



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

**PRÍLOHA 3**

**ENERGETICKÉ VÝSTUPY**

**2022**

Viliam Haberland

# 1 ÚVOD

Táto príloha obsahuje energetické výstupy zo simulácií modelovania jazd koľajových vozidiel rôznych pohonov na riešenej trati na základe, ktorých sú jednotlivé pohony a ich energetické výsledky porovnávané ďalej v práci. Cieľom je porovnať súčasný stav železničnej linky Košice – Humenné s možným nasadením vozidiel s alternatívnymi pohonmi alebo vozidiel elektrickej závislej trakcie po dokončení výstavby elektrizácie úseku trate, ktorý je v súčasnosti bez elektrizácie. V prílohe sú ďalej podrobnejšie spracované simulácie využitia vozidiel s alternatívnym bezemisným pohonom typu trolej/akumulátor (jednotka BEMU) a typu vodíkový palivový článok/akumulátor (jednotka HMU). Na základe získaných dát, ktoré odrážajú jednotlivé simulácie je možné získať predstavu o dimenzovaní technických požiadaviek a prevádzkových parametrov na vozidlá s alternatívnym pohonom, ktoré by mohli nahradiť súčasnú neperspektívnu motorovú vozbu v riešenom železničnom spojení. K energetickým výpočtom bol použitý program FBS spoločnosti iRFP.

## 2 PROGRAM FBS

Program FBS (iPLAN) bol vytvorený spoločnosťou iRFP – Inštitút pre plánovanie regionálnej a diaľkovej dopravy. Jedná sa o inžiniersku kanceláriu z Drážďan (Nemecko) so zameraním na železničnú prevádzku. Program predstavuje výkonný nástroj pre takmer všetky aspekty stavby cestovných poriadkov, optimalizácie obehov vozidiel, plánovanie zdrojov a následného využitia spracovávaných dát. Používateľ programu je podporovaný programom v maximálnej možnej miere od prvého konceptu po kompletizáciu dokumentov pomôcok GVD resp. energetických výpočtov jazdy vozidiel. V programe autor pracoval na základe licencie poskytnutej Ústavom logistiky a manažmentu dopravy – ČVUT FD K617.

## 3 ENERGETICKÉ VÝPOČTY

V stratégii rozhodovania o využití vozidla s alternatívnym pohonom dochádza k využitiu poznatkov o súčasnej ponuke takýchto vozidiel na trhu a ich technických parametrov. Tieto vozidlá predstavujú pomyselné limity a možnosti súčasného vývoja. Pre nasledujúce simulácie boli použité vozidlá, ktorých parametre sa pohybujú v technicky možných riešeniach súčasnosti. U vozidiel s konvenčnými pohonmi je možné vo všeobecnosti využiť kedykoľvek ich plný trakčný výkon, ktorý je k dispozícii. V prípade

dvojzdrojových vozidiel typu BEMU aktuálny limit trakčného výkonu závisí aj na stave a charakteristike akumulátoru. Dochádza totiž k poklesu jeho napätia v stave kedy je akumulátor vybitý a pre dodanie potrebného výkonu je nutné odoberať vyšší prúd až do fázy kedy sú dosiahnuté prúdové limity čo zákonite vedie k znižovaniu výkonu, a teda vplyvu na dynamiku a jazdné doby vozidla. V nasledujúcich výpočtoch obmedzenia tohto druhu nie sú zahrnuté. Program vie zohľadniť len základné energetické výpočty a dynamiku vozidla vrátane toku energií a energetických strát.

## **4 VSTUPNÉ PARAMETRE**

Pre energetické výpočty a jednotlivé simulácie je nutné vložiť do programu vstupné dáta. Údaje o parametroch trati sú čerpané prevažne z TTP riešených úsekov trate a dostupných zdrojov citovaných v práci (kapitola č. 5).

### **4.1 Trať – vstupné dáta**

- Staničenie traťových úsekov (101A, 103B, 103A)
- Rozchod, zábrzdne vzdialenosti, elektrizácia
- Dopravne, ich staničenie, kategória, počet traťových/dopravných koľají a ich užitočné dĺžky, dovolené rýchlosti vjazdov na jednotlivé koľaje
- Staničenie vchodových návěstidiel, staničenie vybraných výhybiek
- Rýchlostné profily (oba smery) s prechodnými obmedzeniami traťovej rýchlosti
- Zjednodušený pozdĺžny profil trate (na základe nadmorských výšok dopravní, medzi dopravňami je pre zjednodušenie uvažovaný konštantný sklon)

Vytvorený traťový profil uvažuje zjednodušený pozdĺžny profil trate a zanedbáva smerové vedenie trati, a teda aj odpory vznikajúce jazdou vozidiel v smerovom oblúku. Na porovnanie jednotlivých typov pohonov by takto zjednodušený model trate nemal mať zásadný vplyv.

### **4.2 Vozidlá – vstupné dáta**

Program FBS obsahuje preddefinované vozidlá s ich technickými parametrami, ktoré autor využil pre spracovanie nasledujúcich simulácií. Vozidlá boli vybrané na základe súčasného radenia vlakových súprav v riešenom železničnom spojení (v práci kapitola č. 4.8), v prípade ak dané vozidlo v programe definované nebolo, autor použil vhodné náhradné vozidlo s blízkymi alebo úplne rovnakými parametrami (lokomotíva radu 750.7 ako náhrada za radu 757). V prípade vozidiel s alternatívnym pohonom program

umožňuje výber pre typ BEMU z piatich preddefinovaných fiktívnych vozidiel, ktoré sa líšia trakčnými a výkonnostnými charakteristikami, kapacitou akumulátora, hmotnosťou a počtom miest na sedenie. Pre simulácie bolo vybrané troj-článkové vozidlo typu BEMU s najväčším počtom miest na sedenie a konzervatívnejším nastavením parametrov akumulátora a trakčnými charakteristikami približujúcimi sa súčasným vozidlám s akumulátorom na trhu. Pre simuláciu jazdy elektrického HKV s klasickou súpravou (po dokončení elektrizácie) bolo vybrané HKV radu 361.1 spoločnosti ZSSK a.s., ktoré by teoreticky mohlo nahradiť motorovú trakciu v podobe rušňa radu 757. Pre simuláciu jazdy vozidla s vodíkovými palivovými článkami bolo vybrané dvoj-článkové vozidlo výrobcu Alstom – Coradia iLINT-54. Toto vozidlo je v súčasnosti v testovacej prevádzke na regionálnych tratiach v Nemecku.

**Tabuľka 1** - Charakteristika použitých typov súprav pre energetické výpočty konvenčných typov pohonu

Názov hnacieho vozidla v FBS	CZLoko.750.7-B	2x CZLoko.750.7-A	CZLoko.750.7-B	CZLoko.750.7-B	ZosV.361.1-3
Typ	HKV + 5 vozňov 2. tr.	2xHKV + 12 vozňov	HKV + 7 vozňov 2. tr.	HKV + 4 vozne 2.tr.	HKV + 5 vozňov 2.tr.
Stručný popis	súčasná štandardná súprava vlaku kat. REX 19XX	súčasná štandardná súprava vlaku kat. R 614/615	súčasná posilnená súprava vlaku kat. REX 19XX	súčasná štandardná súpravu vlaku kat. EN 442/443	štandardná súprava vlaku kat. REX 19XX <b>po elektrizácii trate</b>
Maximálna rýchlosť [km/h]	100	100	100	100	160
Hmotnosť hnacieho vozidla [t]	72	144	72	72	86
Hmotnosť celej súpravy [t]	328	750	423	277	342
Dĺžka celej súpravy [m]	144	350	194	120	148
Počet miest na sedenie	390	257 (bez ubytovacích vozňov)	522	132 (bez ubytovacích vozňov)	390
Poznámka	Náhrada za rušeň radu 757	Náhrada za rušeň radu 757	Náhrada za rušeň radu 757	Náhrada za rušeň radu 757	

Použitie osobné železničné vozne (ich hmotnosť, počet, brzdné hmotnosti a kapacita) odpovedajú svojimi parametrami štandardnému radeniu súprav (podľa kapitoly 4.8.1 v práci). Rušeň radu 750.7 (dopravcu České dráhy a.s.) je vhodná náhrada reálne používaného rušňa radu 757 (dopravcu ZSSK a.s.), ktorý v programe FBS nie je preddefinovaný, oba rušne sú vybavené agregátom Caterpillar 3512 CHD s trvalým výkonom 1550 kW a majú koncepčne rovnaký pohon a dynamické vlastnosti.

**Tabuľka 2 - Charakteristika použitých typov súprav pre energetické výpočty alternatívnych typov pohonu**

Názov hnacieho vozidla v FBS	X.Muster BEMU348-1	2x X.Muster BEMU348-1	LHB.iLINT-54-140d
Typ	BEMU	2x BEMU	HMU
Stručný popis	Troj-článková jednotka B' (2') (2') B'	Troj-článková jednotka B' (2') (2') B'	Dvoj-článková jednotka B' 2' + 2' B'
Maximálna rýchlosť [km/h]	160	160	140
Hmotnosť hnacieho vozidla [t]	137	274	105
Hmotnosť celej súpravy [t]	137	274	105
Dĺžka celej súpravy [m]	60	120	54,27
Počet miest na sedenie	158	316	150
Nominálna kapacita akumulátora [kWh]*	800 (60 %)	2x 800 (60 %)	220 (60 %)

\* = % z kapacity, ktorú je možné využiť v prevádzke. V simuláciách je počítané so zníženou kapacitou o 20 %

**Tabuľka 3 - Základná výkonnostná charakteristika použitého fiktívneho vozidla typu BEMU**

Názov vozidla v FBS	X.Muster BEMU348-1	
Maximálny výkon akumulátora (odber)	1300	kW
Maximálny výkon na dvojkolesí	2278	kW
Maximálny výkon na dvojkolesí v akumulátorovom móde	1700	kW
Rozjazdová trakčná sila	122	kN
Výkon v pomere k hmotnosti vozidla v akumulátorovom móde	6,9	kW/t
Výkon v pomere k hmotnosti vozidla v móde „trolej“	12,4	kW/t
Limit nabíjacieho výkonu na akumulátore	975	kW

### 4.3 Pobyty a dynamické vlastnosti simulácií

Pred samotným výpočtom teoretickej energetickej spotreby a znázornením grafu dynamiky jazdy vozidla v závislosti rýchlosti k prejdenej vzdialenosti od počiatku spoja je nutné nastaviť dĺžku pobytov v nácestných dopravniciach, brzdné percentá, typ brzdzenia súpravy vlaku, percentuálnu prirážku k jazdným dobám a hmotnostnú percentuálnu prirážku.

Pobyty vlakov v jednotlivých simuláciách sú nastavené ako štandardné pobyty vlakov podľa súčasného GVD pre rok 2021/2022 (viď kapitola 4.4 v práci). Pre vlaky kategórie R a EN sú zvolené pobyty podľa vlakov R 614 a EN 442 (viď kapitola 4.4 v práci). Pobyty vlakov ovplyvňujú v simuláciách s vozidlami s alternatívnym pohonom odobranú energiu na prevádzku pomocných pohonov (klimatizácia, kúrenie, osvetlenie a pod.) počas doby staničenia vozidla čo má u vozidiel s akumulátorom značný vplyv na dojazd a stav akumulátoru.

Brzdné percentá, a teda schopnosť vlaku zastaviť na určitej vzdialenosti sú volené podľa reálnych brzdných hmotností jednotlivých vozidiel, prípadne odborným odhadom v závislosti na súčasných parametroch brzdných systémov v porovnaní s konštrukčne podobnými vozidlami, u ktorých sú tieto parametre známe.

U všetkých prevedených simulácií bola zvolená rovnaká prirážka k jazdným dobám na základe súčasnej konštrukcie jazdných časov v GVD, a to 5 %. V simuláciách sa nepočíta s hmotnostnou prirážkou, pre jednotlivé vozidlá v súpravách je uvažovaná ich maximálna hmotnosť ako vozidiel ložených (plne obsadených).

Program simuluje dynamiku jazdy vozidla s nastavenou časovou medzerou 30 sekúnd pri prechode zo zrýchlenia vlaku na brzdenie aby sa zamedzilo nadmerne zbytočnej spotrebe energie, ktorá nemá výrazný vplyv na jazdné časy. Inak program počíta s maximálnou možnou akceleráciou vozidla (vzhľadom na adhézne podmienky) a primeraným spomalením zohľadňujúcim prepravu osôb (ak nie je spomalenie obmedzené brzdnými schopnosťami vlaku).

U vozidiel s alternatívnym pohonom je možnosť voľby dvoch typov jazdných štýlov, dynamický a úsporný štýl jazdy. Úsporný štýl jazdy využíva maximalizáciu jazdy vozidla vo výbehu pred plánovaným zastavením vlaku a minimalizuje spotrebu energie. Vo všetkých simuláciách je počítané s dynamickým jazdným štýlom pre lepšie porovnanie s konvenčnými vozidlami, u ktorých program volí vždy dynamicky štýl jazdy.

## 5 ZOZNAM SKRATIEK DOPRAVNÍ

Tabuľka 4 - Zoznam skratiek dopravní použitých v programe FBS

Skratka	Názov dopravne
KES	Košice
KEP	Košice predmestie
BAR	Barca
KNH	Krásna nad Hornádom
NMY	Nižná Myšľa
VMY	Vyšná Myšľa
BOH	Bohdanovce
RUS	Ruskov
SLA	Slanec
KAL	Kalša
SLI	Výh. Slivník
ČEL	Čelovce
TRE	Trebišov
HRI	Výh. Hrinište
BNO	Bánovce nad Ondavou
LAŠ	Laškovce
MICH z.	Michalovce zastávka
MICH	Michalovce
PNL	Výh. Petrovce nad Laborcom
NAV	Nacina Ves
PČE	Pusté Čemerné
STR	Strážske
BRE	Brekov
HUM	Humenné

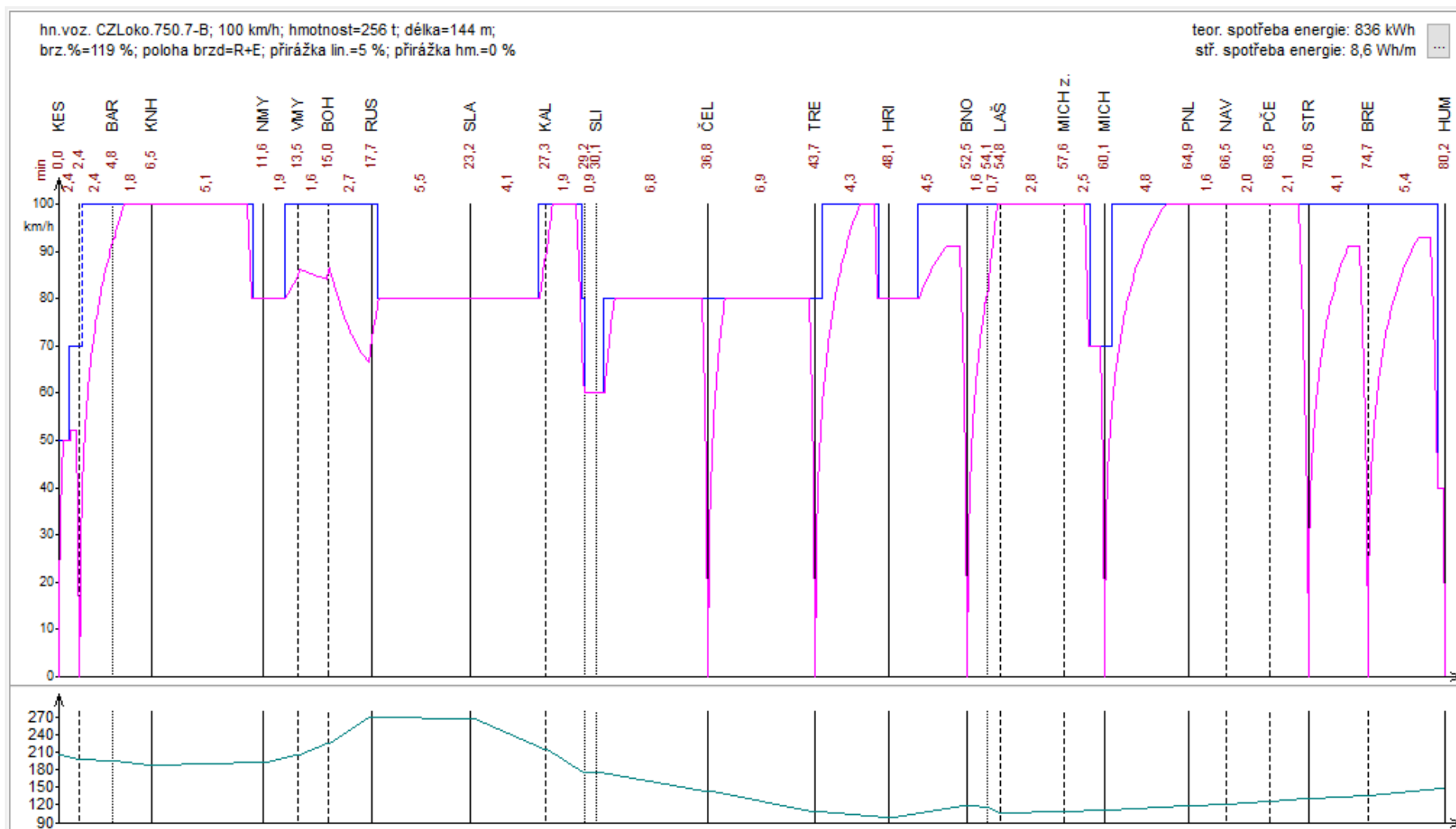


## 6 SIMULÁCIE – KONVENČNÉ VOZIDLÁ

V nasledujúcich simuláciách jazdy vozidiel v riešenom železničnom spojení sú demonštrované možnosti súčasných konvenčných koľajových vozidiel, ich teoretická spotreba energie (počítaná na obvode kolies bez rekuperácie) a dosiahnuteľné jazdné doby vzhľadom na typ súpravy a použitých HKV. Výstupmi sú jednotlivé diagramy dynamiky vozidla v závislosti rýchlosť/dráha a vypočítaná teoretická spotreba energie pre oba smery jazdy vlakov.

