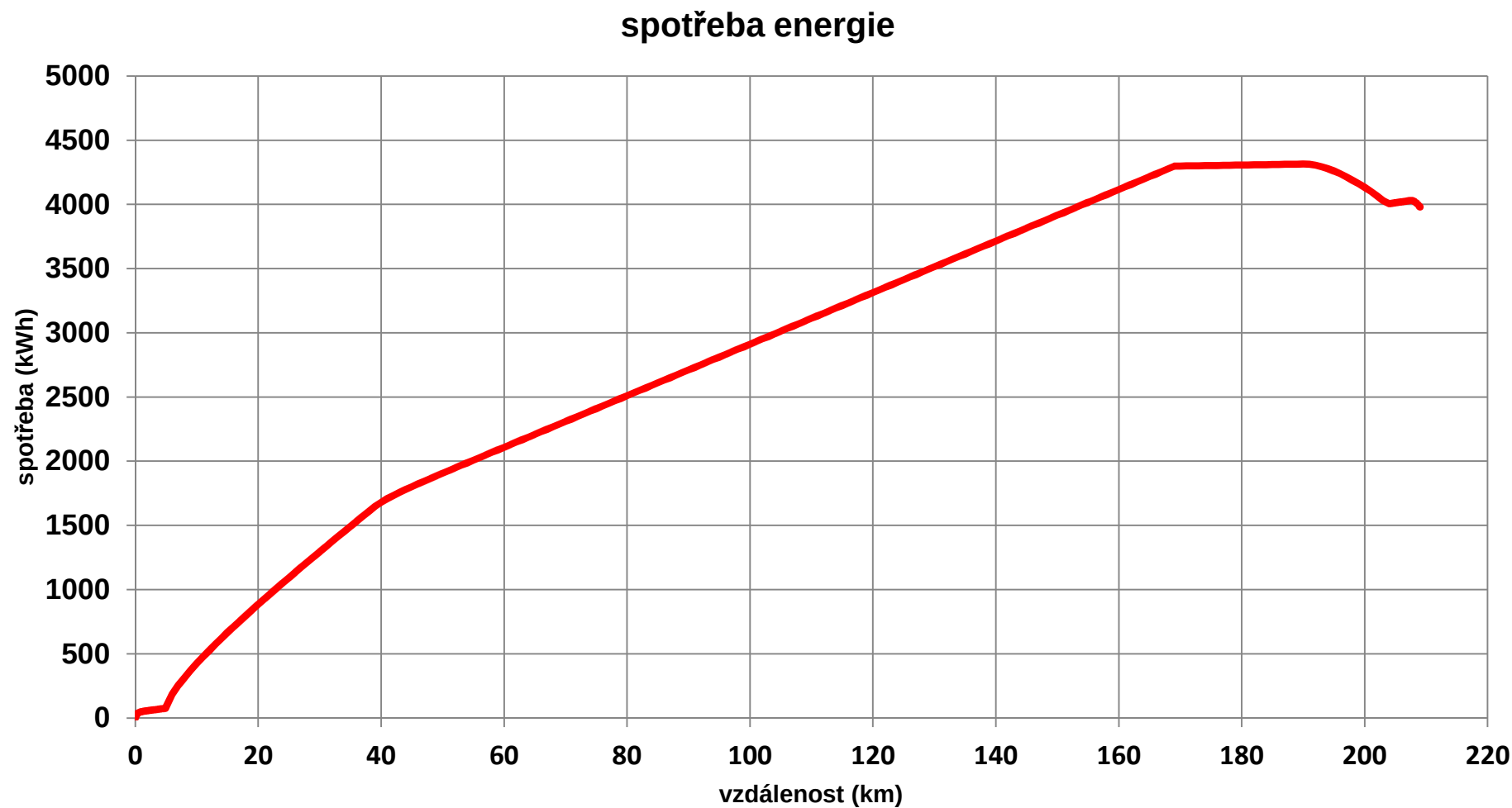
dráhový tachogram

— tažná síla — rychlost



HS trať Praha – Brno 209 km, 3 980 kWh (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