**Tabuľka 5** - Zoznam simulácií dynamiky jazdy konvenčných vlakov

Simulácia č.	Názov hnacieho vozidla v FBS	Typ	Pobyty	Smer jazdy
1a	CZLoko.750.7-B	HKV + 5 vozňov 2. tr.	REX	KES - HUM
1b	CZLoko.750.7-B	HKV + 5 vozňov 2. tr.	REX	HUM - KES
2a	2x CZLoko.750.7-A	2xHKV + 12 vozňov	R a EN	KES - HUM
2b	2x CZLoko.750.7-A	2xHKV + 12 vozňov	R a EN	HUM - KES
3a	CZLoko.750.7-B	HKV + 7 vozňov 2. tr.	REX	KES - HUM
3b	CZLoko.750.7-B	HKV + 7 vozňov 2. tr.	REX	HUM - KES
4a	CZLoko.750.7-B	HKV + 4 vozne 2.tr.	R a EN	KES - HUM
4b	CZLoko.750.7-B	HKV + 4 vozne 2.tr.	R a EN	HUM - KES
5a	ZosV.361.1-3	HKV + 5 vozňov 2.tr.	REX	KES - HUM
5b	ZosV.361.1-3	HKV + 5 vozňov 2.tr.	REX	HUM - KES



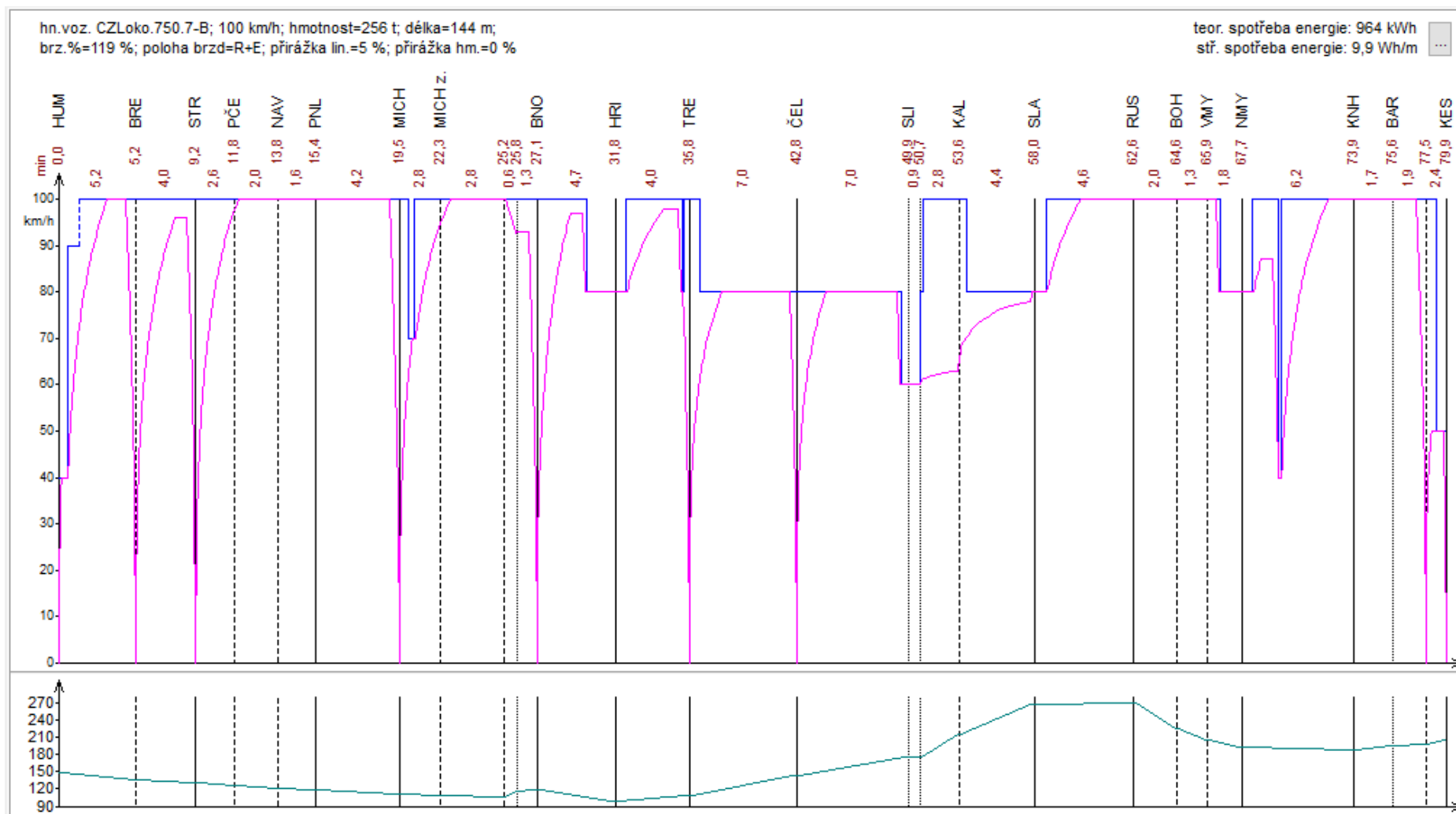
Graf 1 - Simulácia č. 1a v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

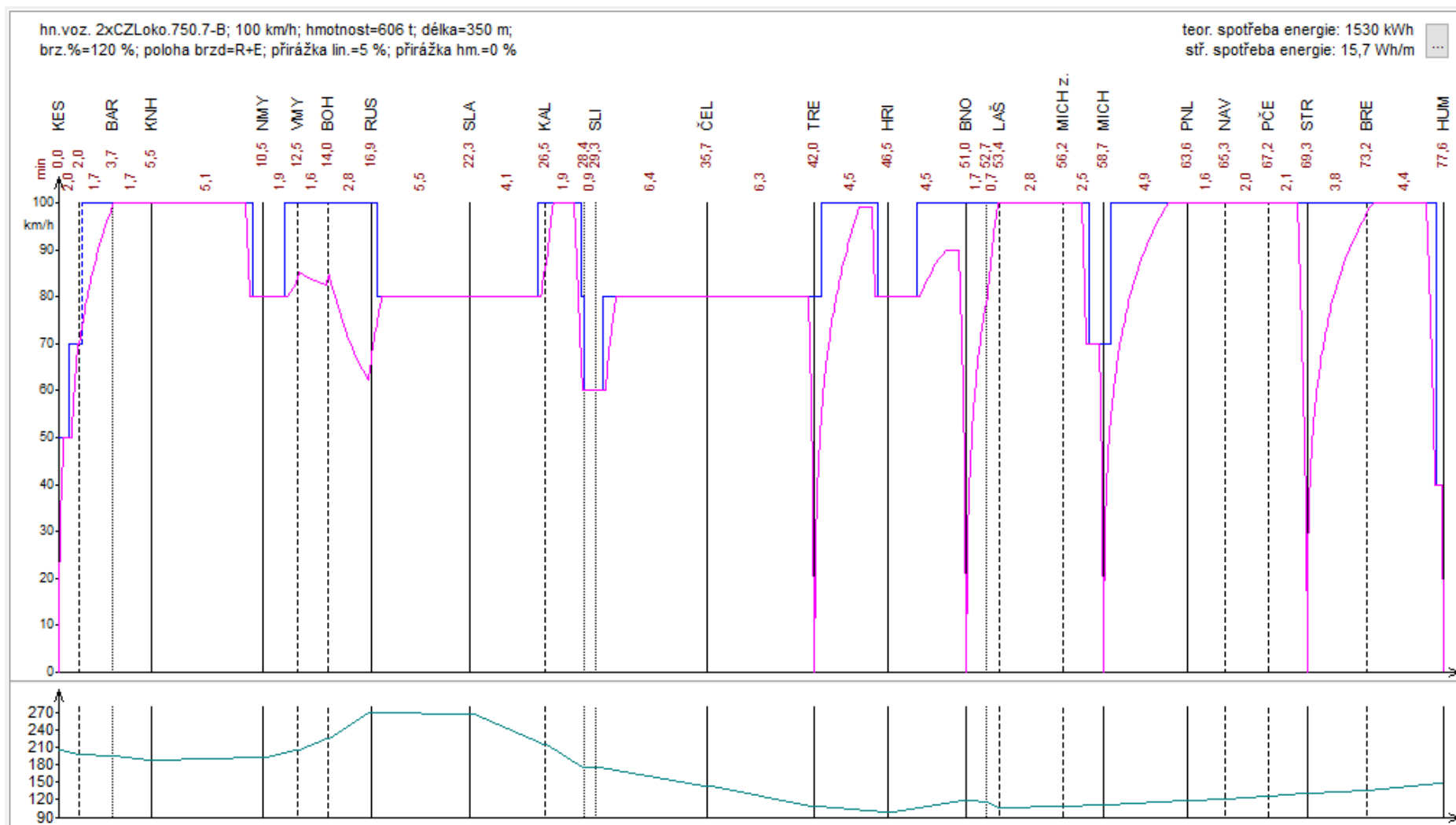
• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 2 - Simulácia č. 1b v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda: • Pohyb vlaku (stred vlaku) • Výškový profil trate [m n.m.] • Traťová dovolená rýchlosť vlaku



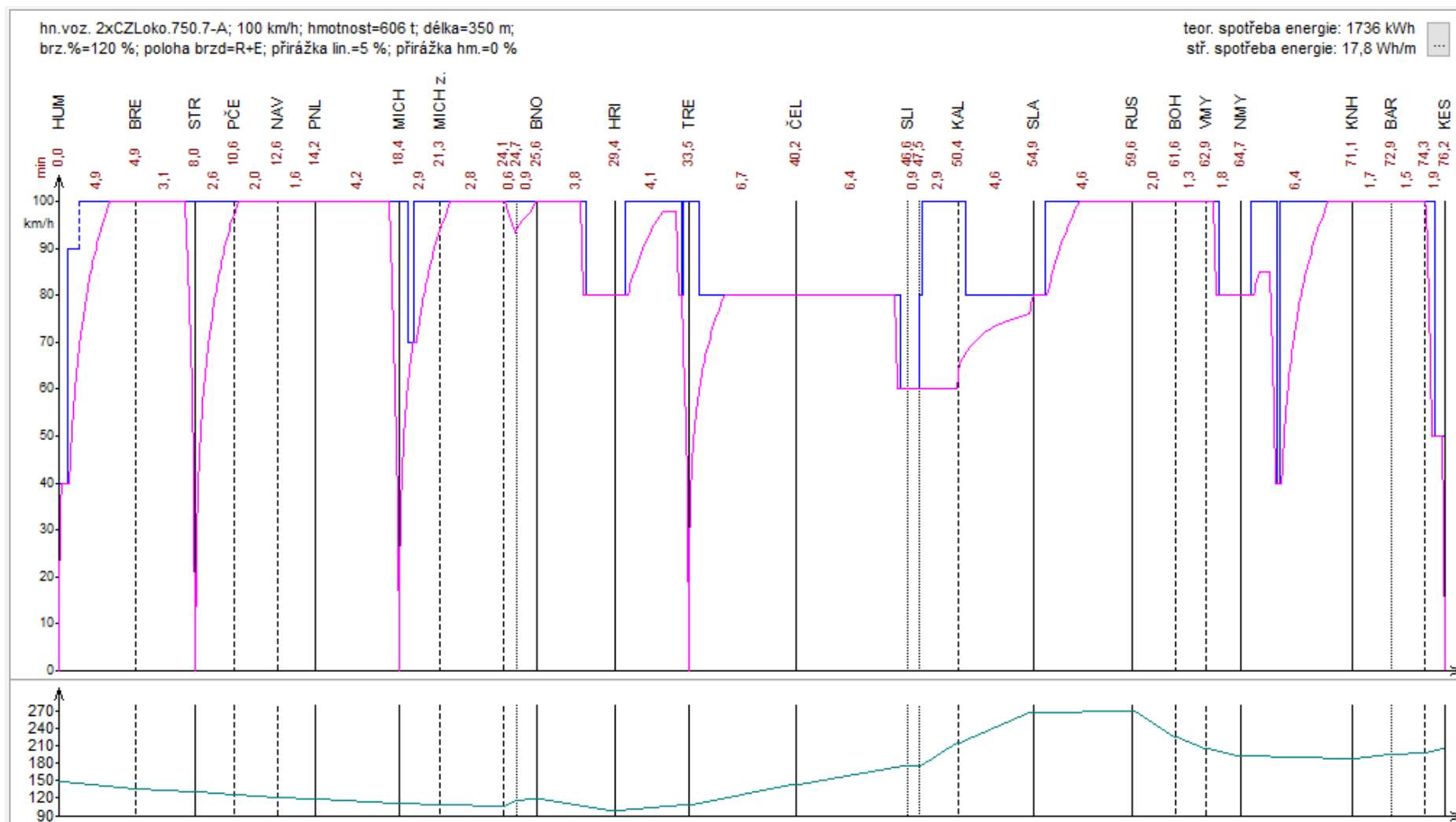
Graf 3- Simulácia č. 2a v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

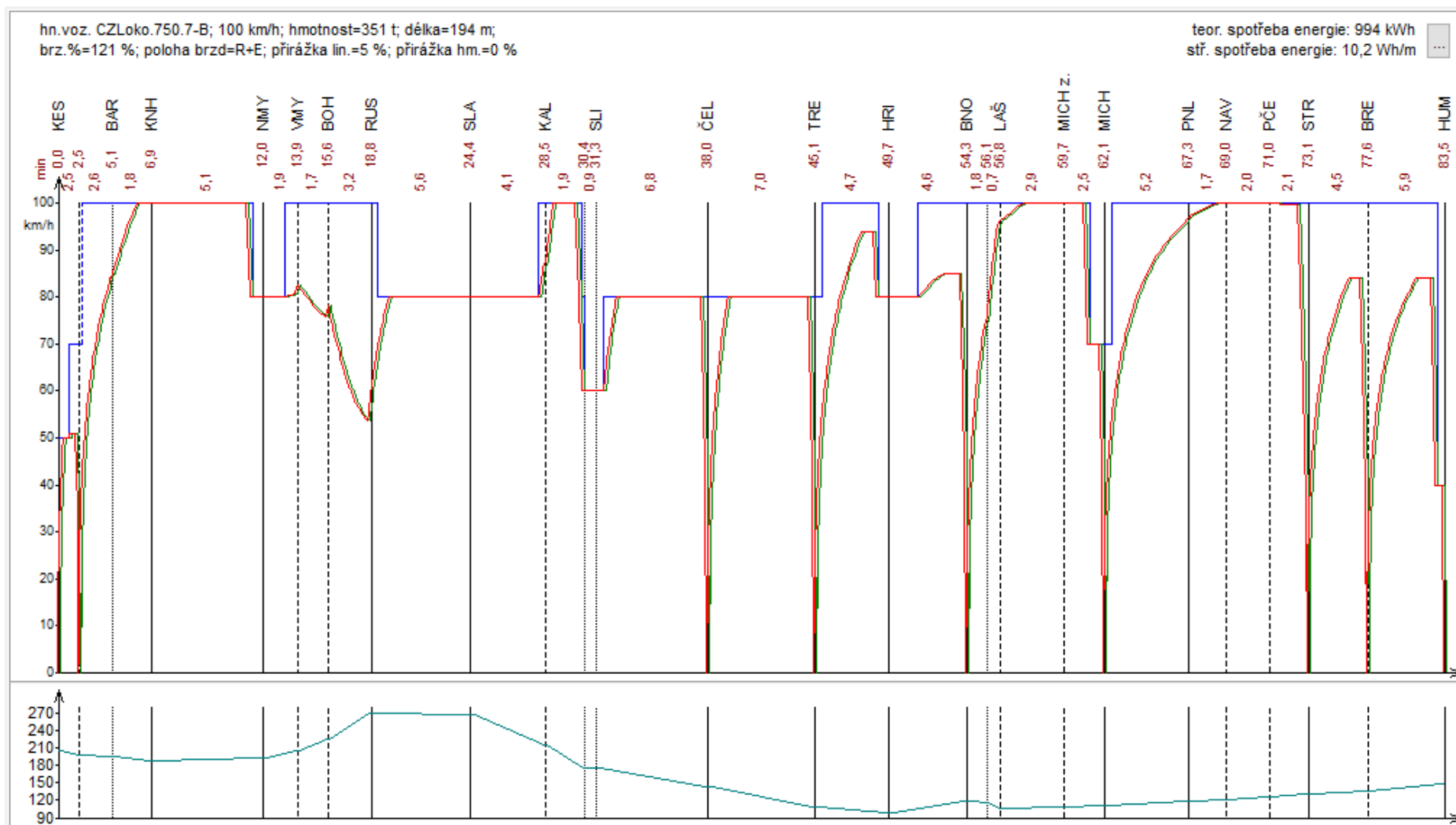
• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 4- Simulácia č. 2b v závislosti rýchlost/dráha

Legenda: • Pohyb vlaku (stred vlaku) • Výškový profil trate [m n.m.] • Traťová dovolená rýchlosť vlaku



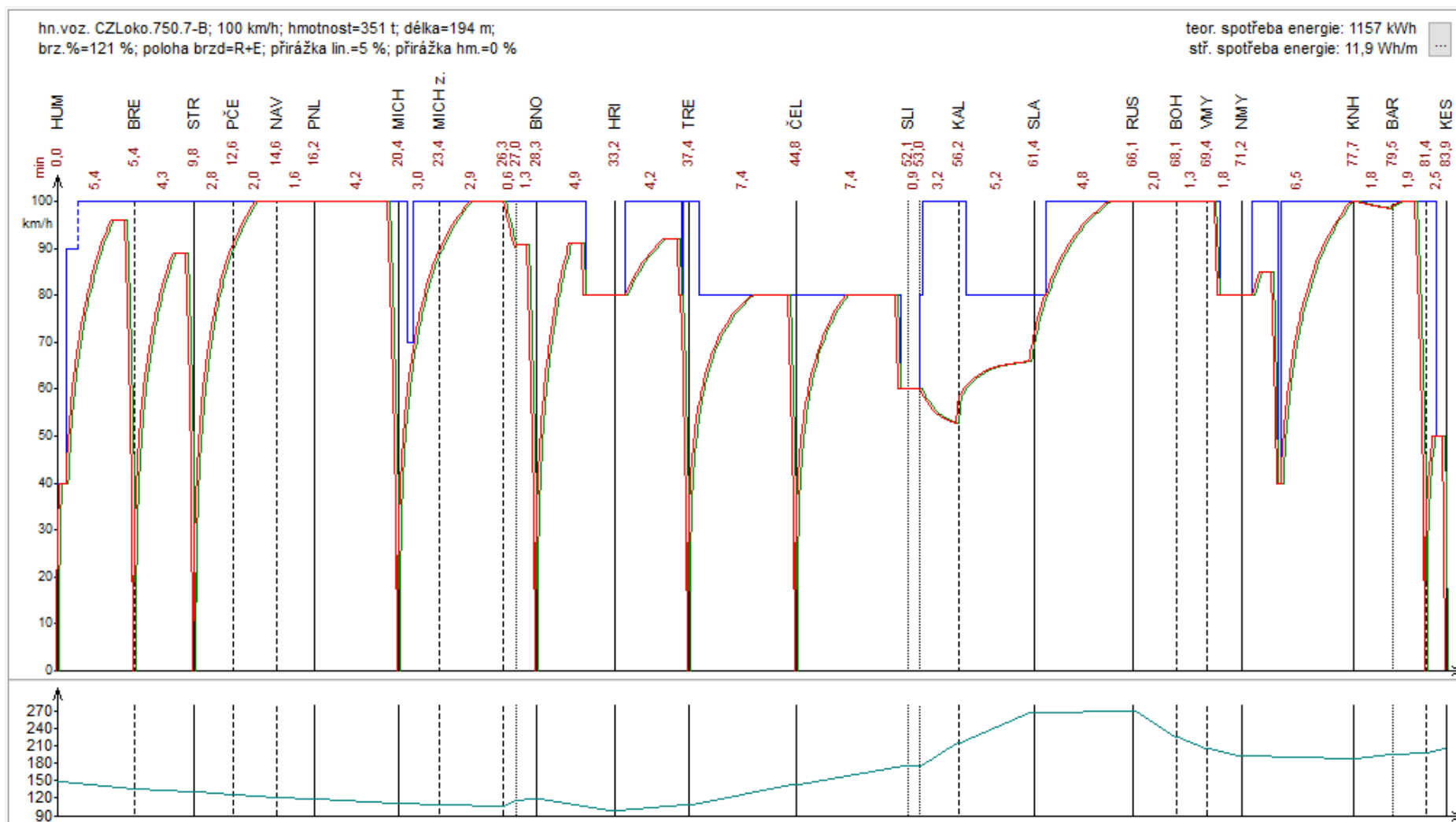
Graf 5- Simulácia č. 3a v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (začiatok/koniec vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

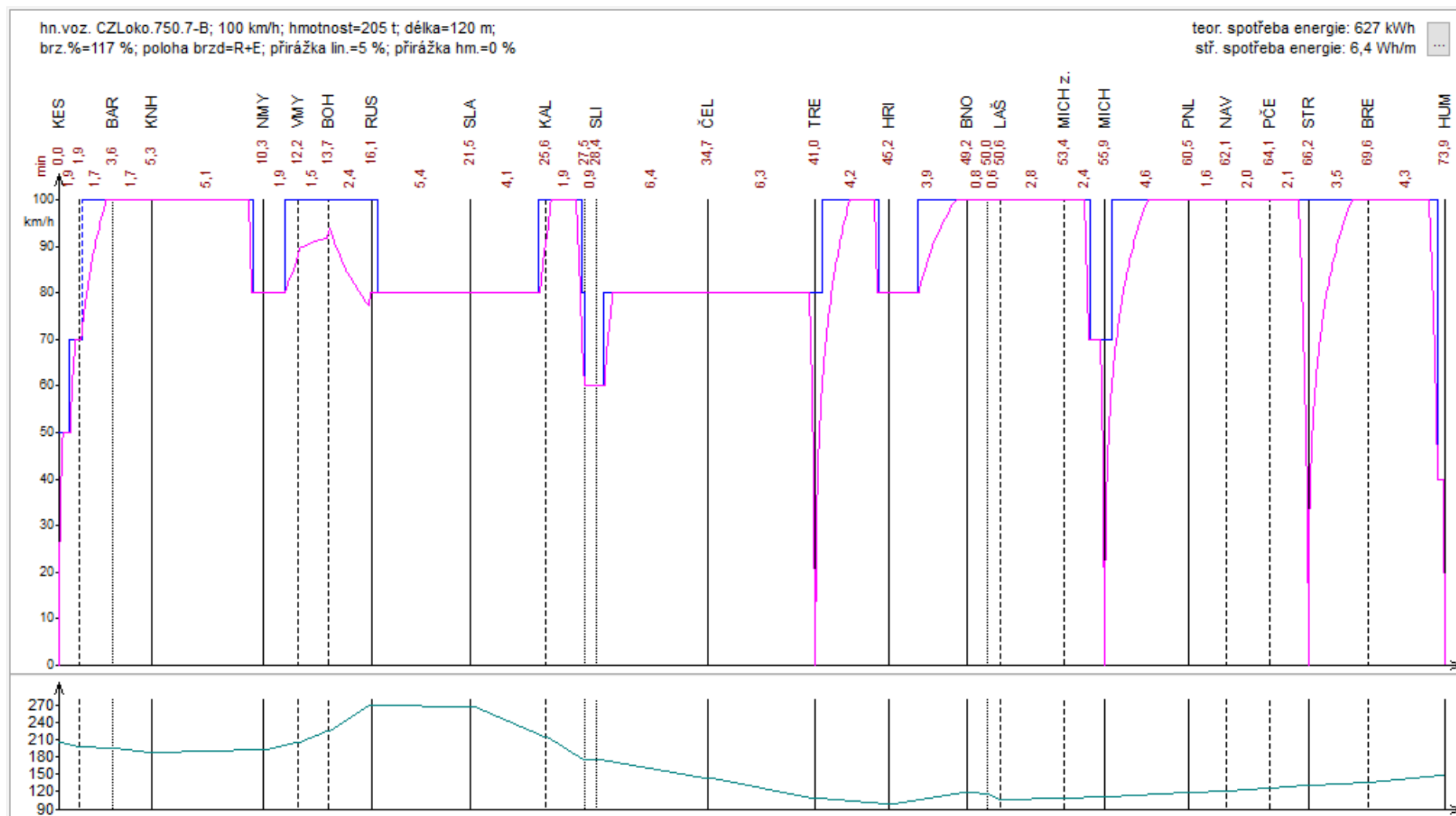
• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 6- Simulácia č. 3b v závislosti rýchlost/dráha