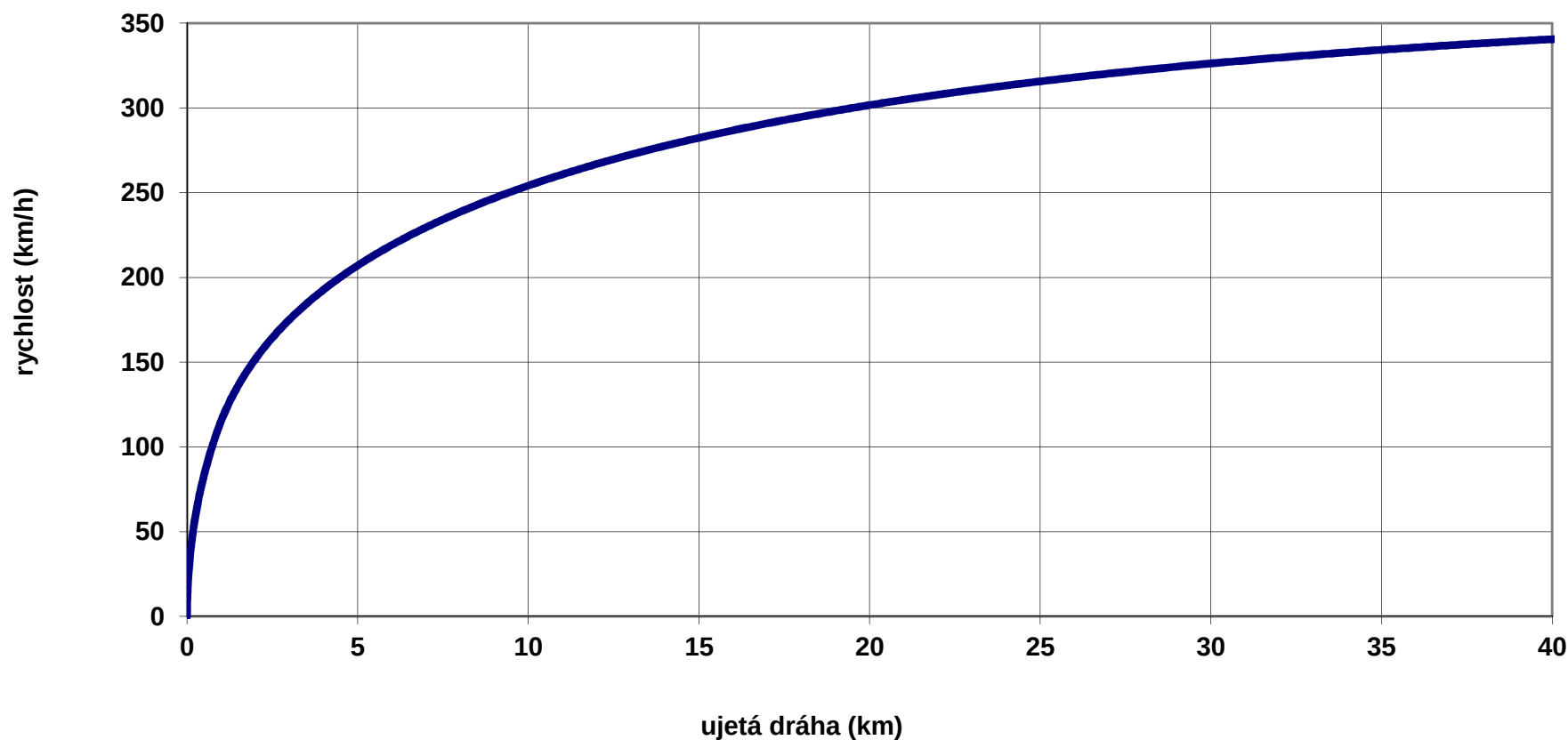
SIEMENS



Rozjezd na rovné otevřené trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