Legenda:

- Pohyb vlaku (začiatok/koniec vlaku)
- Výškový profil trate [m n.m.]
- Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 7- Simulácia č. 4a v závislosti rýchlost/dráha

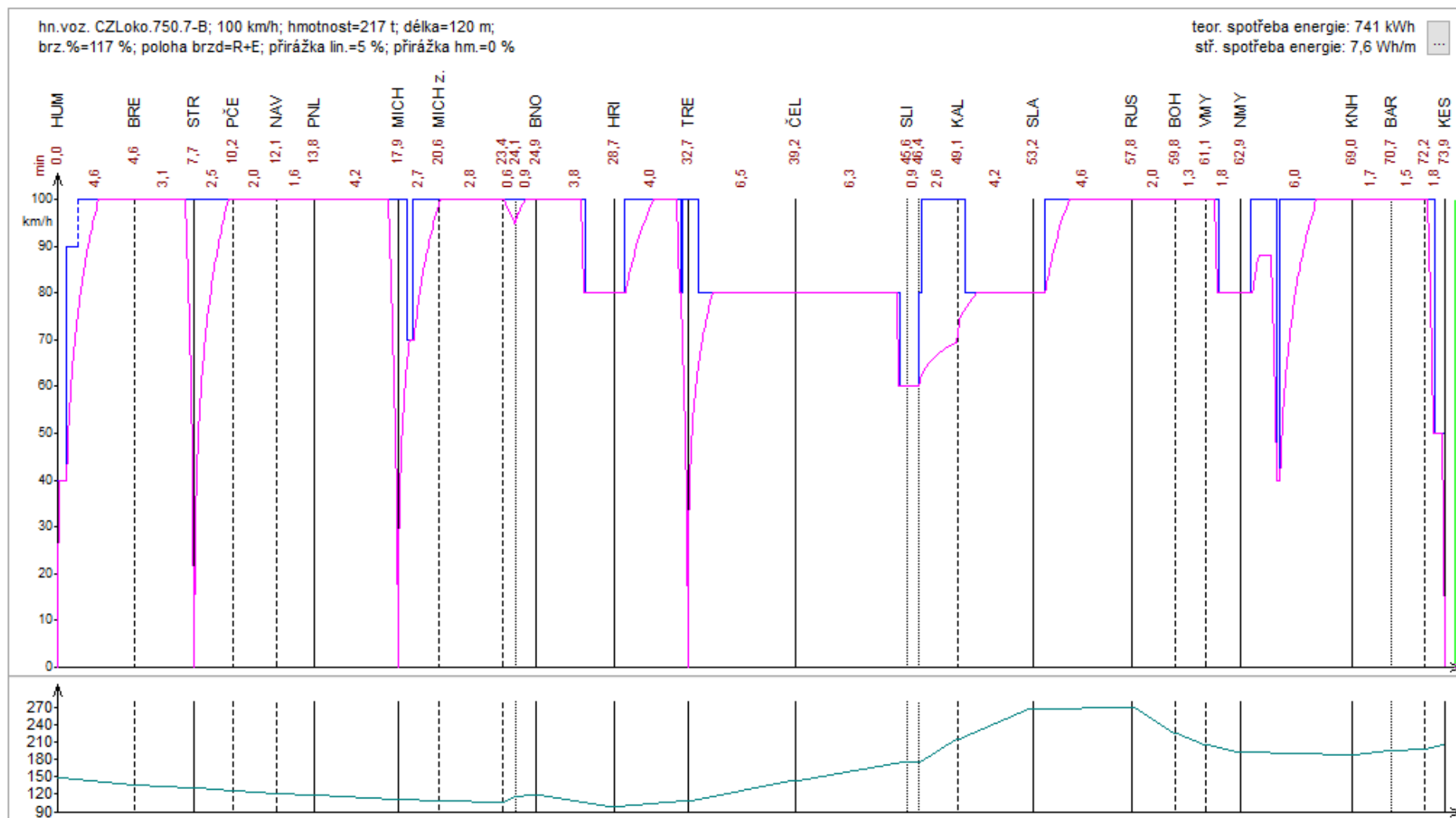
Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

• Tratová dovolená rýchlosť vlaku





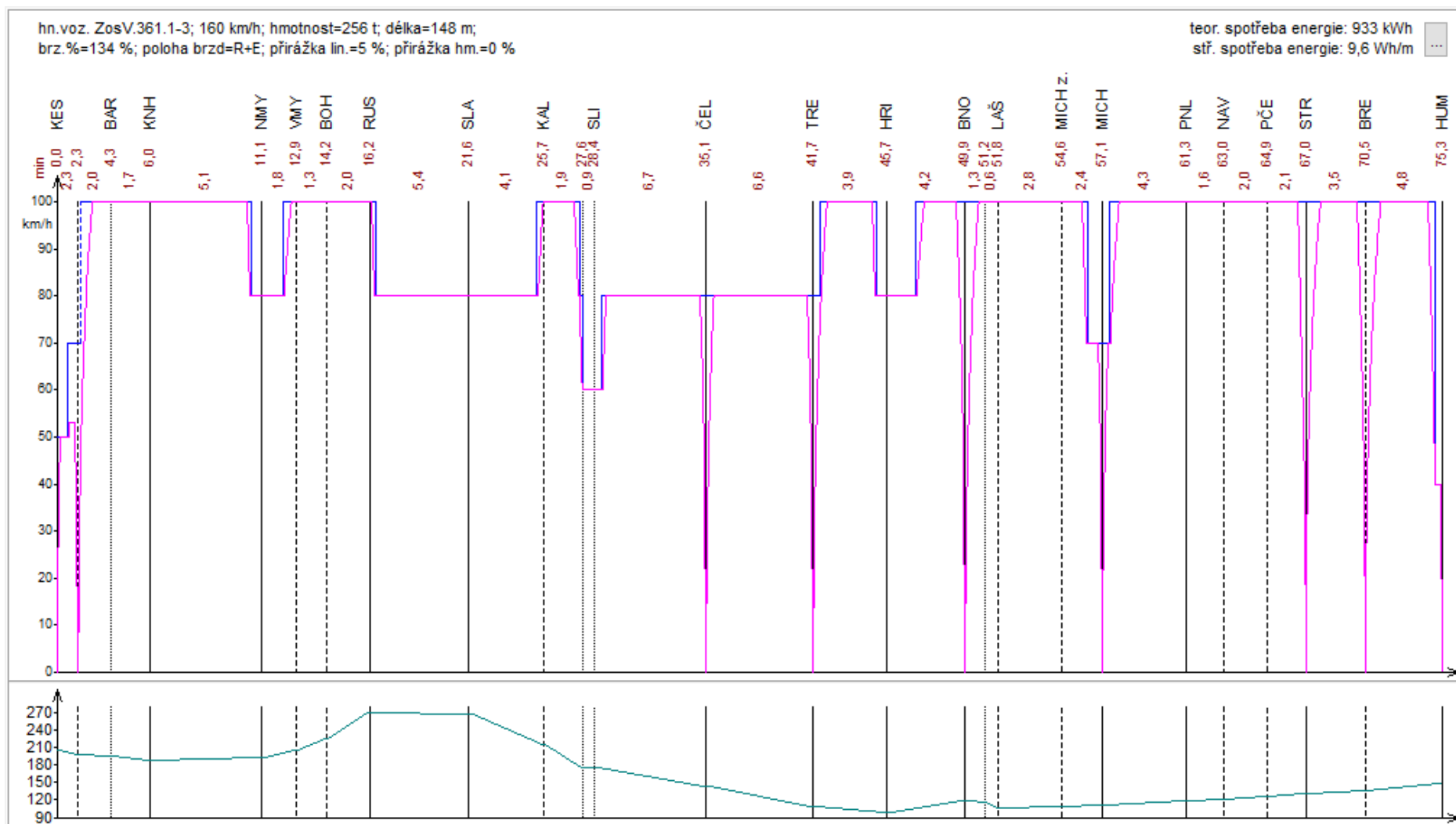
Graf 8- Simulácia č. 4b v závislosti rýchlost/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



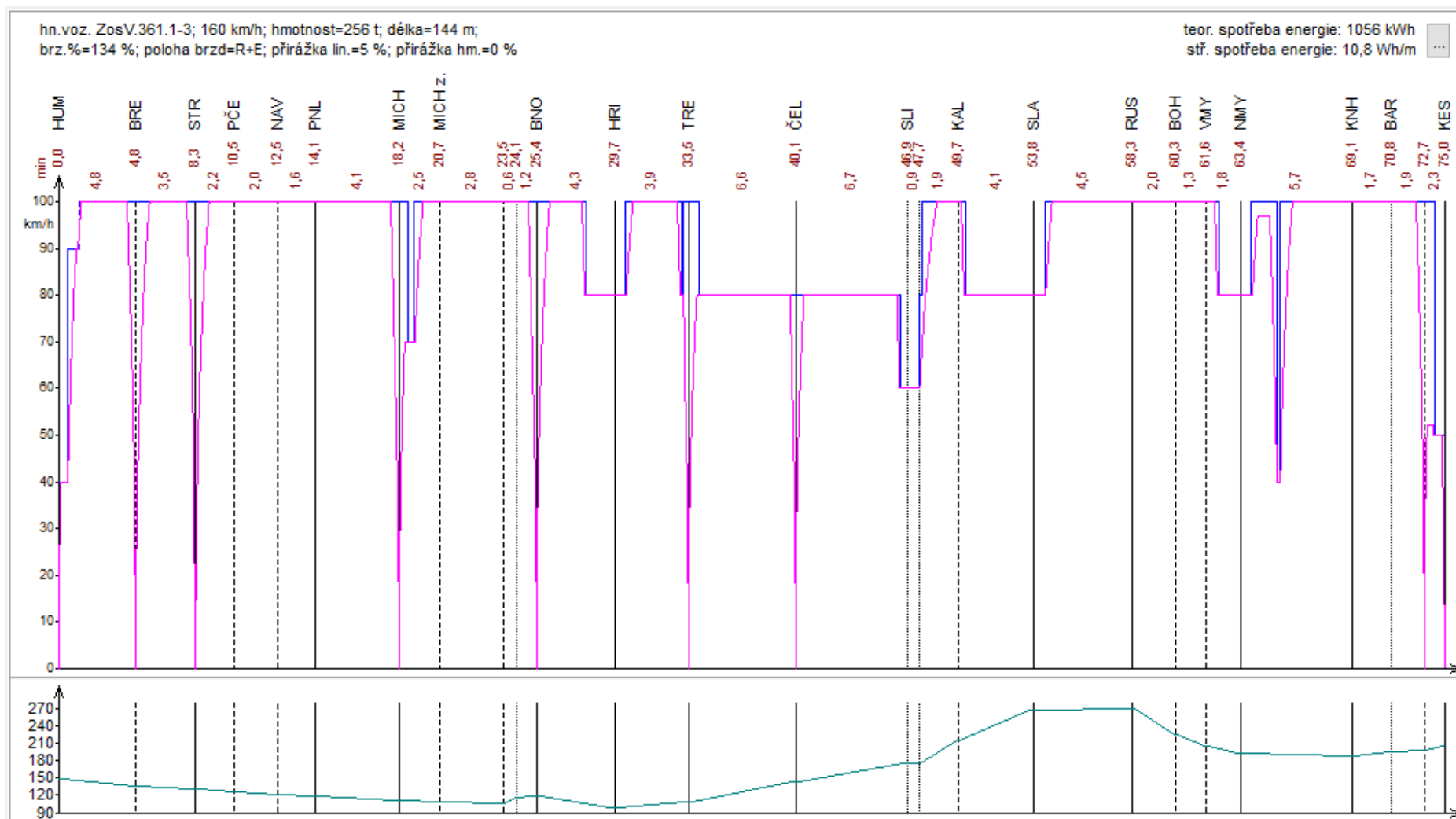
Graf 9- Simulácia č. 5a v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 10- Simulácia č. 5b v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku

## 6.1 Výsledky simulácií vlakov s konvenčným pohonom

Tabuľka 6 - Výsledky simulácií vlakov s konvenčným pohonom

Simulácia č.	Jazdný čas (bez pobytov) [min]	Teoretická spotreba energie (na obvode kolies) [kWh]
1a	80,2	836
1b	79,9	964
<b>1 (obrat)</b>	<b>160,1</b>	<b>1800</b>
2a	77,6	1530
2b	76,2	1736
<b>2 (obrat)</b>	<b>153,8</b>	<b>3266</b>
3a	83,5	994
3b	83,9	1157
<b>3 (obrat)</b>	<b>167,4</b>	<b>2151</b>
4a	73,9	627
4b	73,9	741
<b>4 (obrat)</b>	<b>147,8</b>	<b>1368</b>
5a	75,3	933
5b	75,0	1056
<b>5 (obrat)</b>	<b>150,3</b>	<b>1989*</b>

\*= nie je zohľadnená rekuperácia elektrického vlaku

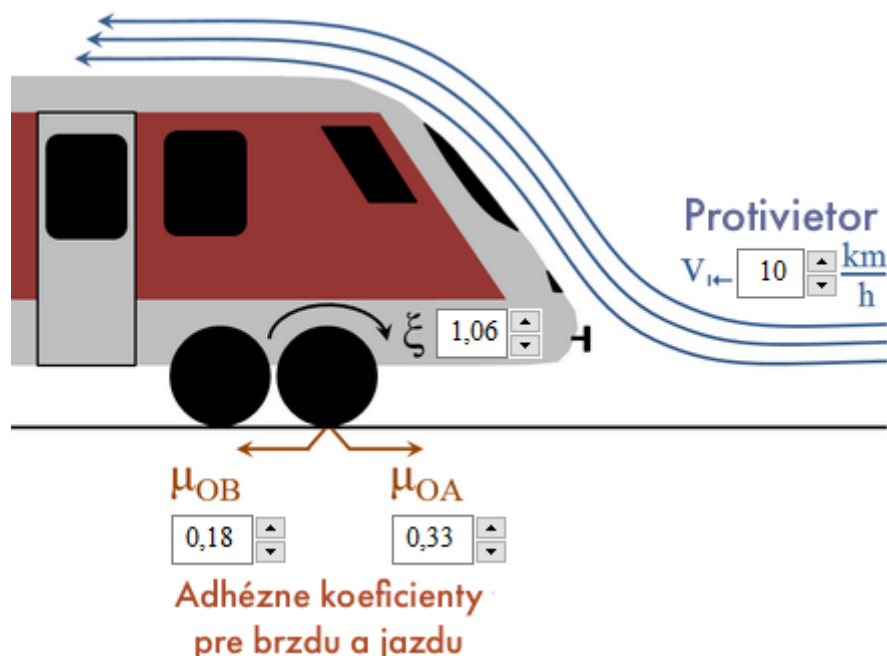
## 7 SIMULÁCIE - VOZIDLÁ S ALTERNATÍVNÝM POHONOM

V nasledujúcich simuláciách využitia vozidiel s alternatívnym pohonom v riešenom železničnom spojení je pomocou programu FBS spracovaný podrobnejší energetický model simulácie jazdy vozidla s akumulátorom typu BEMU a vozidla s palivovým článkom typu HMU. Výstupmi sú:

- Diagram dynamiky jazdy vozidla v závislosti rýchlosť/dráha a výškový profil
- Diagram kumulovanej spotreby energie na obode kolies s/bez rekuperácie
- Diagram kumulovanej spotreby energie na zberači s/bez rekuperácie (BEMU)
- Diagram stavu toku energie na akumulátore (stav dobitia akumulátora)
- Diagram spotreby energie brutto na palivovom článku (HMU)
- Diagram výkonu na palivovom článku (HMU)
- Diagram výkonu na akumulátore

### 7.1 Nastavenie podmienok adhézie a odporov

Pre dynamické modelovanie jazdy vozidla s alternatívnym pohonom je potrebné zvoliť niekoľko parametrov (súčiniteľ rotujúcich hmôt, adhézne koeficienty a odpor protivetru), vid' obrázok nižšie.

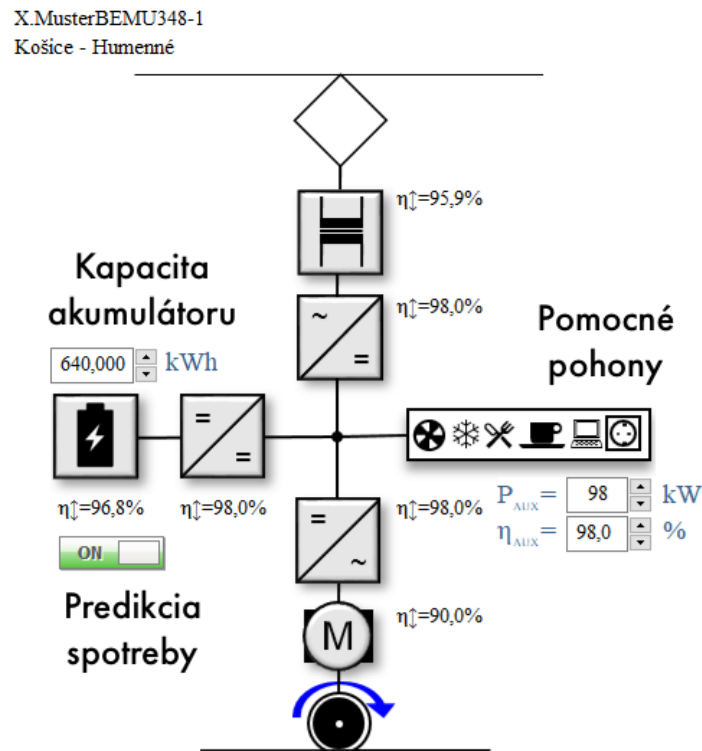


Obrázok 1 - Nastavenie parametrov adhézie a odporov (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie)

Pre všetky simulácie boli hodnoty nastavené podľa Obrázku č. 1 bez zmeny.

## 7.2 Nastavenie vozidla BEMU

Pre simulácie so zvoleným fiktívnym vozidlom BEMU (X.Muster BEMU348-1) je možné upraviť jeho počiatočný stav akumulátoru, výkon pomocných pohonov a účinnosti jednotlivých častí vozidla pre lepšie odsimulovanie rôznych podmienok prevádzky prípadne rôznych typov vozidiel alebo limitných požiadaviek na výrobcov takých vozidiel. Možnosti nastavenia týchto parametrov je možné vidieť na Obrázku č. 2.