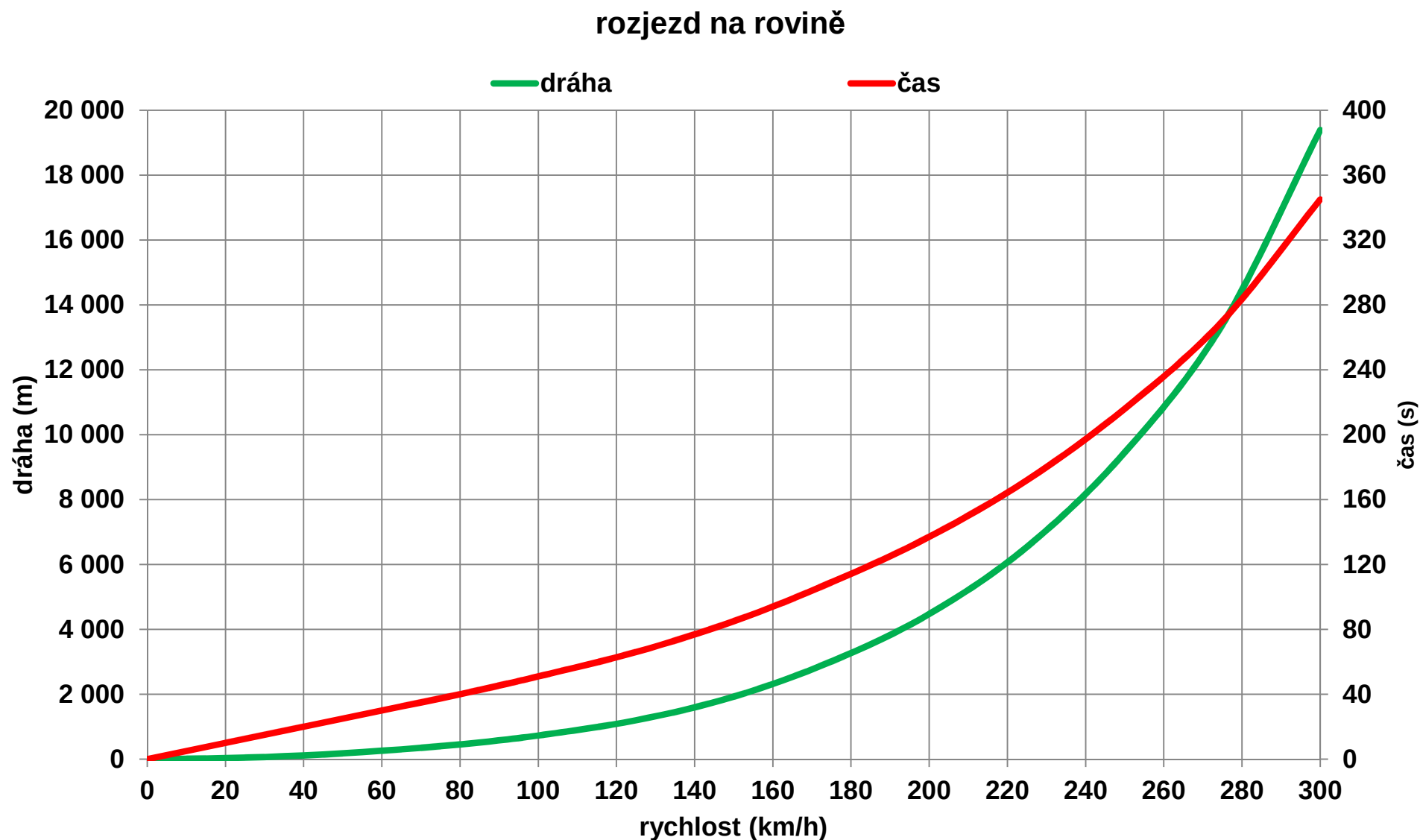
SIEMENS

Tachogram rozjezdu na rovině na otevřené trati



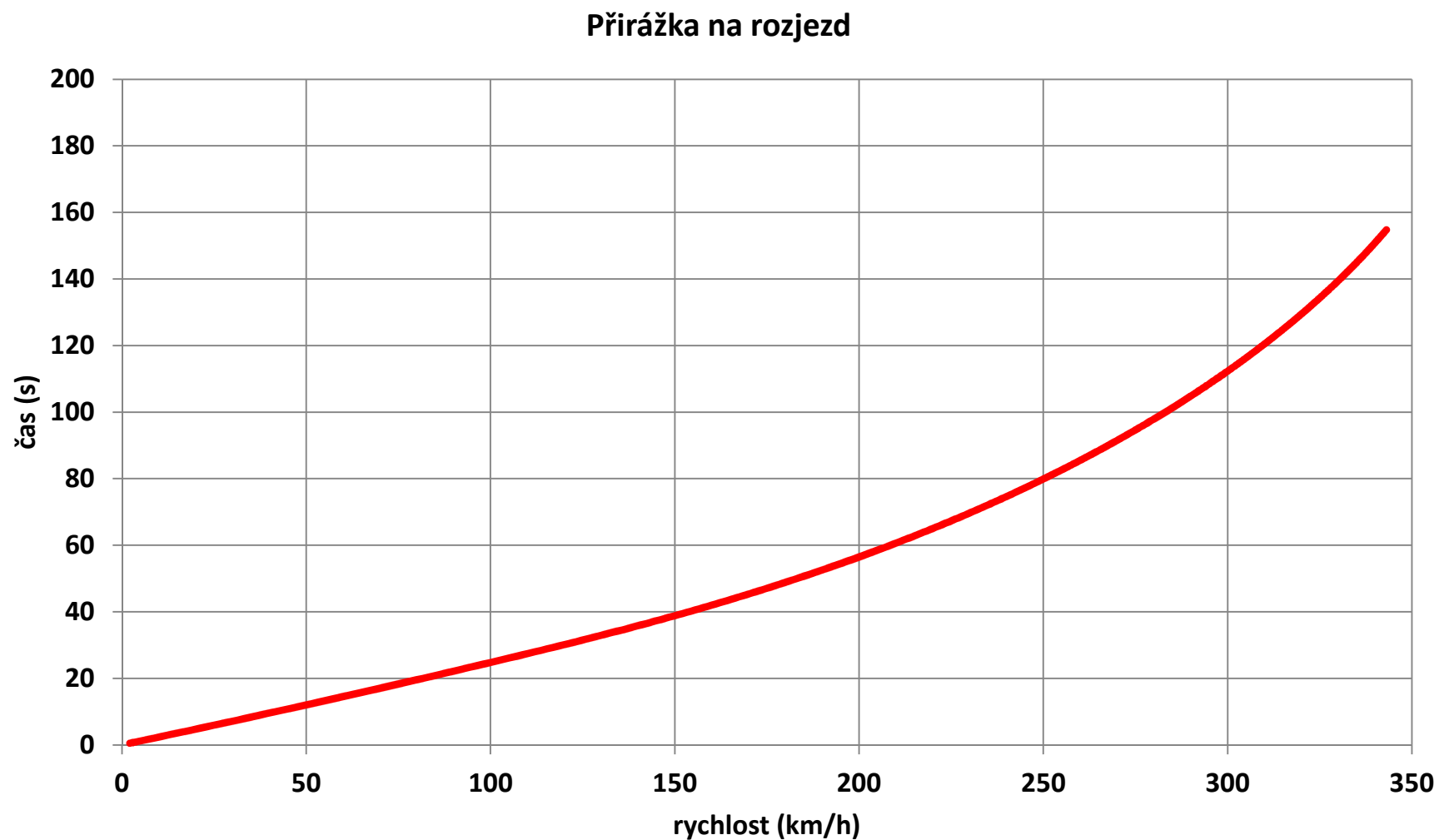
Rozjezd na rovné otevřené trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS



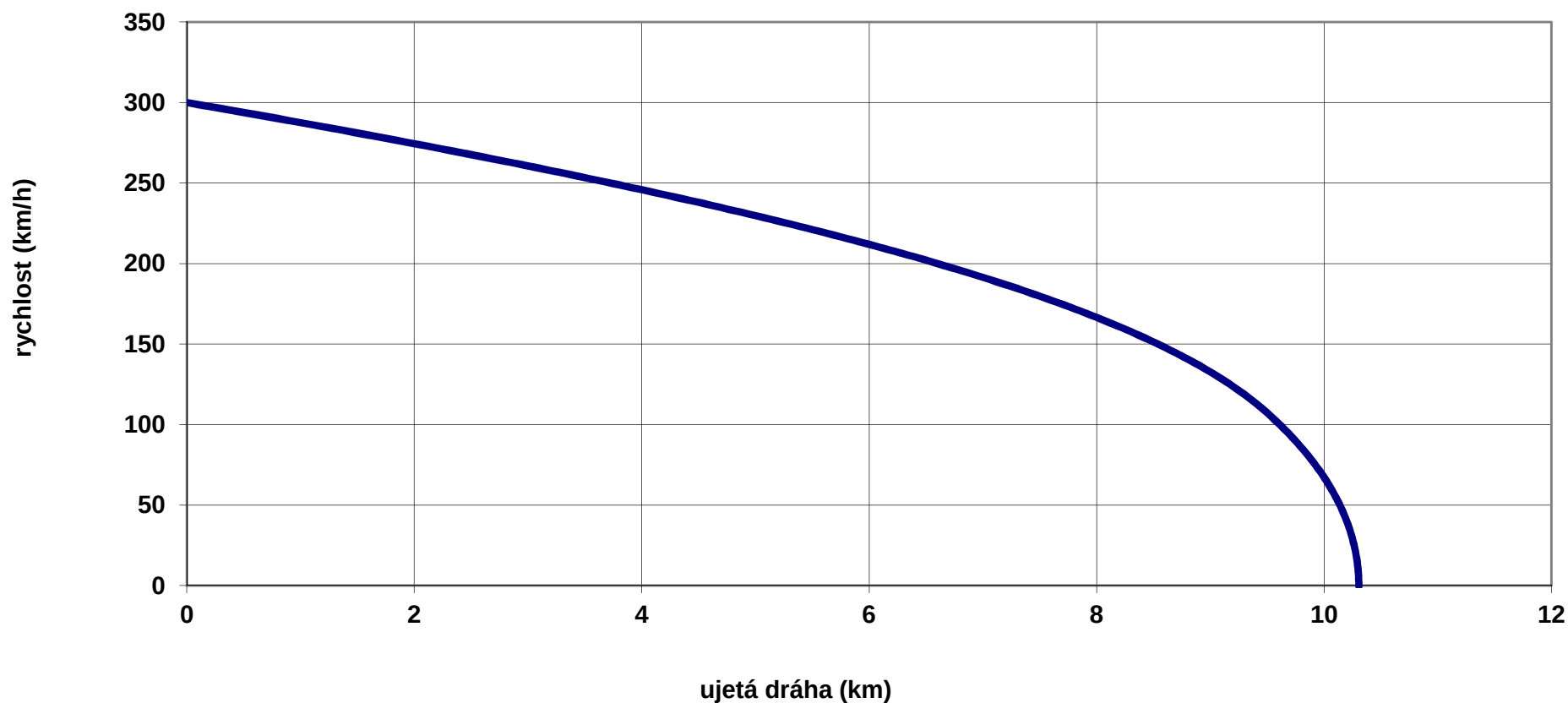
Ztráta času rozjezdem na rovné trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS



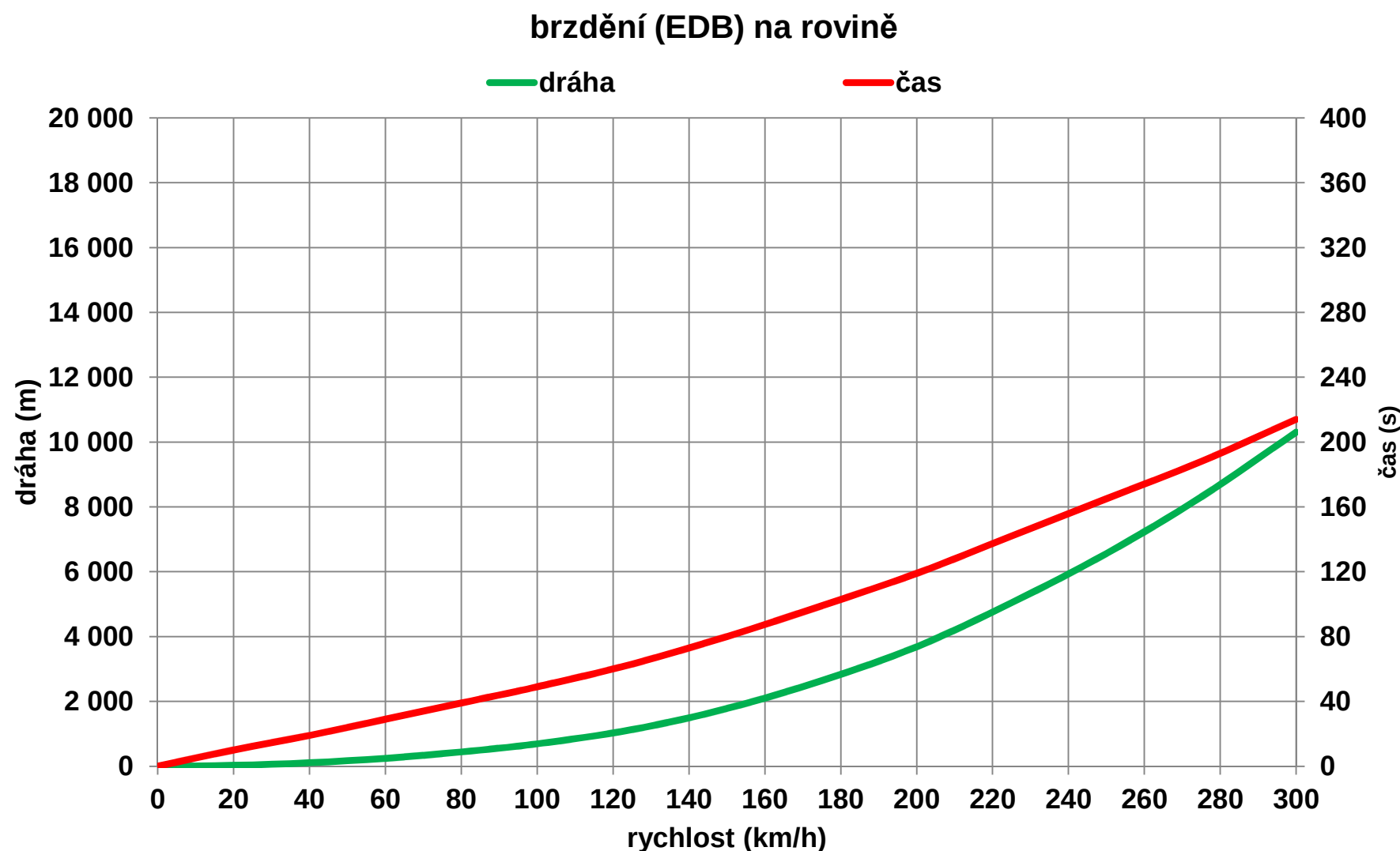
Zabrzdění EDB na rovné otevřené trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