**Obrázok 2** - Nastavenia účinnosti elektrických častí a iných parametrov vozidla BEMU (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie)

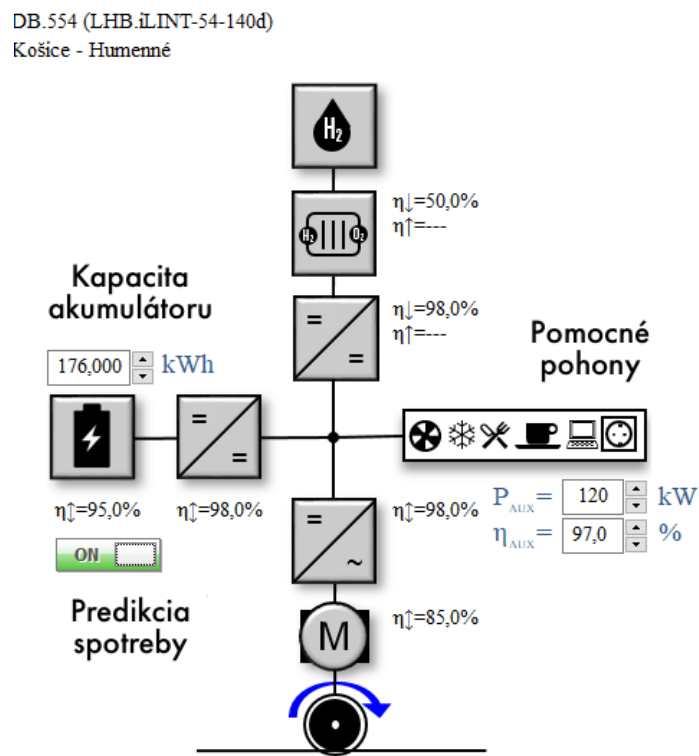
V nastaveniach (Obrázok č. 2) je možné nechať program predikovať spotrebu vozidla na základe čoho si vozidlo pomocou svojho energetického manažmentu dokáže optimalizovať fáze nabíjania/vybíjania akumulátoru a predikovať potencionálne iné zdroje energie (rekuperačné brzdenie), vďaka ktorým vozidlo minimalizuje spotrebu energie z napájacej sústavy či statických nabíjajúcich staníc. Pre simulácie bola táto možnosť vypnutá, vozidlá tak vychádzajú na neelektrizovaný úsek plne nabité, naopak v móde „trolej“ sa budú snažiť čo najrýchlejšie nabiť naspäť na plný stav kapacity.

Vo všetkých simuláciách sa počíta s plným počiatočným stavom nabitia akumulátoru pri ceste z Košíc do Humenného. Pri spiatocnej ceste je ponechaný stav nabitia akumulátoru v rovnakej úrovni ako pri príchode do stanice Humenné. Je ale potrebné brať do úvahy vybíjanie akumulátoru pri zapnutých pomocných pohonoch, ktoré nie je zanedbateľné,

preto je v simulácií č. A1b – Graf č. 20 vyobrazený maximálny možný pobyt v konečnej stanici Humenné bez pripojenia k napájaniu pri spustených pomocných pohonoch. Účinnosti pohonov a odber pomocných systémom sú vo všetkých simuláciách s vozidlom BEMU ponechané nastavené ako na Obrázku č. 2.

### 7.3 Nastavenie vozidla HMU

V simuláciách s jednotkou Coradia iLINT-54-140d je možné nastaviť parametre podobne ako u vozidla BEMU. Aj pri simuláciách s vozidlom s palivovými článkami je ponechaná predikcia spotreby vypnutá. V simuláciách je počítané s plným stavom nabitia akumulátora a doplnenia zásobníka na vodík na začiatku cesty z Košíc do Humenného, pri ceste späť je ponechaný stav nabitia akumulátora obdobne ako u vozidiel BEMU. Účinnosti pohonov a odber pomocných systémom sú vo všetkých simuláciách s vozidlom HMU ponechané nastavené ako na Obrázku č. 3.



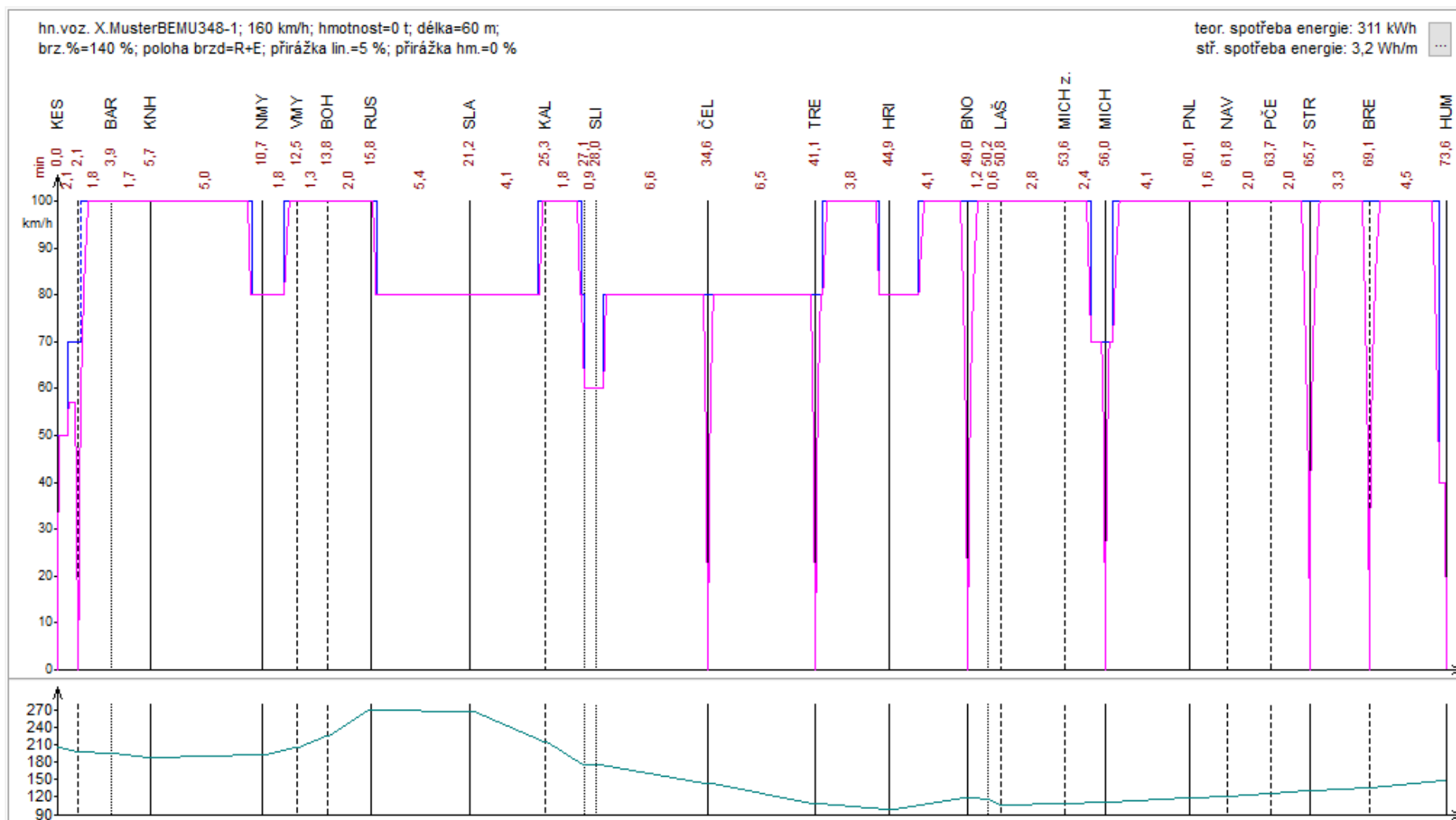
**Obrázok 3** - Nastavenia účinnosti elektrických častí a iných parametrov vozidla HMU (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie)

## 7.4 Zoznam simulácií vozidiel s alternatívnym pohonom

Tabuľka 7 - Zoznam simulácií dynamiky jazdy a energetickej spotreby vozidiel s alternatívnym pohonom

Simulácia č.	Názov hnacieho vozidla v FBS	Typ	Pobyty	Smer jazdy
A1a	X.Muster BEMU348-1	BEMU	REX	KES - HUM
A1b	X.Muster BEMU348-1	BEMU	REX	HUM - KES
A2a	2x X.Muster BEMU348-1	2x BEMU	REX	KES - HUM
A2b	2x X.Muster BEMU348-1	2x BEMU	REX	HUM - KES
A3a	LHB.iLINT-54-140d	HMU	REX	KES - HUM
A3b	LHB.iLINT-54-140d	HMU	REX	HUM - KES





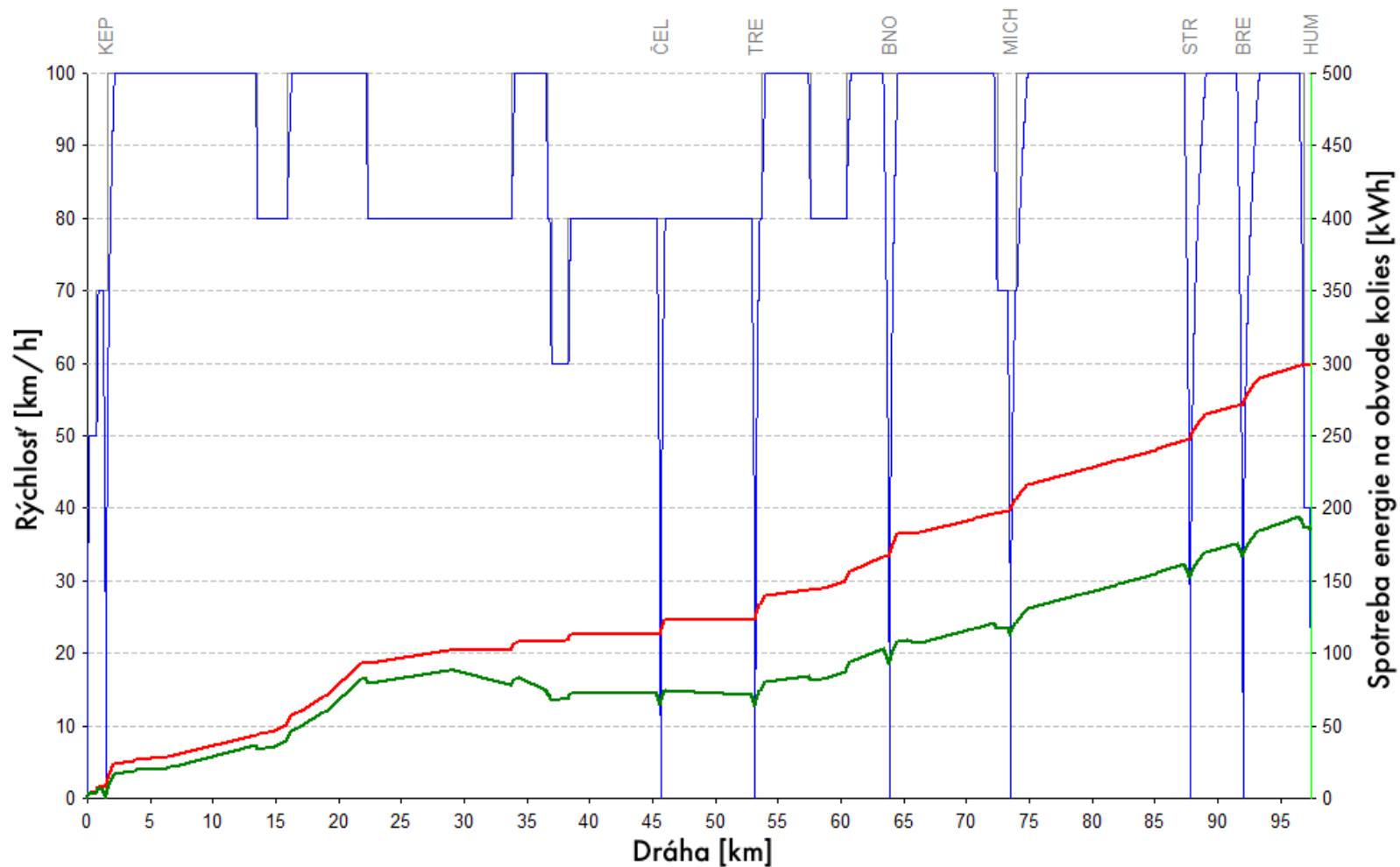
Graf 11- Simulácia č. A1a v závislosti rýchlost/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 12- Simulácia č. A1a – spotreba energie na obvođe kolies

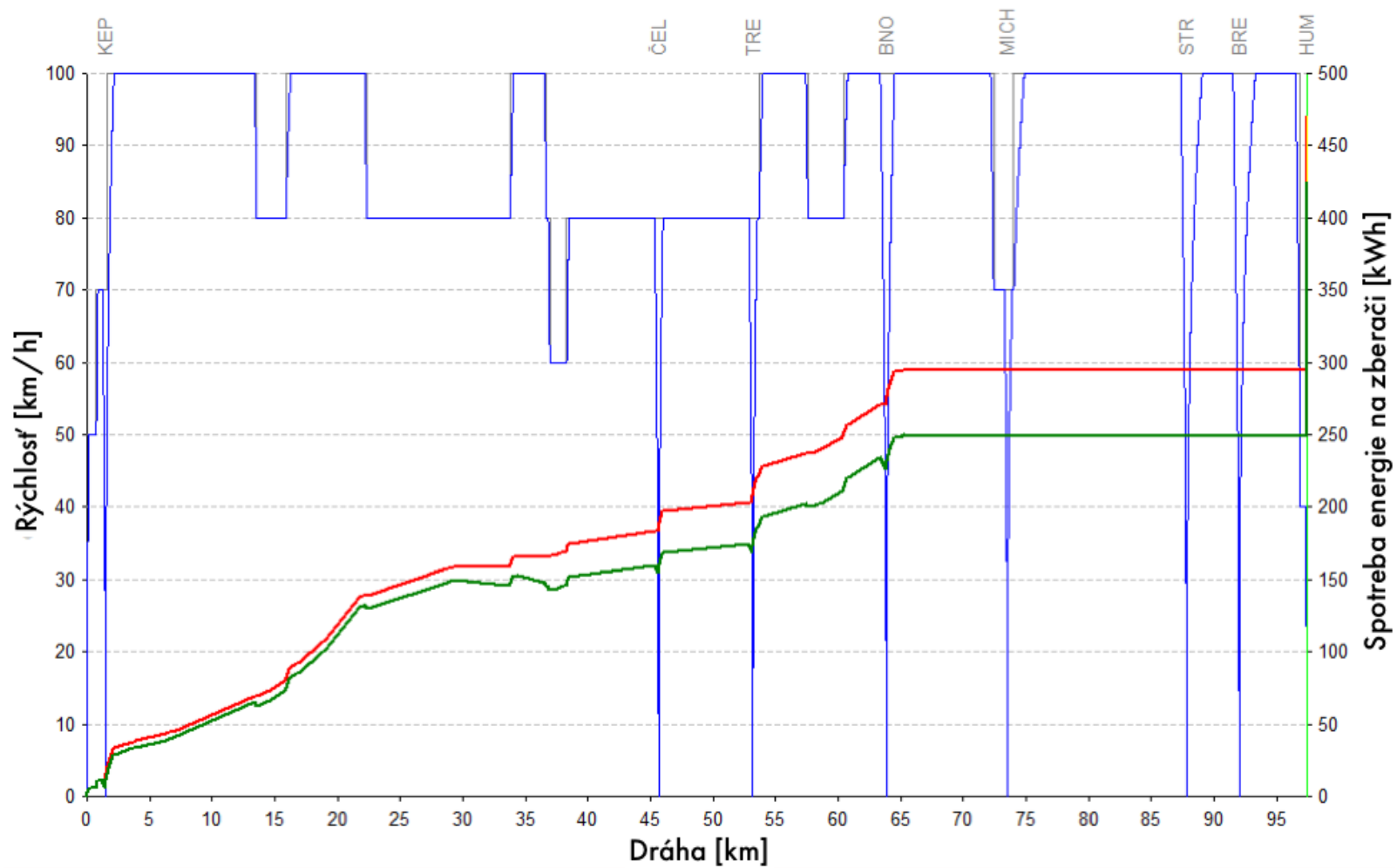
Legenda:

• Kumulovaná spotreba energie na obvođe kolies bez rekuperácie

• Kumulovaná spotreba energie na obvođe kolies s rekuperáciou

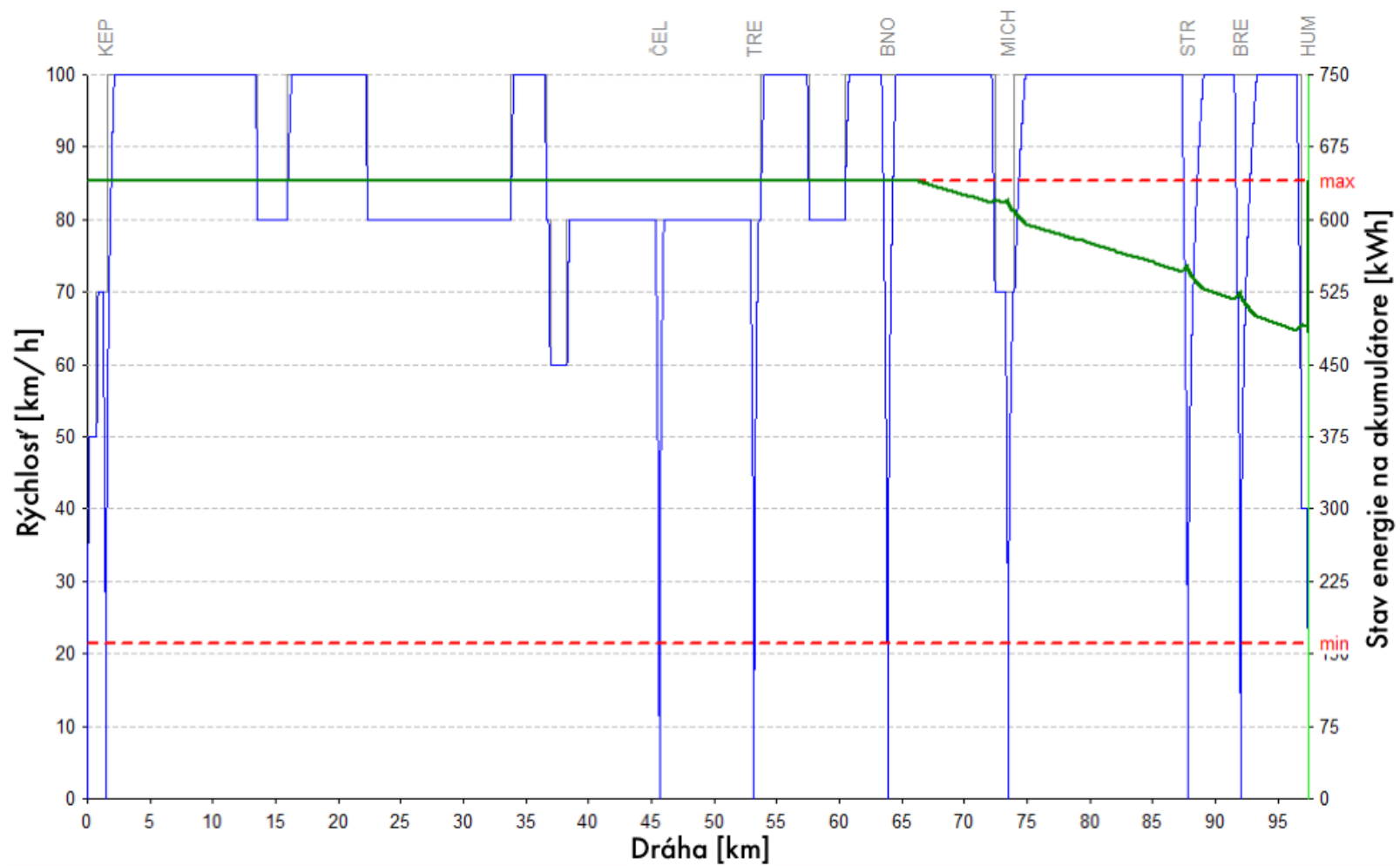
• Rýchlosť vlaku

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 13- Simulácia č. A1a – spotreba energie na zberači

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na zberači bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na zberači s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 14- Simulácia č. A1a – stav energie na akumulátore