Tachogram brzdění na rovině na otevřené trati



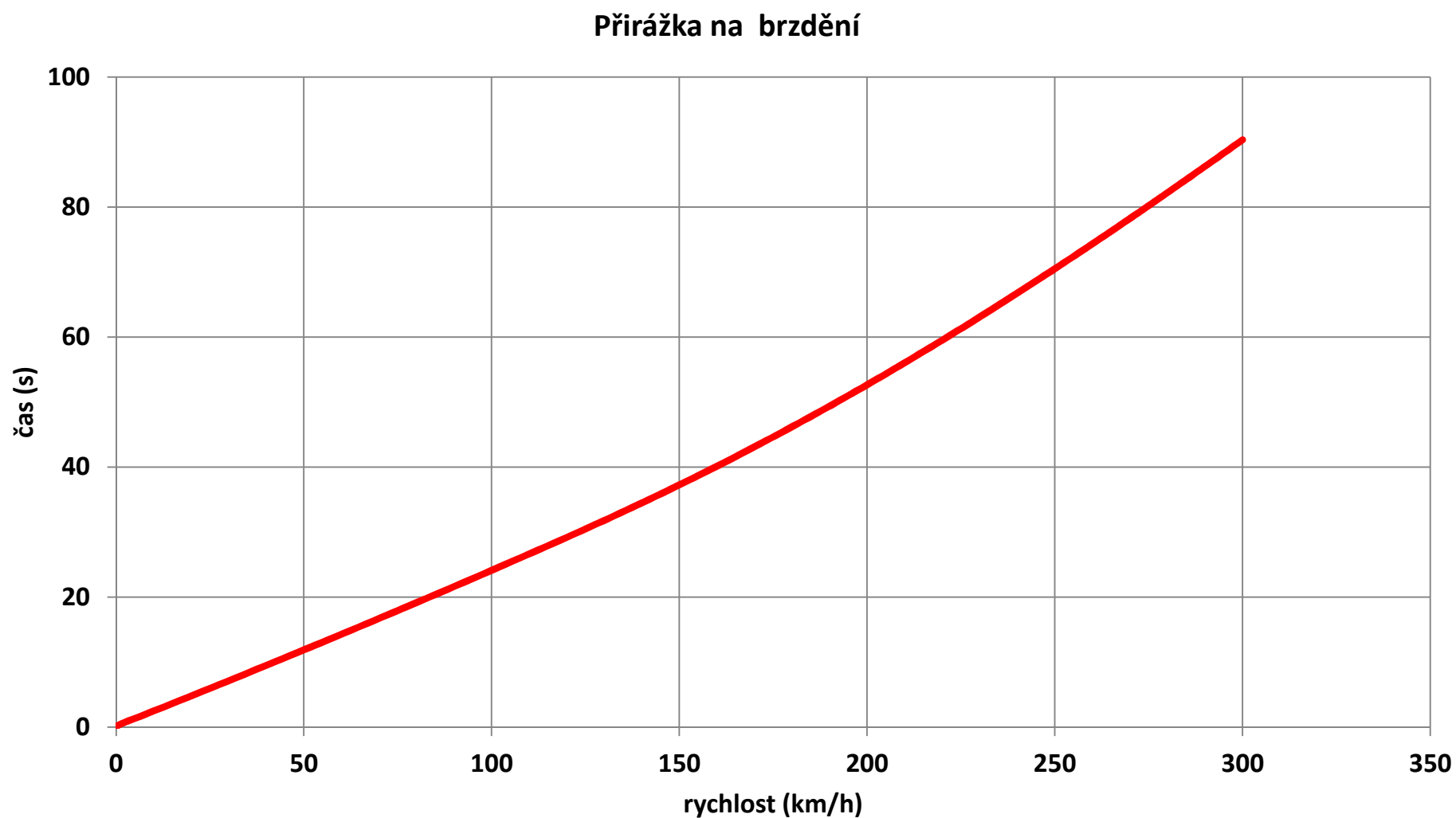
Zabrzdění EDB na rovné otevřené trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS



Ztráta času zabrzděním EDB na rovné trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

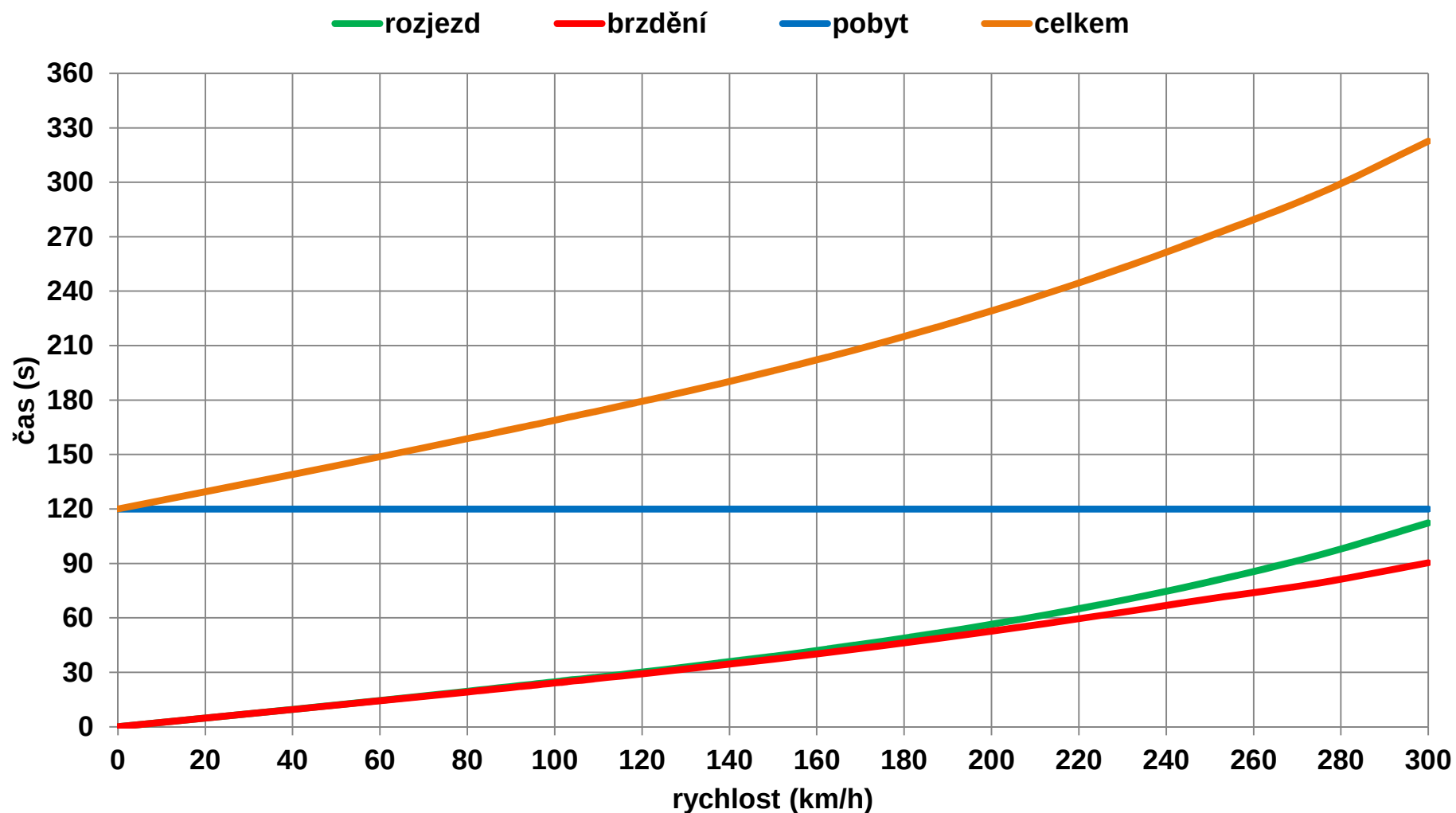
SIEMENS



Ztráta času zastávkou na rovné trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS