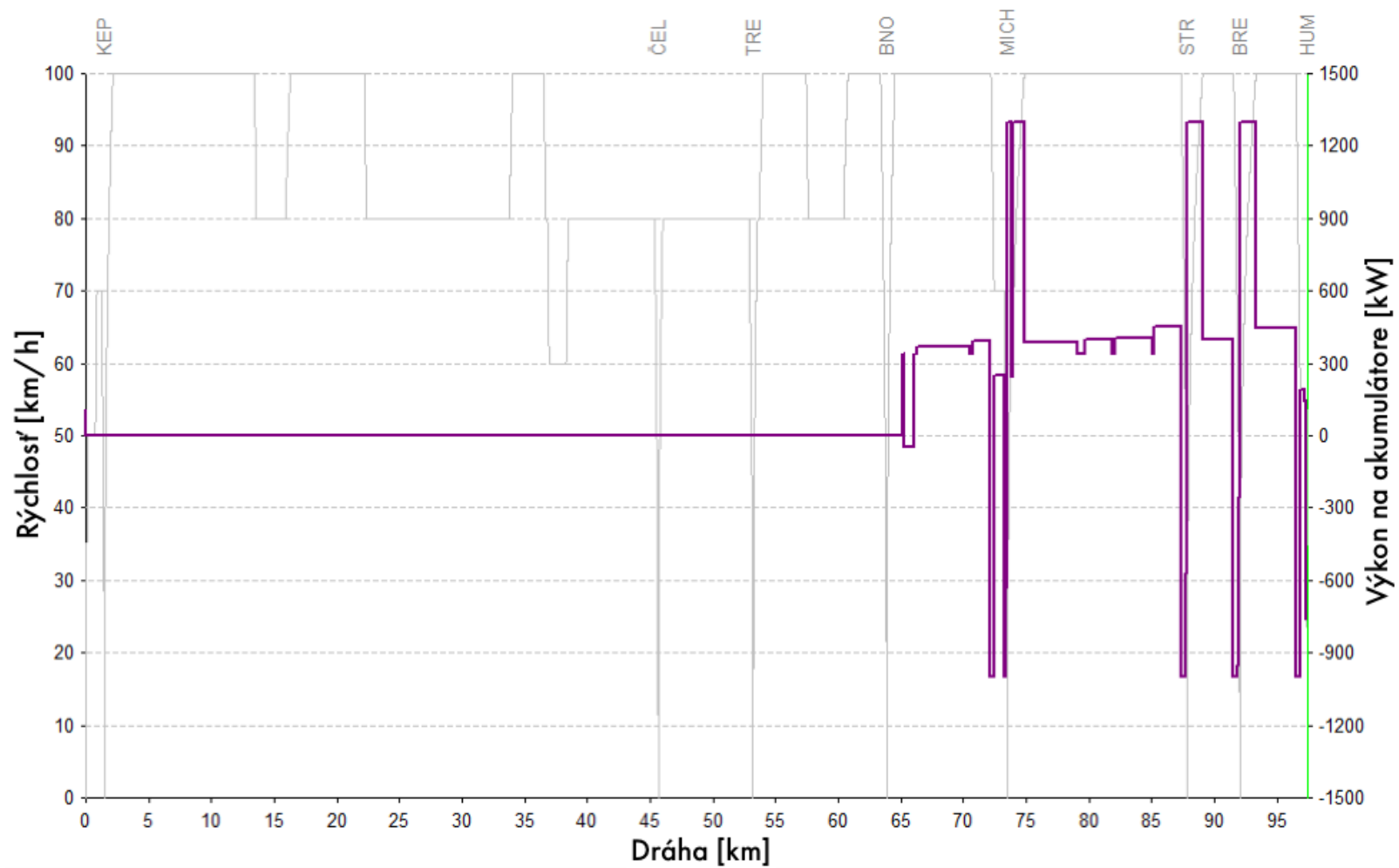
Legenda:

• Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke

• Stav energie na akumulátore

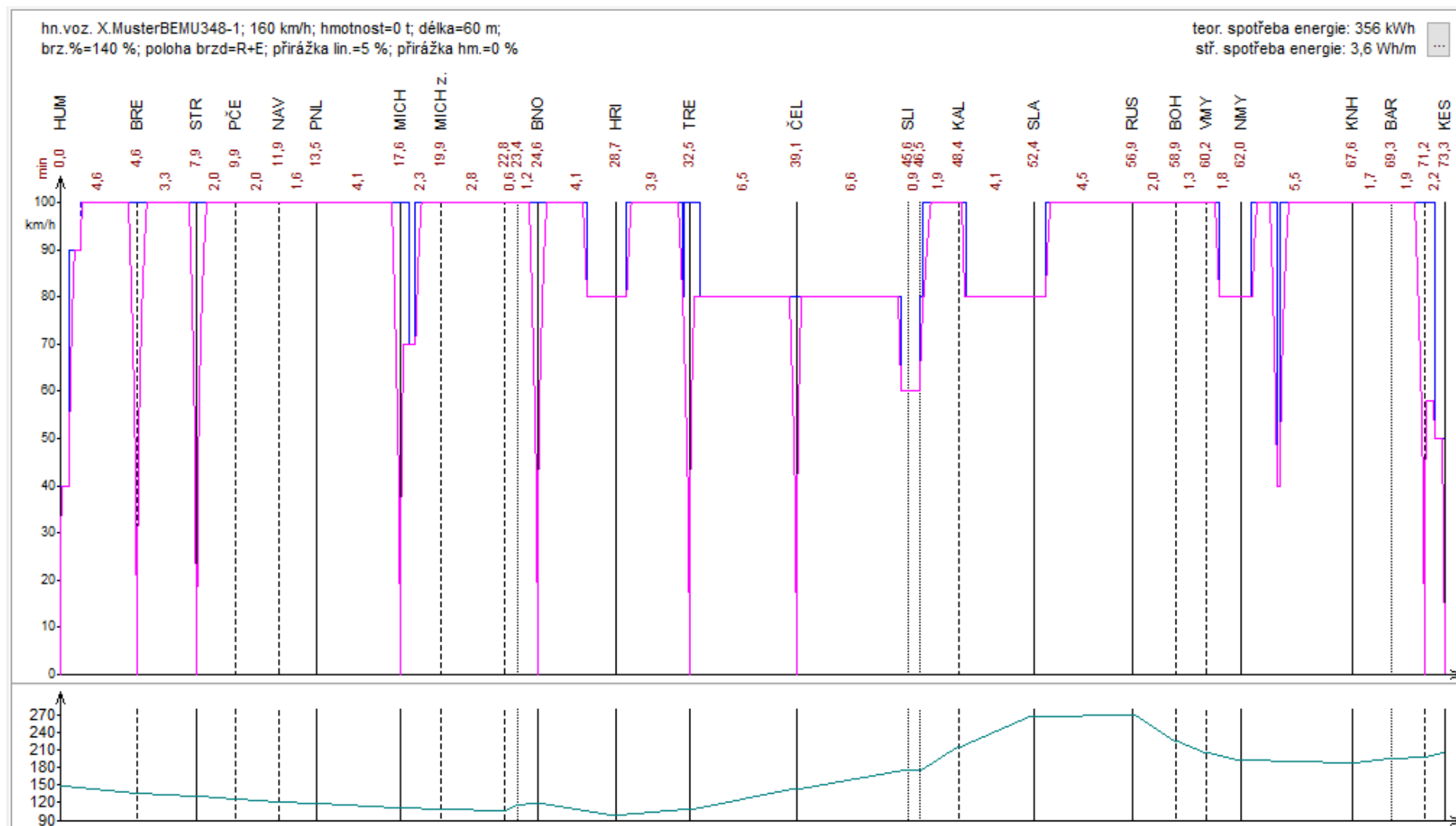
• Rýchlosť vlaku

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



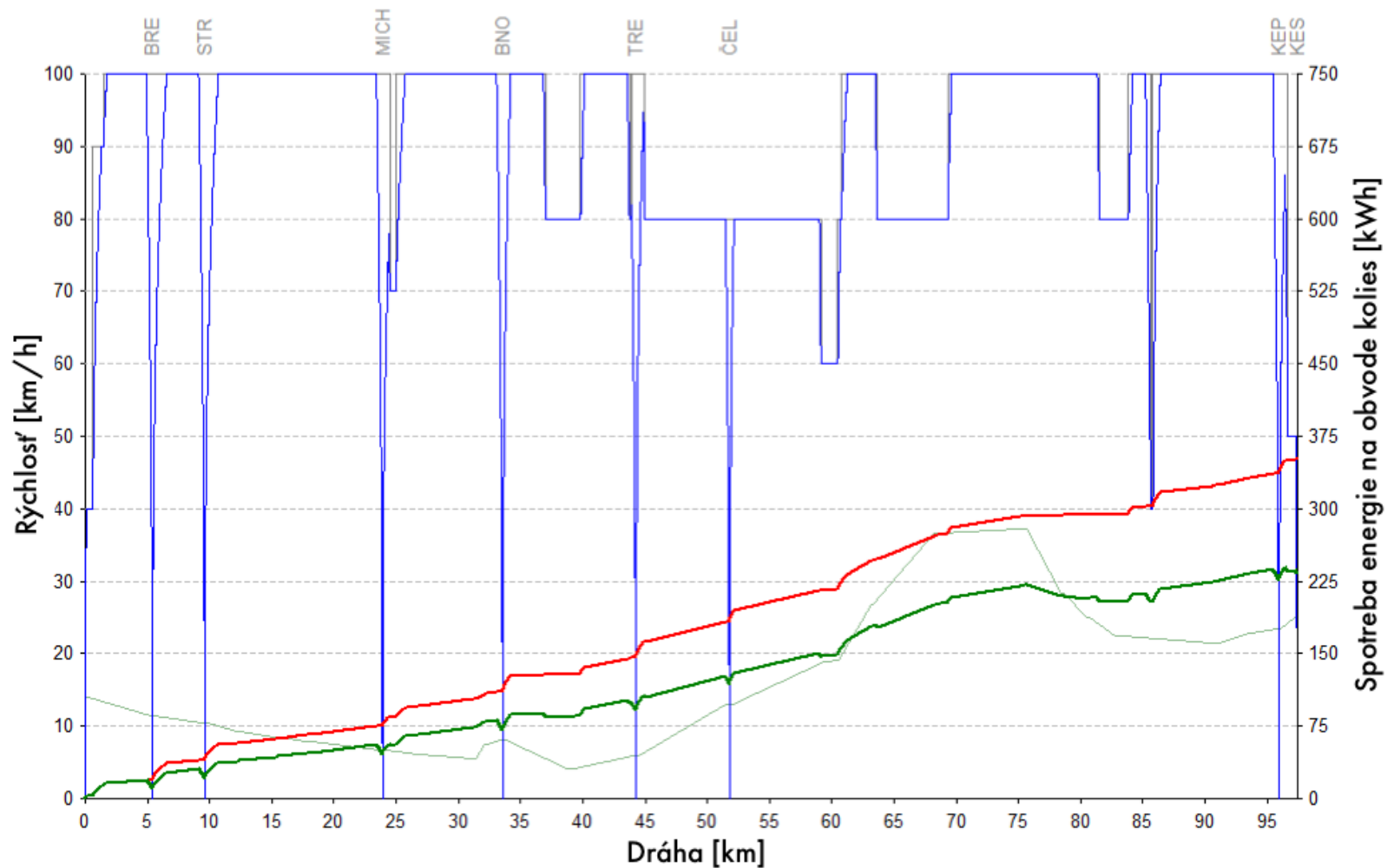
Graf 15- Simulácia č. A1a – výkon na akumulátore

Legenda: • Výkon na akumulátore • Rýchlosť vlaku



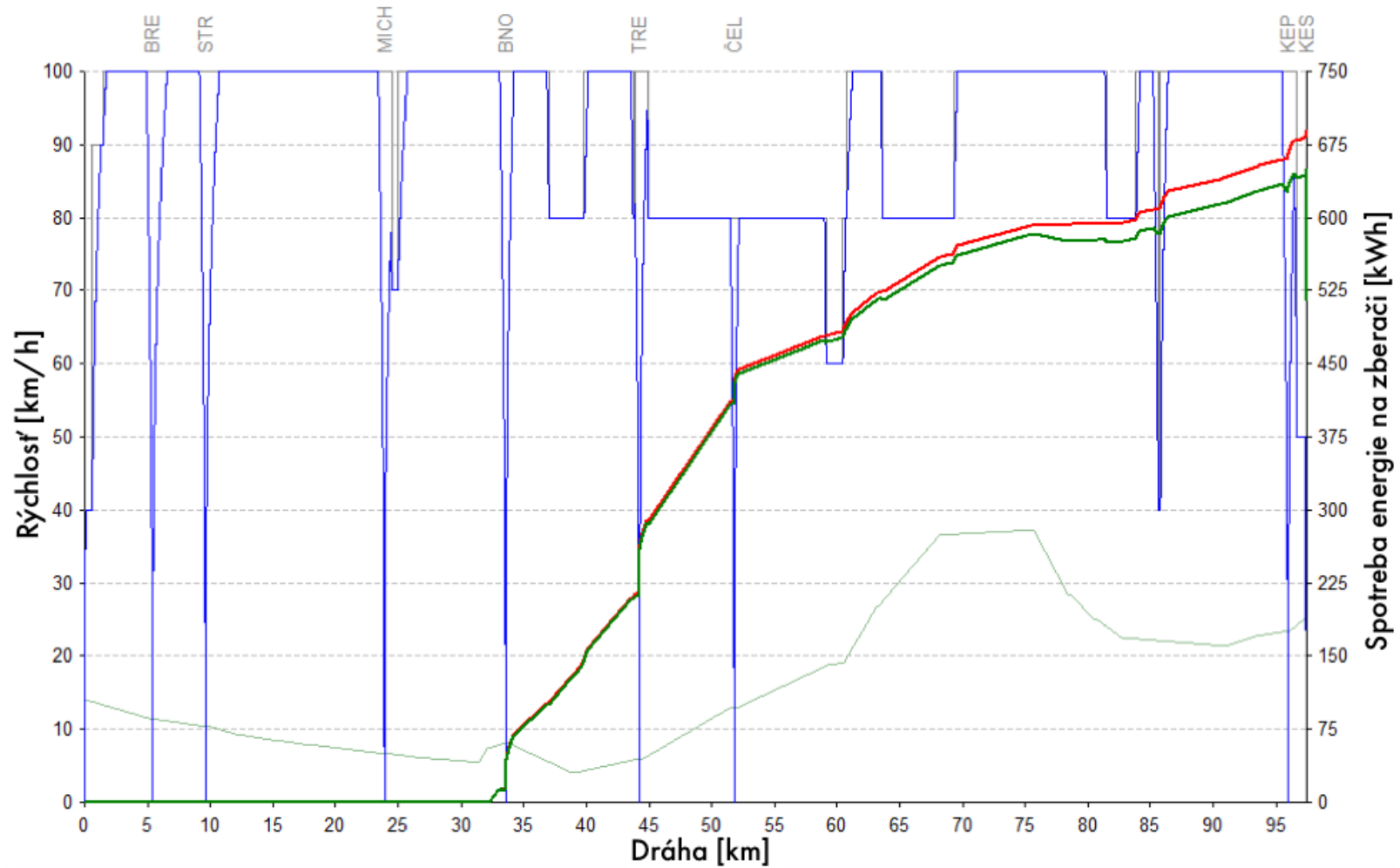
Graf 16- Simulácia č. A1b v závislosti rýchlosť/dráha

- Legenda:
- Pohyb vlaku (stred vlaku)
  - Výškový profil trate [m n.m.]
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 17- Simulácia č. A1b – spotreba energie na obvode kolies

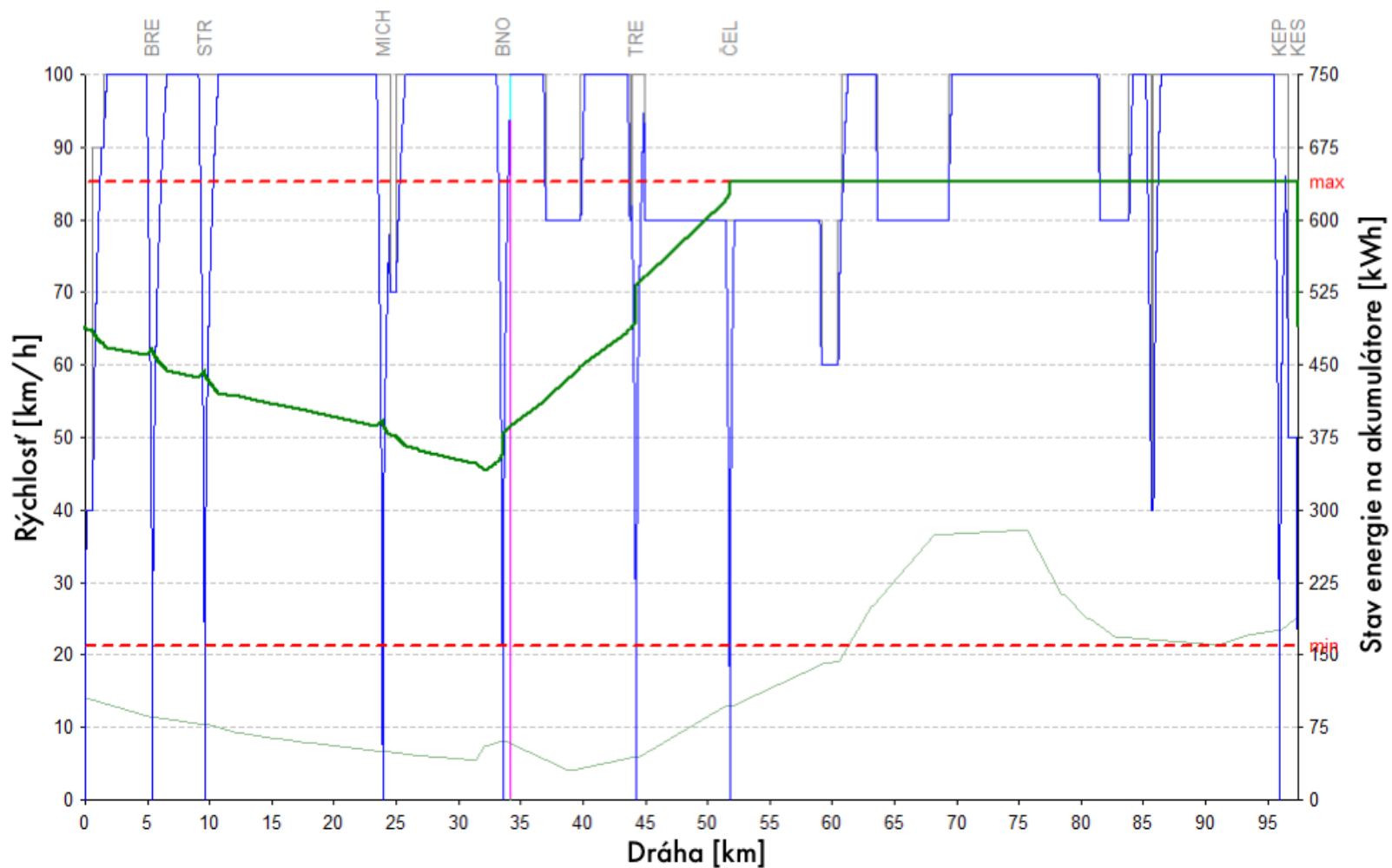
- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 18- Simulácia č. A1b – spotreba energie na zberači

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na zberači bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na zberači s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku