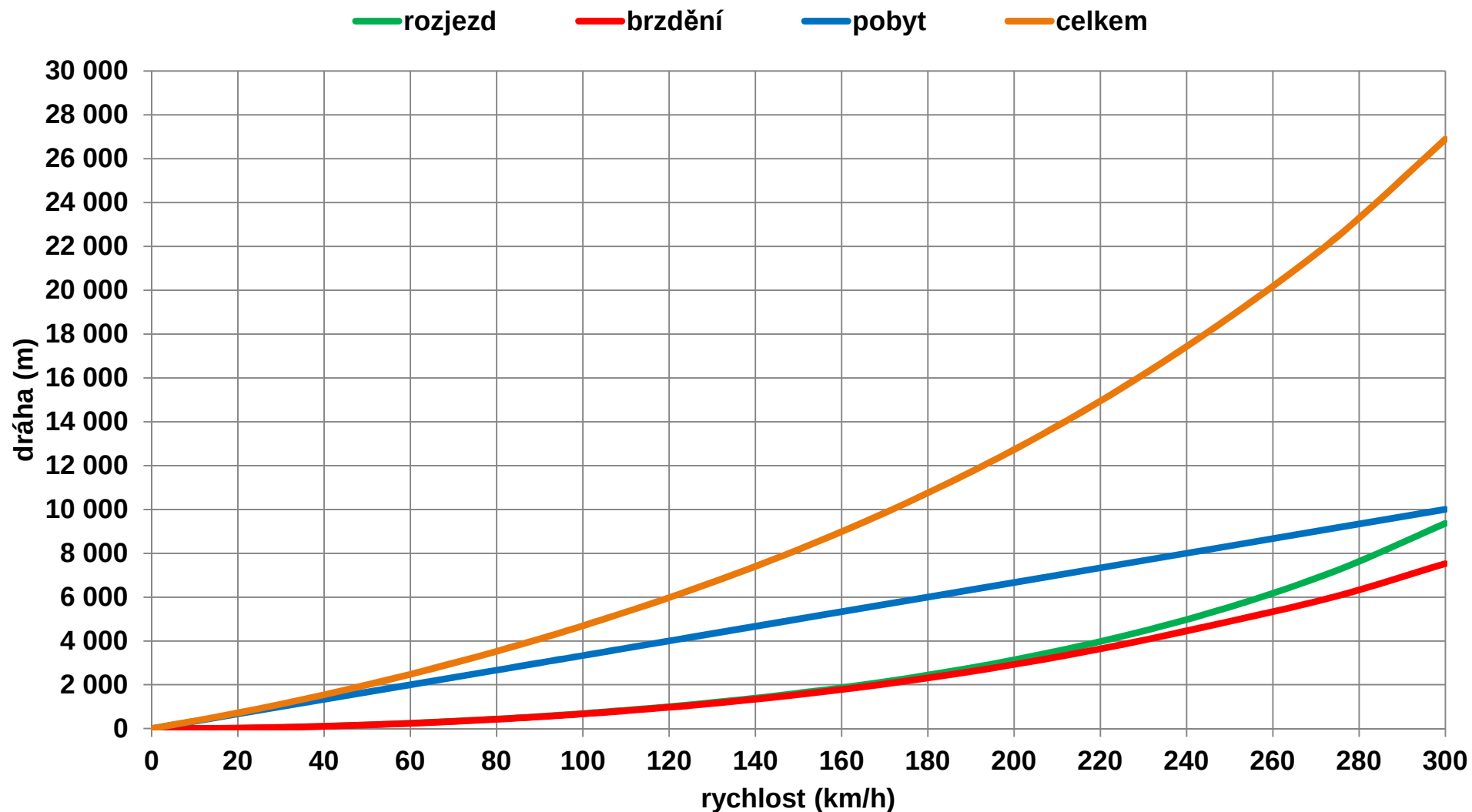
ztráta času jedním zastavením (EDB) a rozjezdem na rovině



Ztráta dráhy zastávkou na rovné trati (osmivozová HS jednotka délky 200 m)

SIEMENS

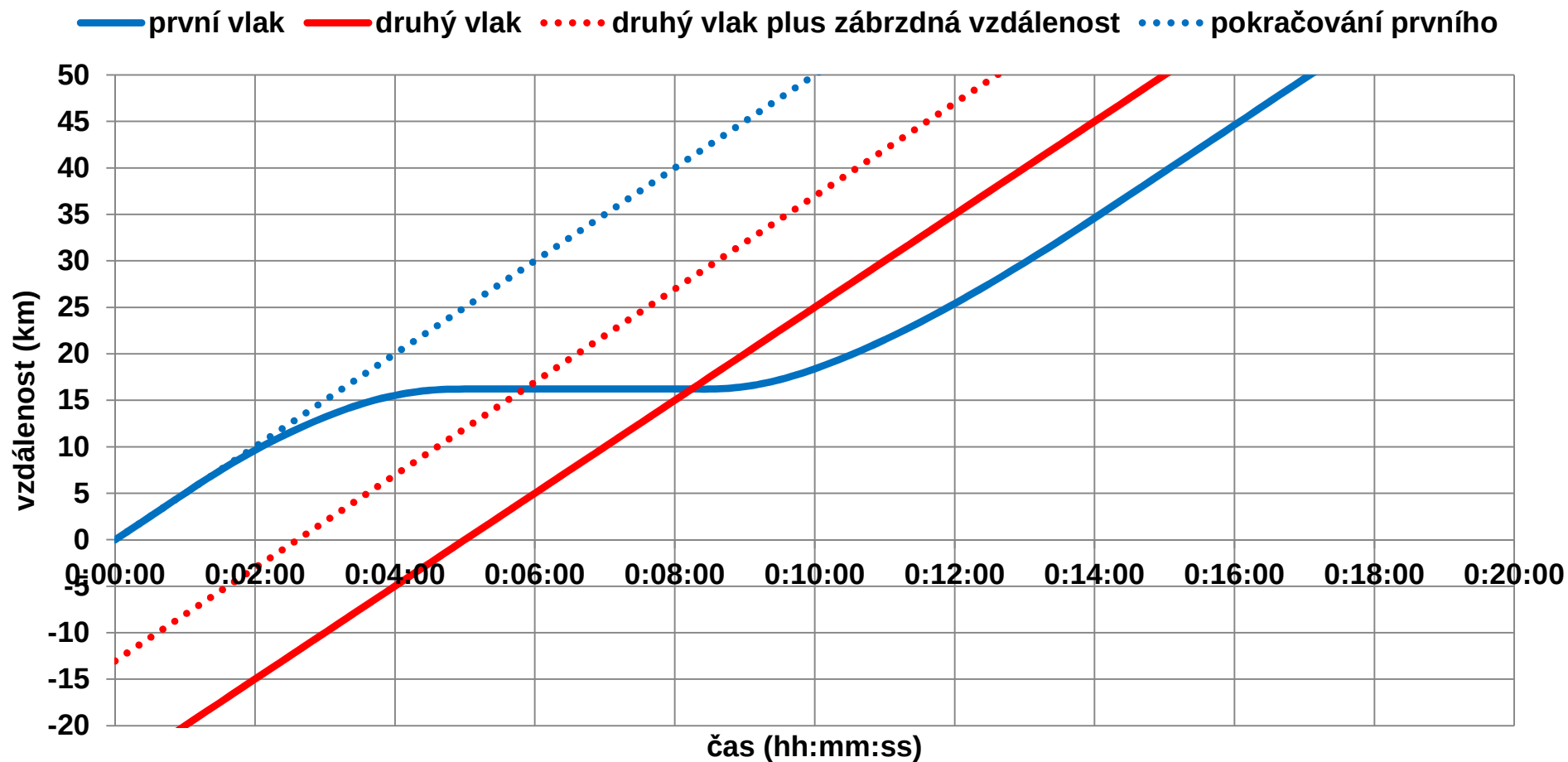
ztráta dráhy jedním zastavením (EDB) a rozjezdem na rovině



Řízení sledu jízdy vlaků (EDB/EDB, hmotné body nulové délky, bez prodlev)

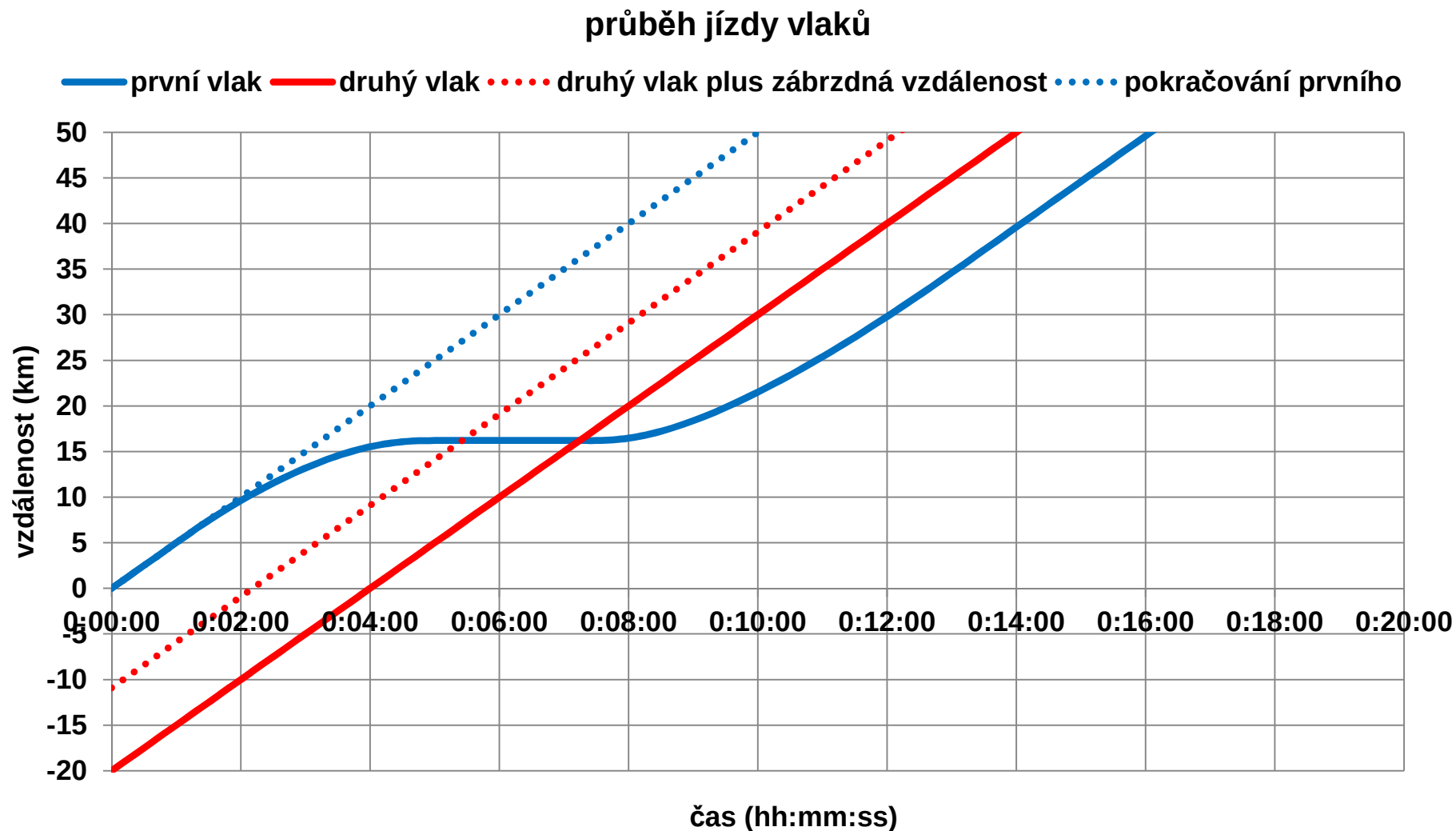
SIEMENS

průběh jízdy vlaků



Řízení sledu jízdy vlaků (EDB/prov, hmotné body nulové délky, bez prodlev)

SIEMENS



Děkuji Vám za Vaši pozornost!



Ing. Jiří Pohl

Senior Engineer

Siemens, s.r.o. / Divize MO/

Oddělení EN

Siemensova 1

Praha - Stodůlky

E-mail:

jiri.pohl@siemens.com

siemens.cz