Graf 19- Simulácia č. A1b – stav energie na akumulátore

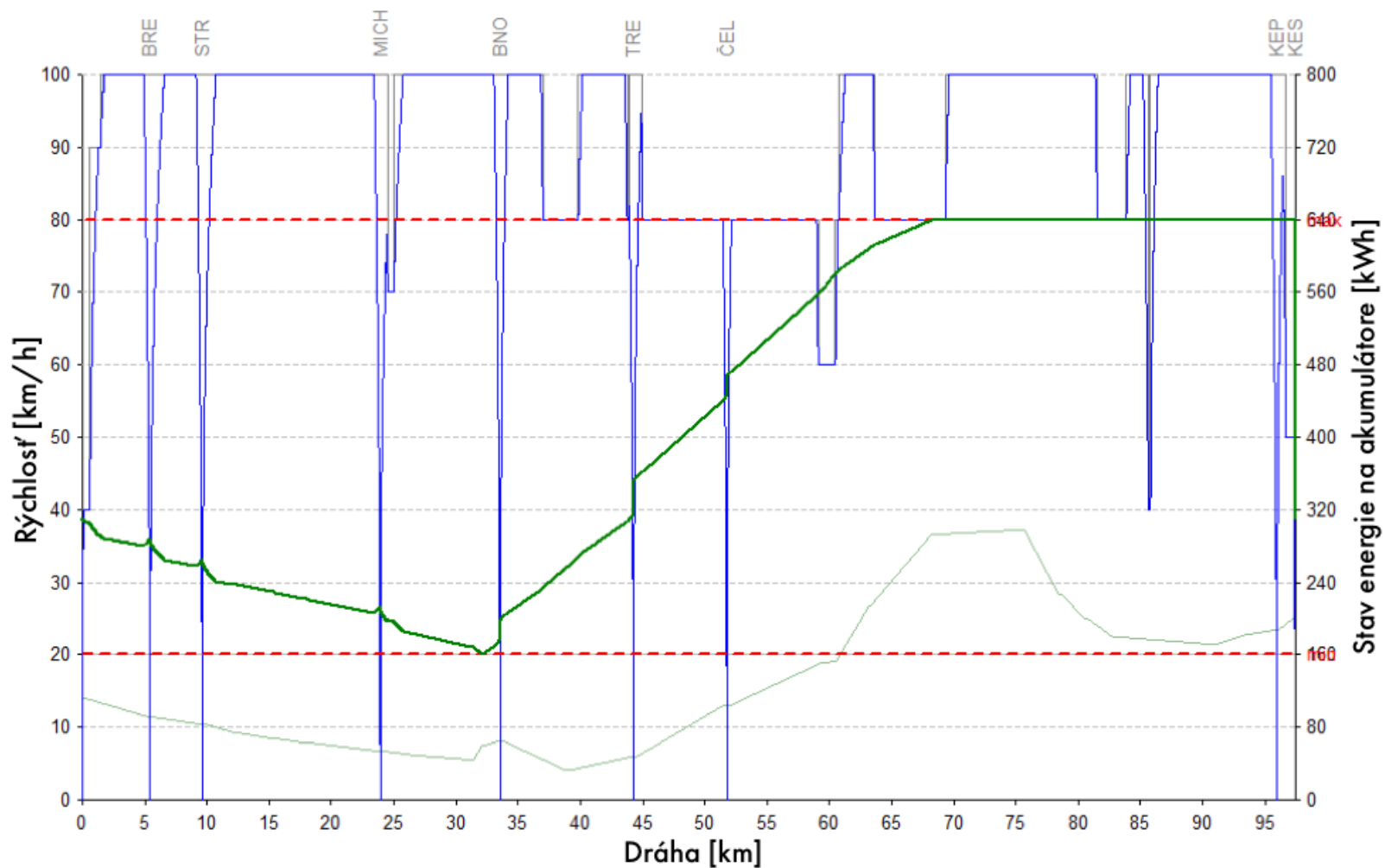
Legenda:

• Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke

• Stav energie na akumulátore

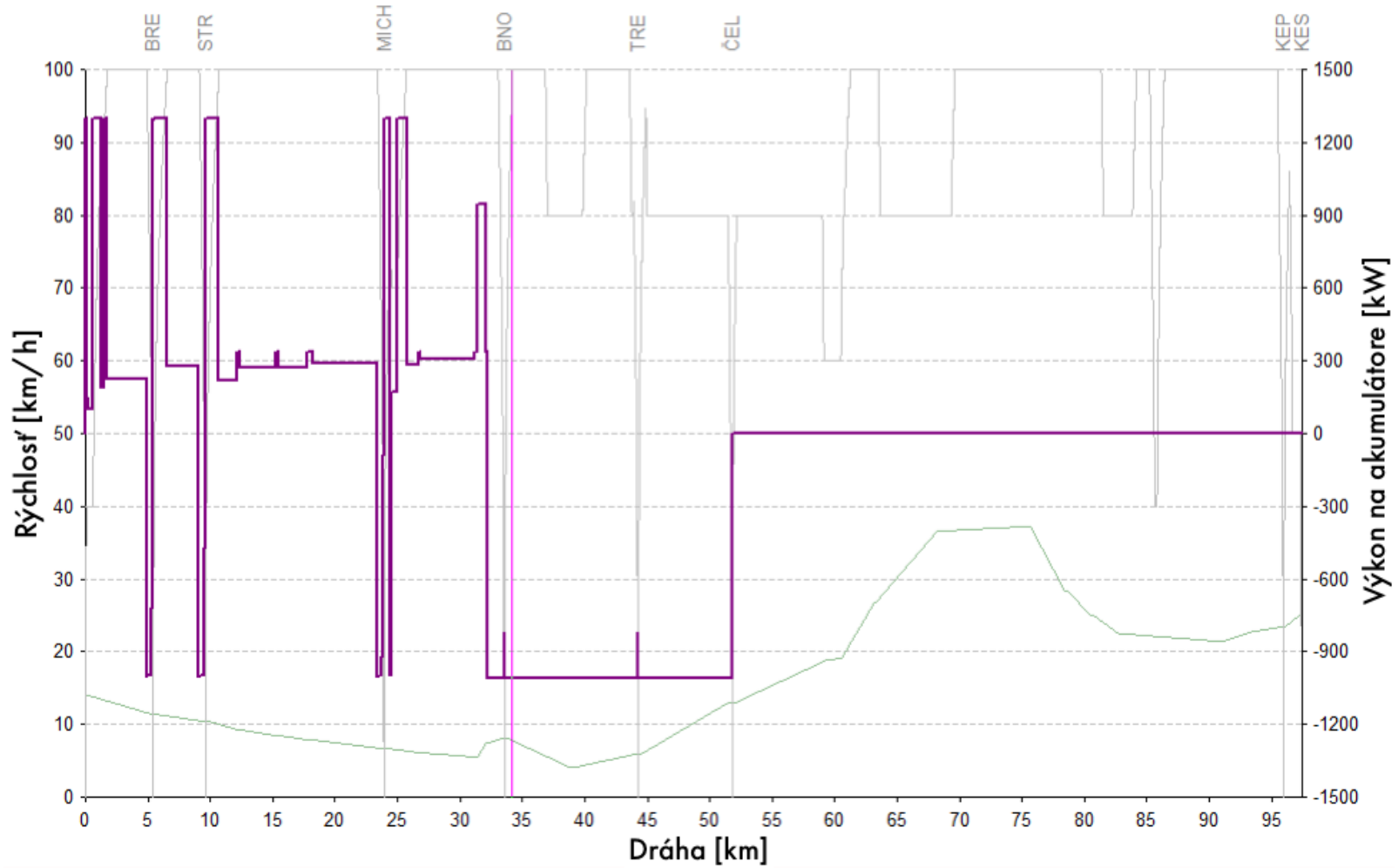
• Rýchlosť vlaku

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



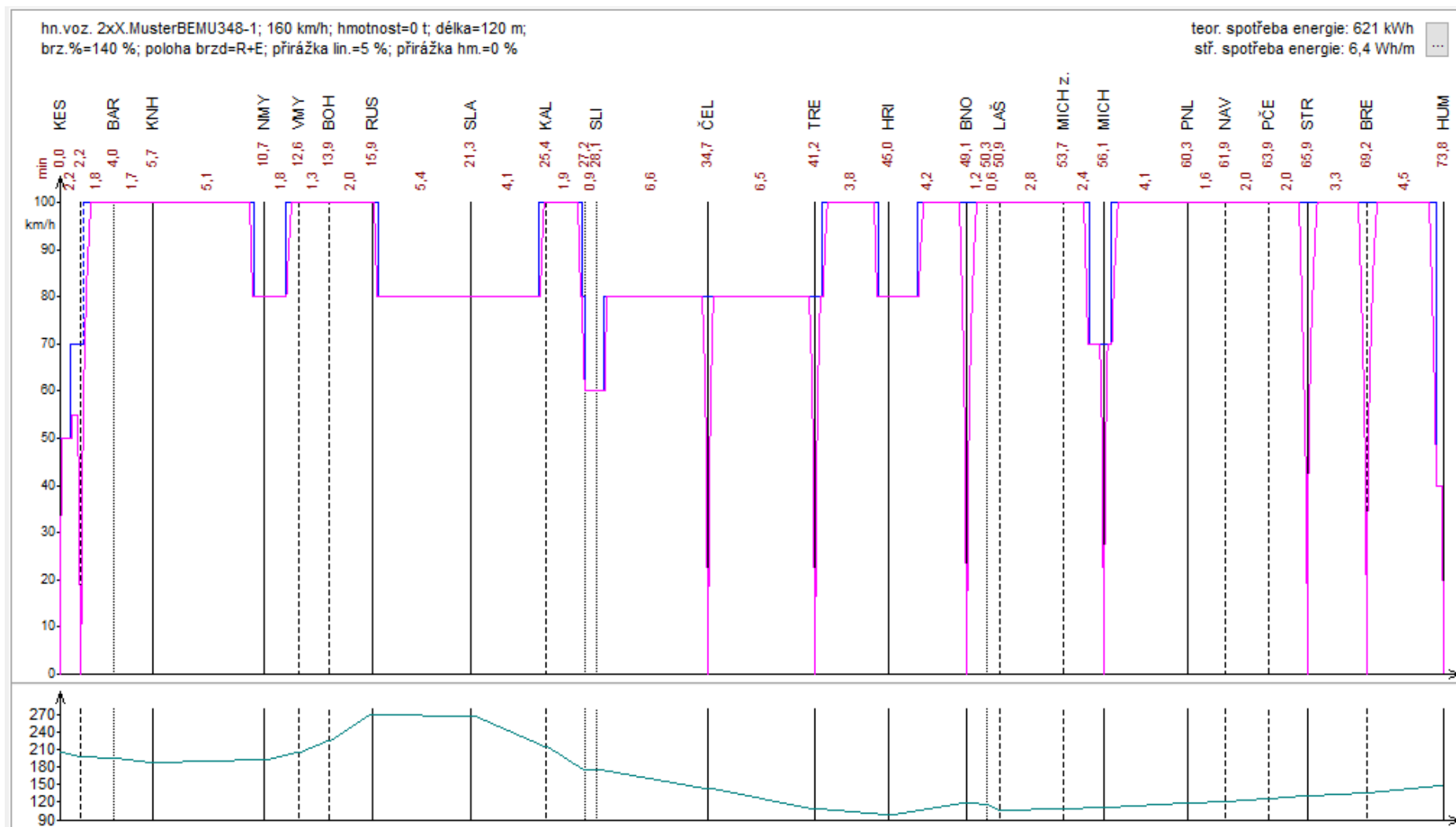
**Graf 20-** Simulácia č. A1b – stav energie na akumulátore po prestoji v Humennom v dĺžke 1 h a 48 min (limit) pri pustených pomocných pohonoch

- Legenda:
- Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke
  - Stav energie na akumulátore
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 21- Simulácia č. A1b – výkon na akumulátore

Legenda:                      • Výkon na akumulátore                      • Rýchlosť vlaku



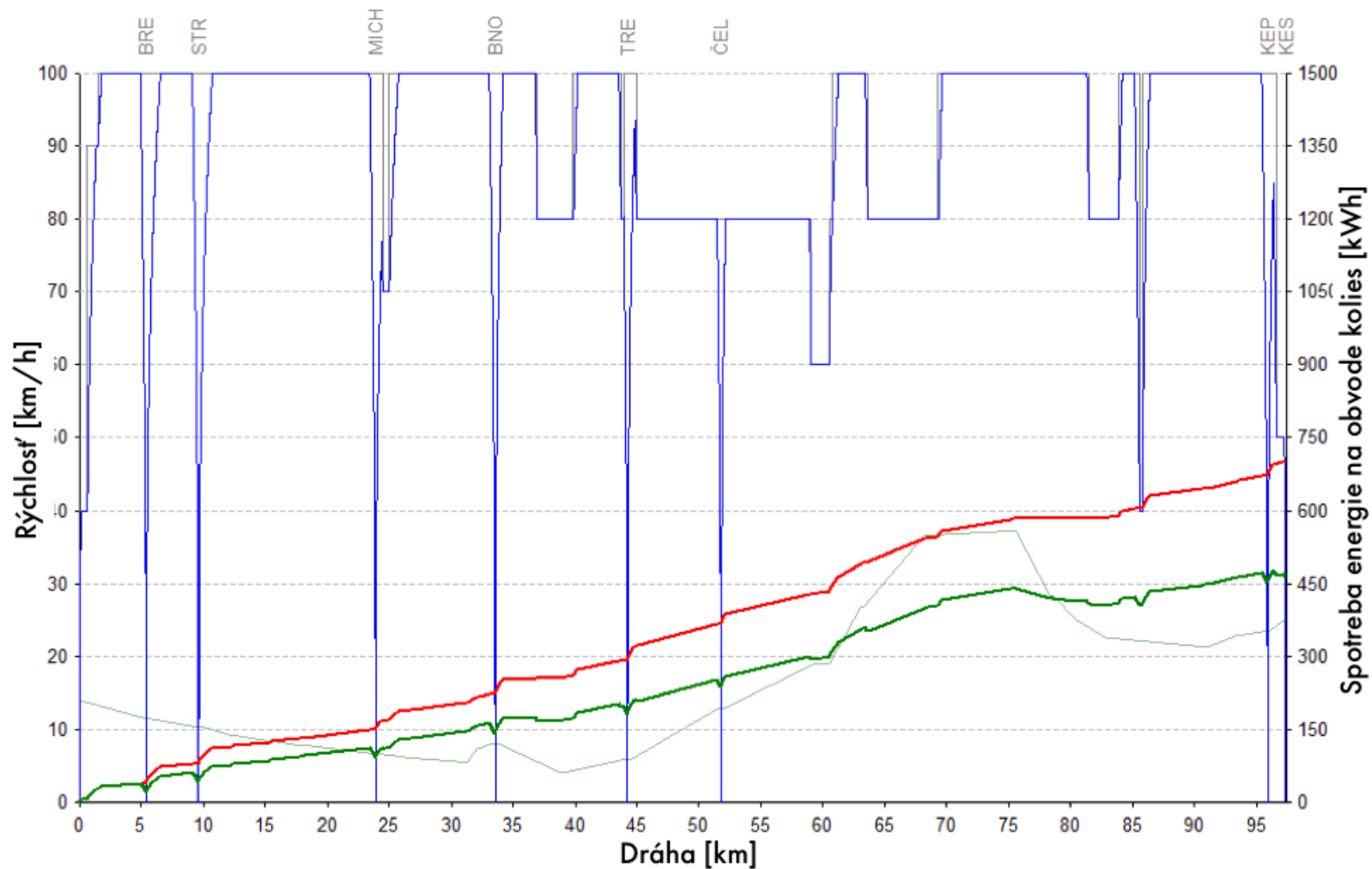
Graf 22- Simulácia č. A2a v závislosti rýchlost/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

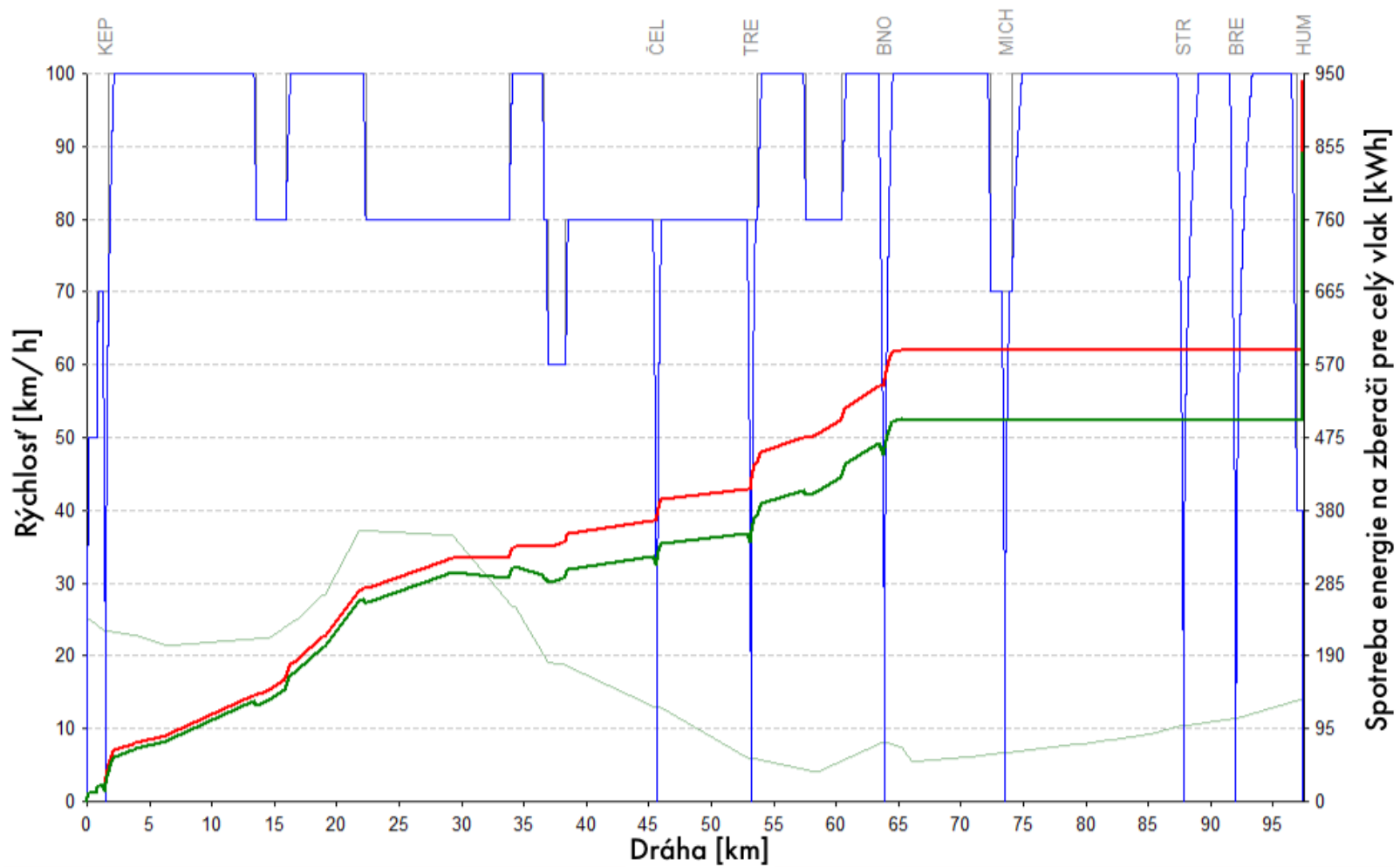
• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



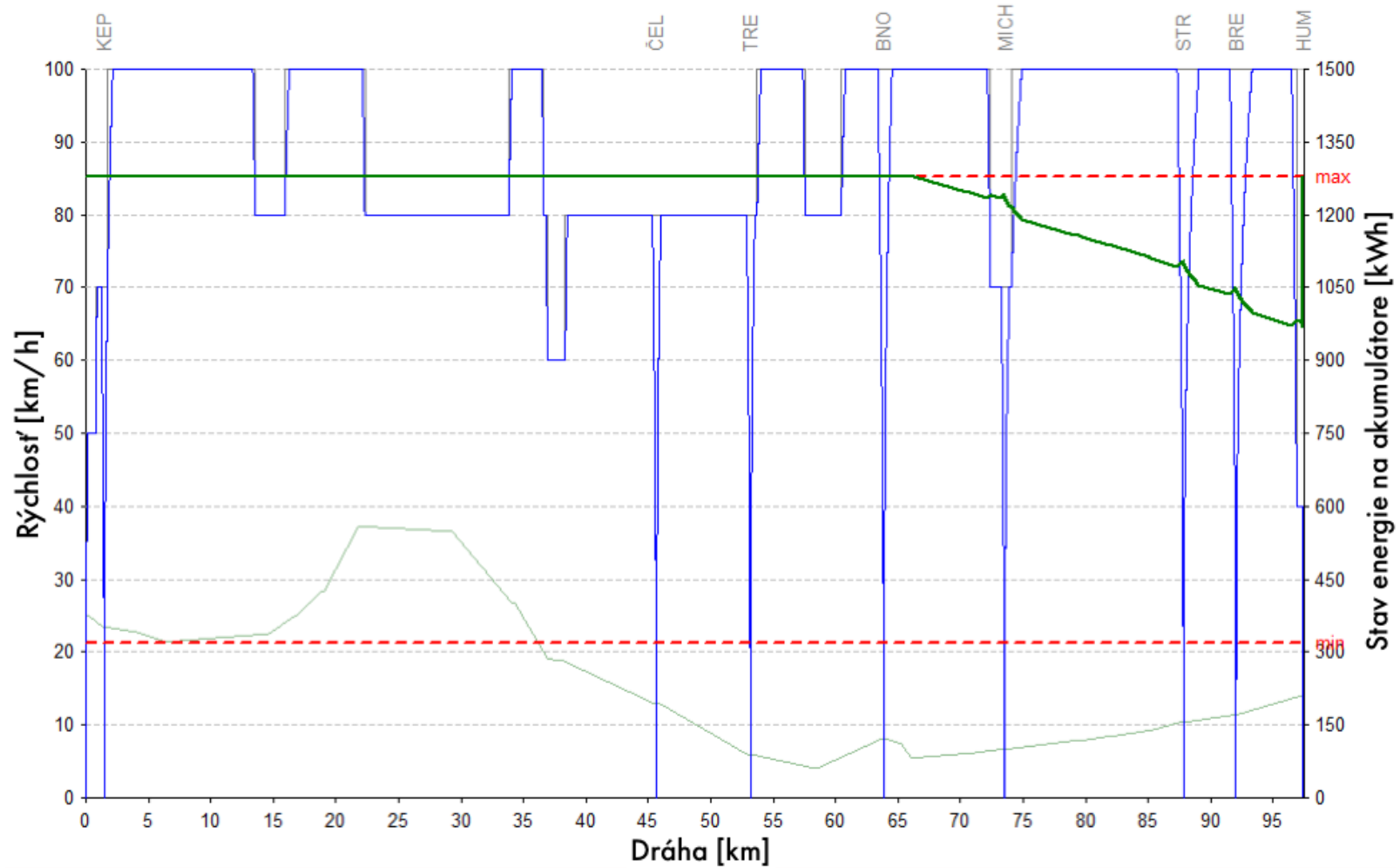
Graf 23- Simulácia č. A2a – spotreba energie na obvode kolies za obe jednotky

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



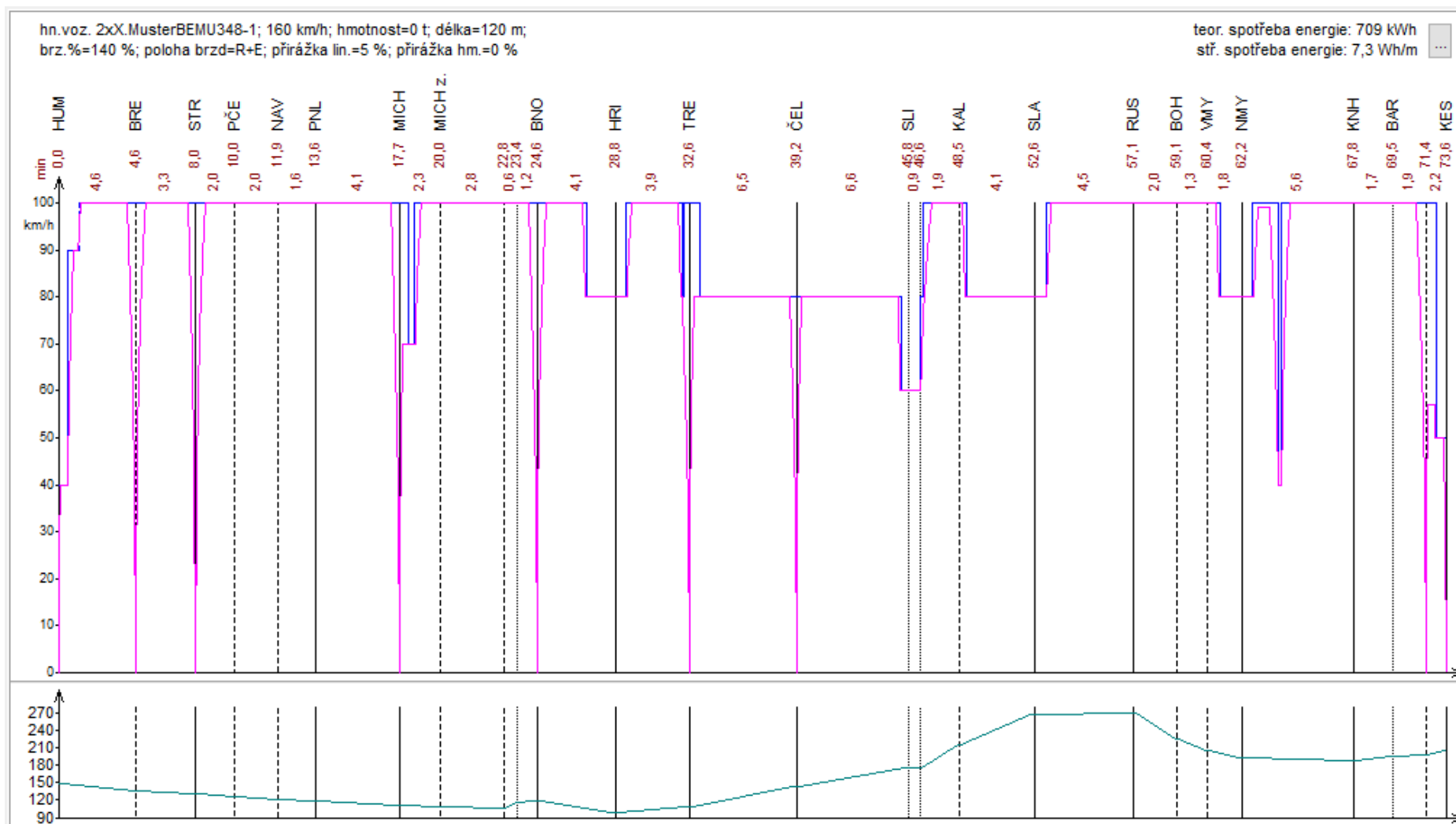
Graf 24- Simulácia č. A2a – spotreba energie na zberači za obe jednotky

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na zberači bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na zberači s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 25- Simulácia č. A2a – stav energie na akumulátoroch oboch jednotiek (súhrn)

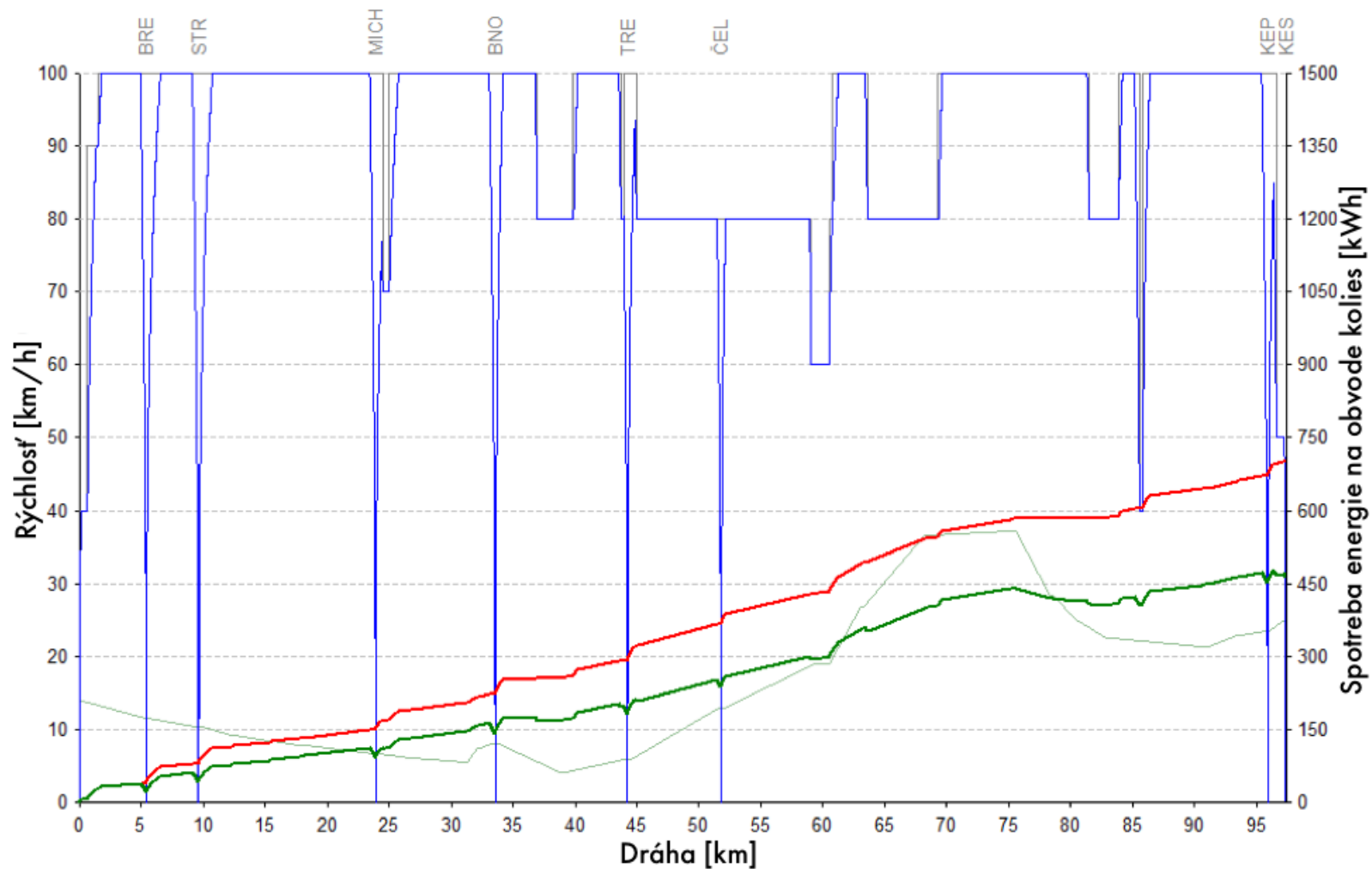
- Legenda:
- Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke
  - Stav energie na akumulátore
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 26- Simulácia č. A2b v závislosti rýchlost/dráha

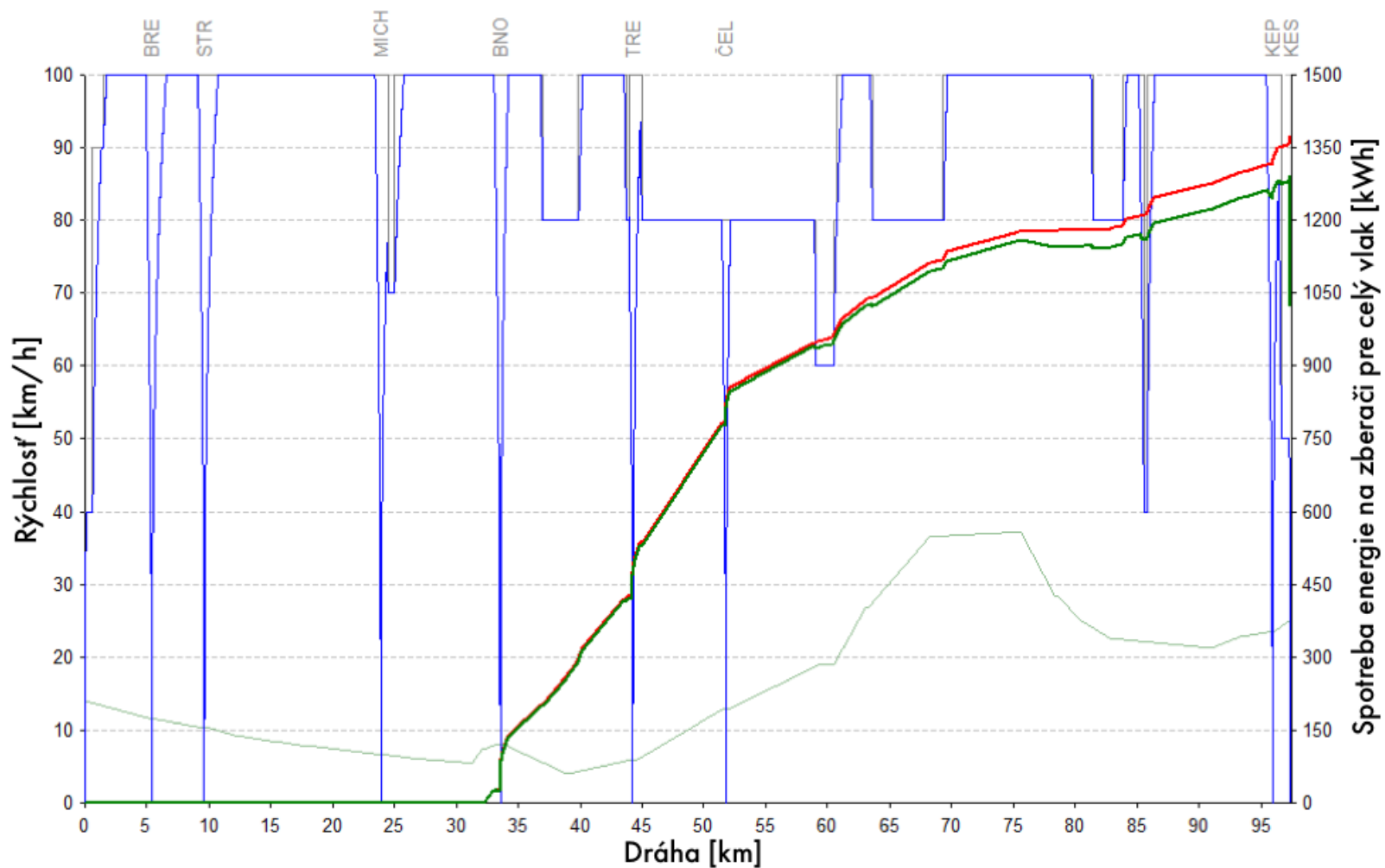
Legenda: • Pohyb vlaku (stred vlaku) • Výškový profil trate [m n.m.] • Traťová dovolená rýchlosť vlaku





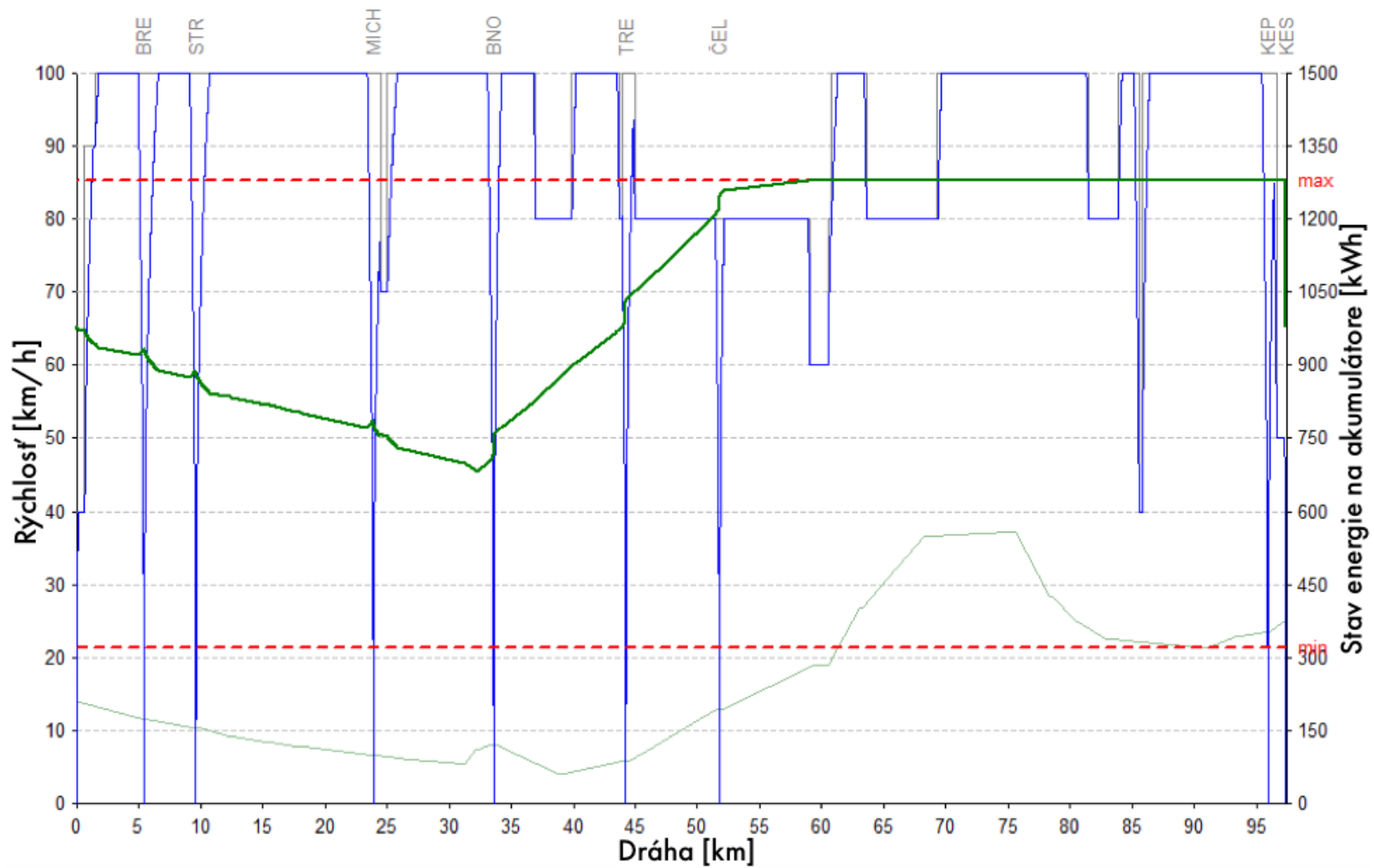
Graf 27- Simulácia č. A2b – spotreba energie na obvode kolies za obe jednotky

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



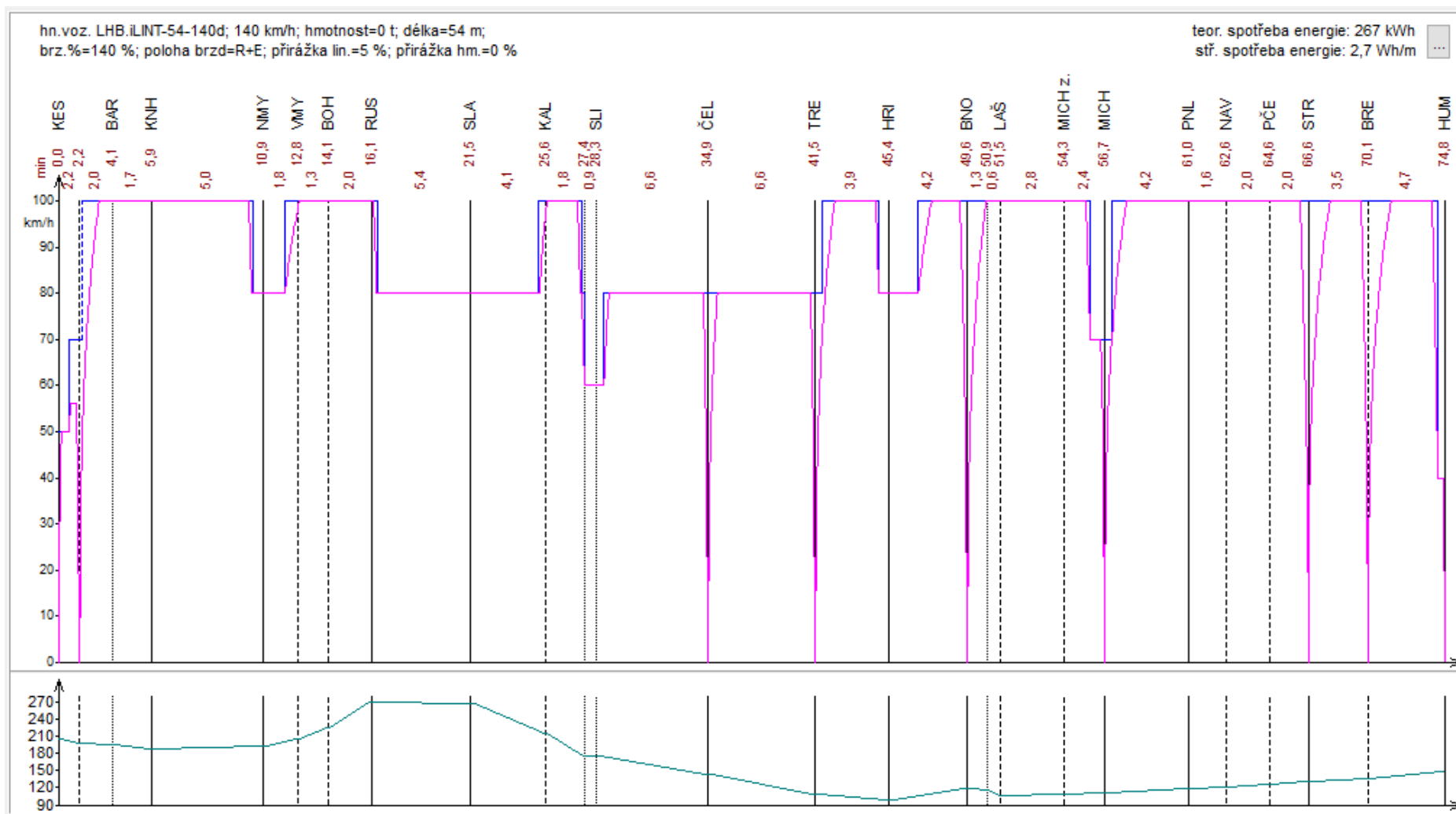
Graf 28- Simulácia č. A2b – spotreba energie na zberači za obe jednotky

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na zberači bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na zberači s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 29- Simulácia č. A2b – stav energie na akumulátoroch oboch jednotiek (súhrn)

- Legenda:
- Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke
  - Stav energie na akumulátore
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



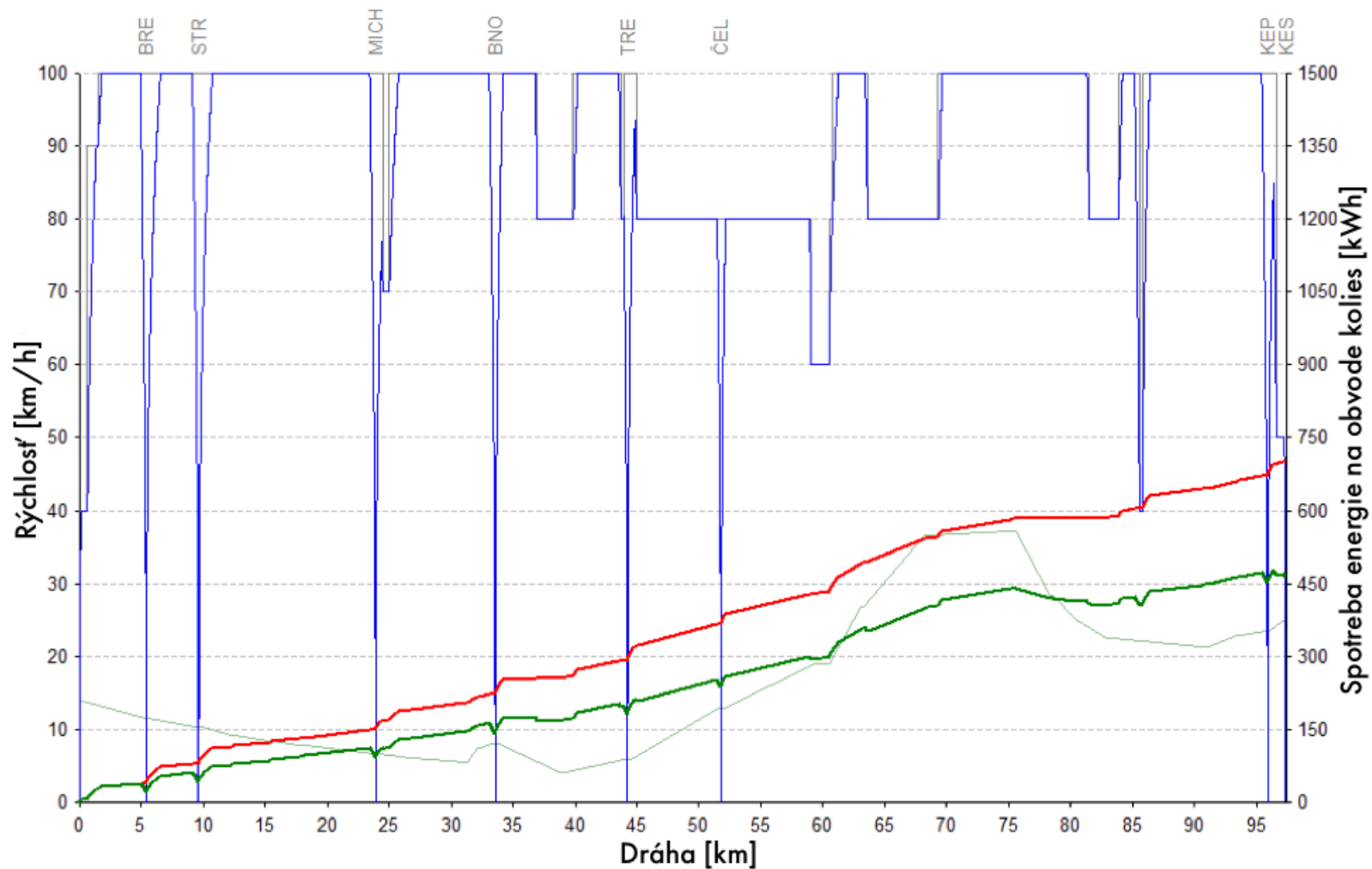
Graf 30- Simulácia č. A3a v závislosti rýchlosť/dráha

Legenda:

• Pohyb vlaku (stred vlaku)

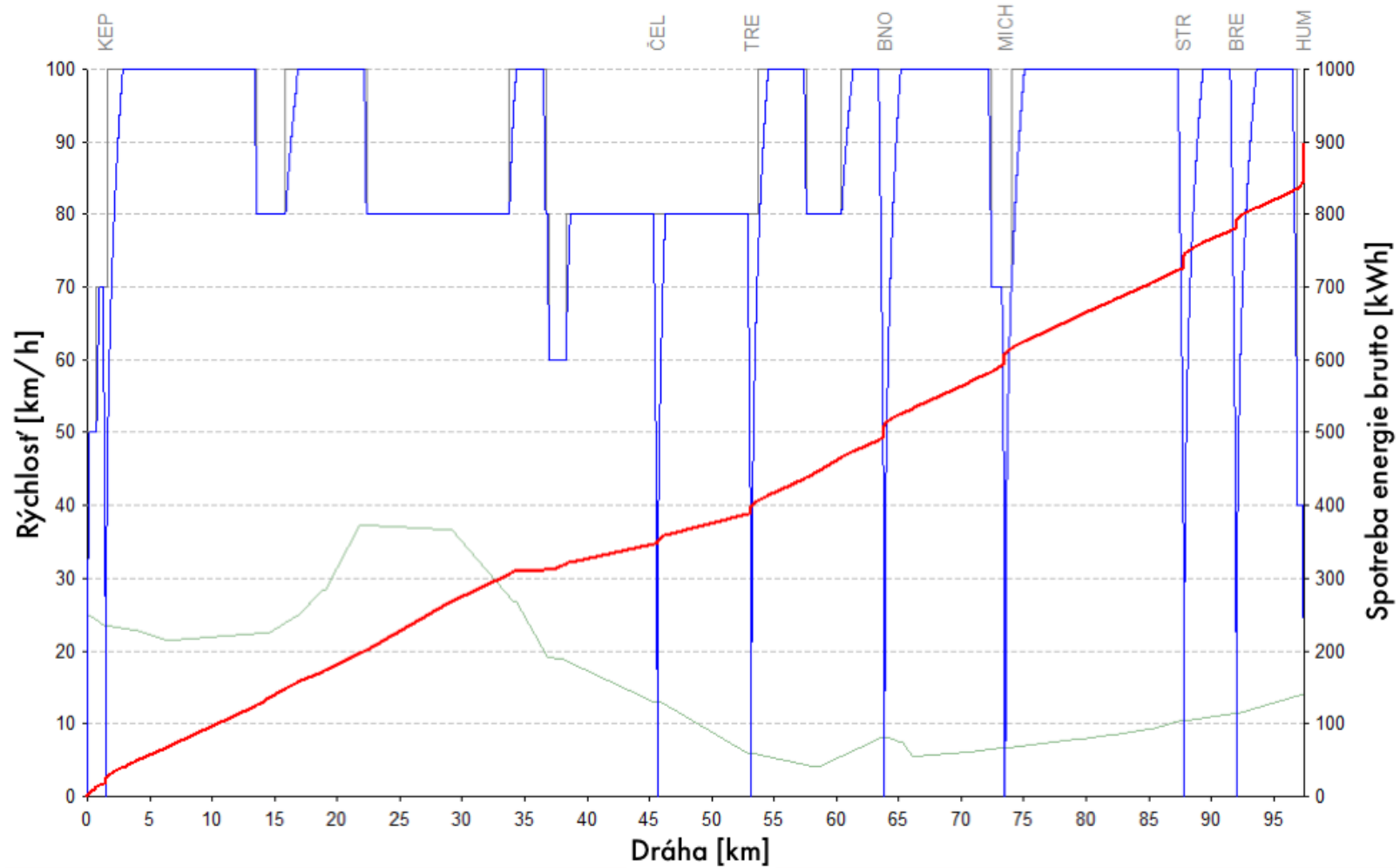
• Výškový profil trate [m n.m.]

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



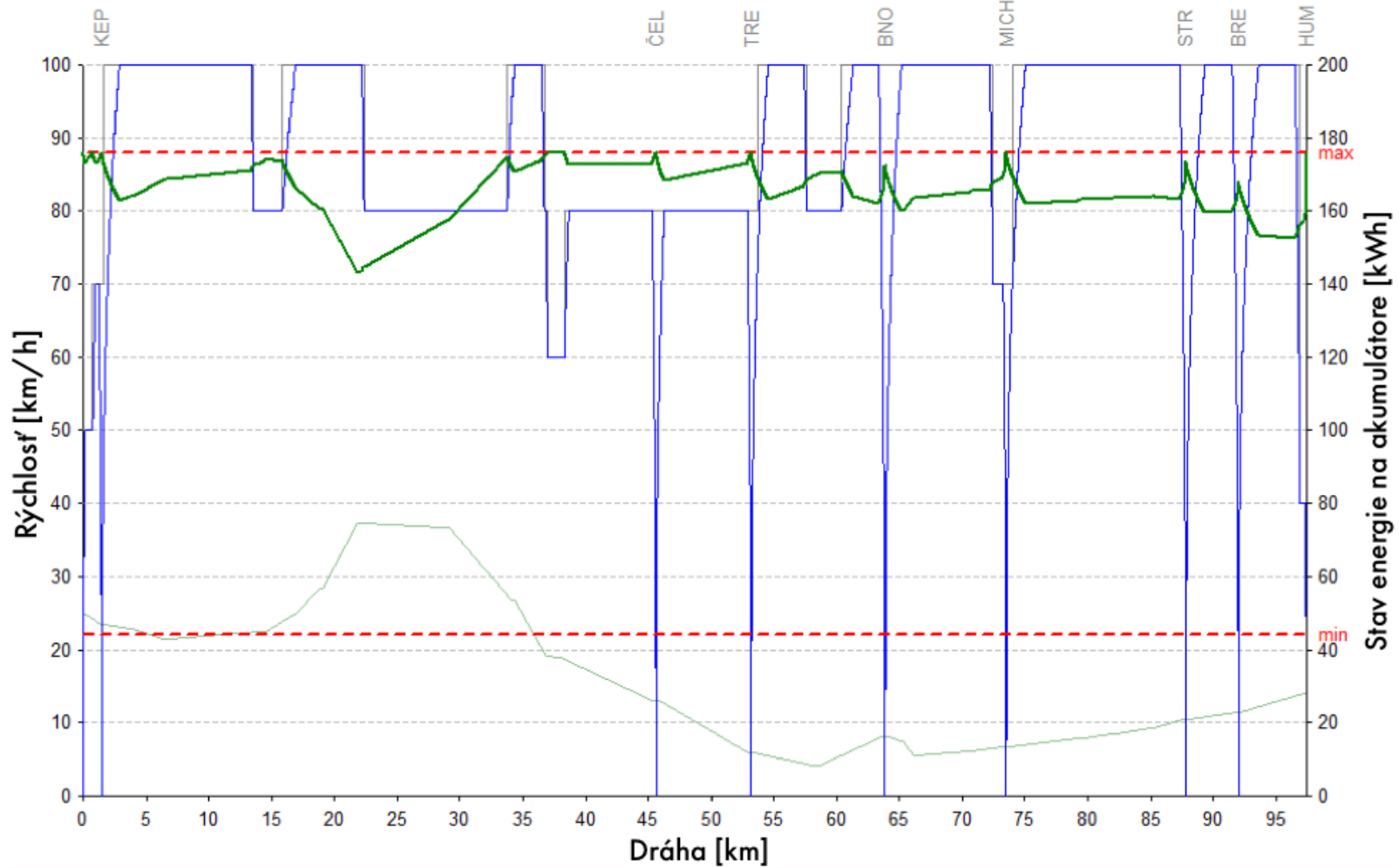
Graf 31- Simulácia č. A3a – spotreba energie na obvode kolies

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies bez rekuperácie
  - Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies s rekuperáciou
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



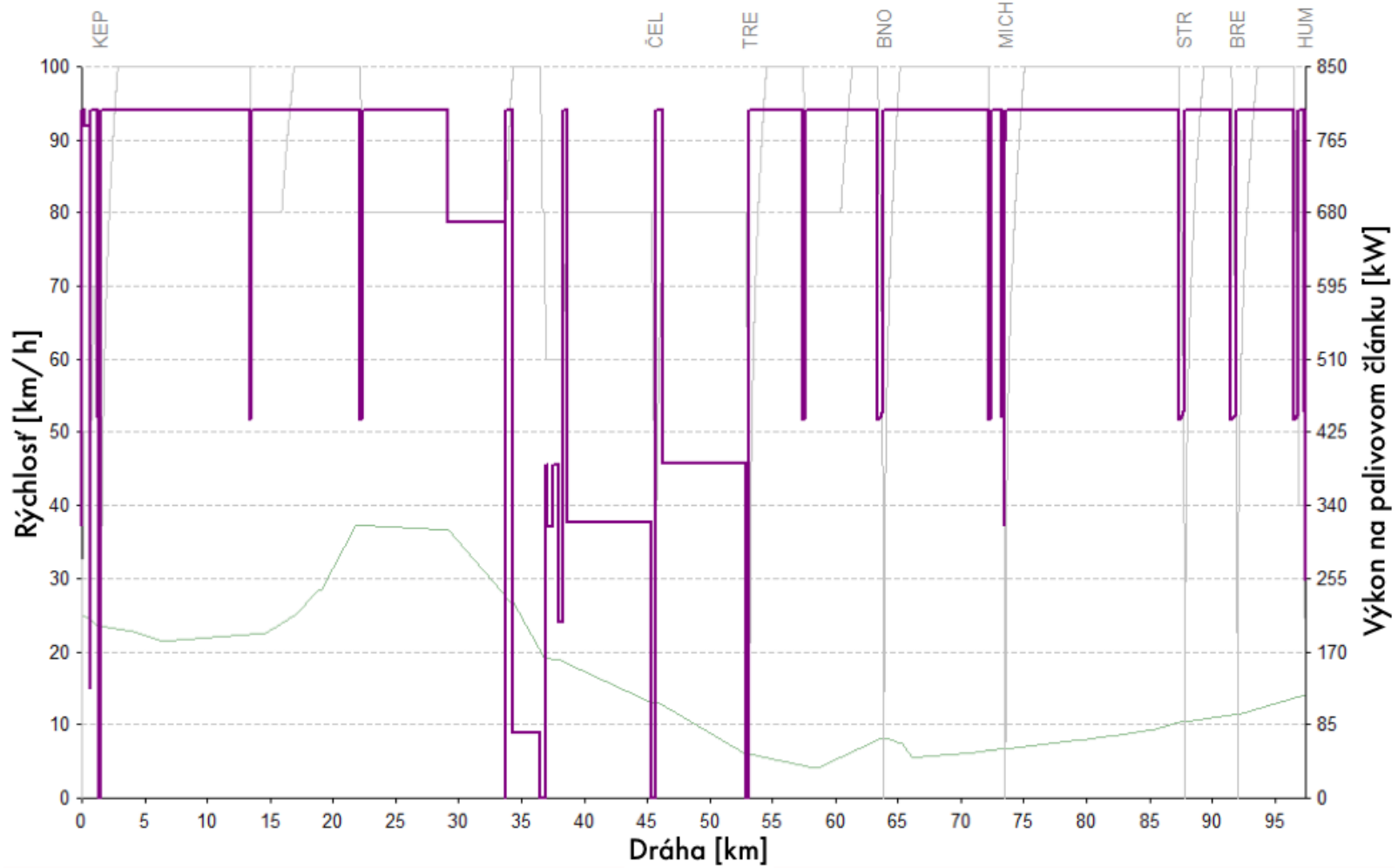
Graf 32- Simulácia č. A3a – spotreba energie brutto (na palivovom článku)

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie BRUTTO na palivovom článku
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 33- Simulácia č. A3a – stav energie na akumulátore

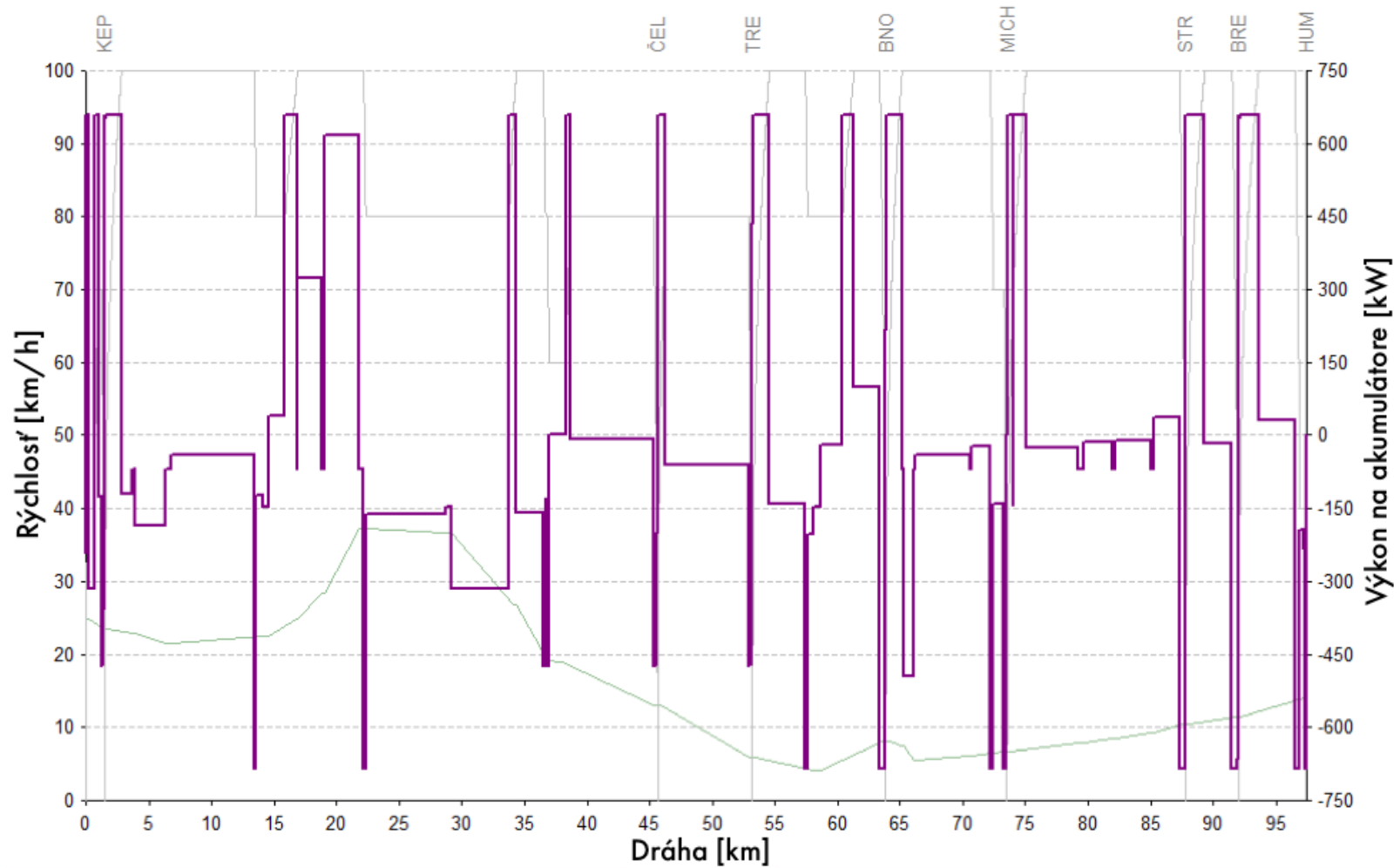
- Legenda:
- Hranice využitia kapacity akumulátoru v prevádzke
  - Stav energie na akumulátore
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 34- Simulácia č. A3a – výkon na palivovom článku

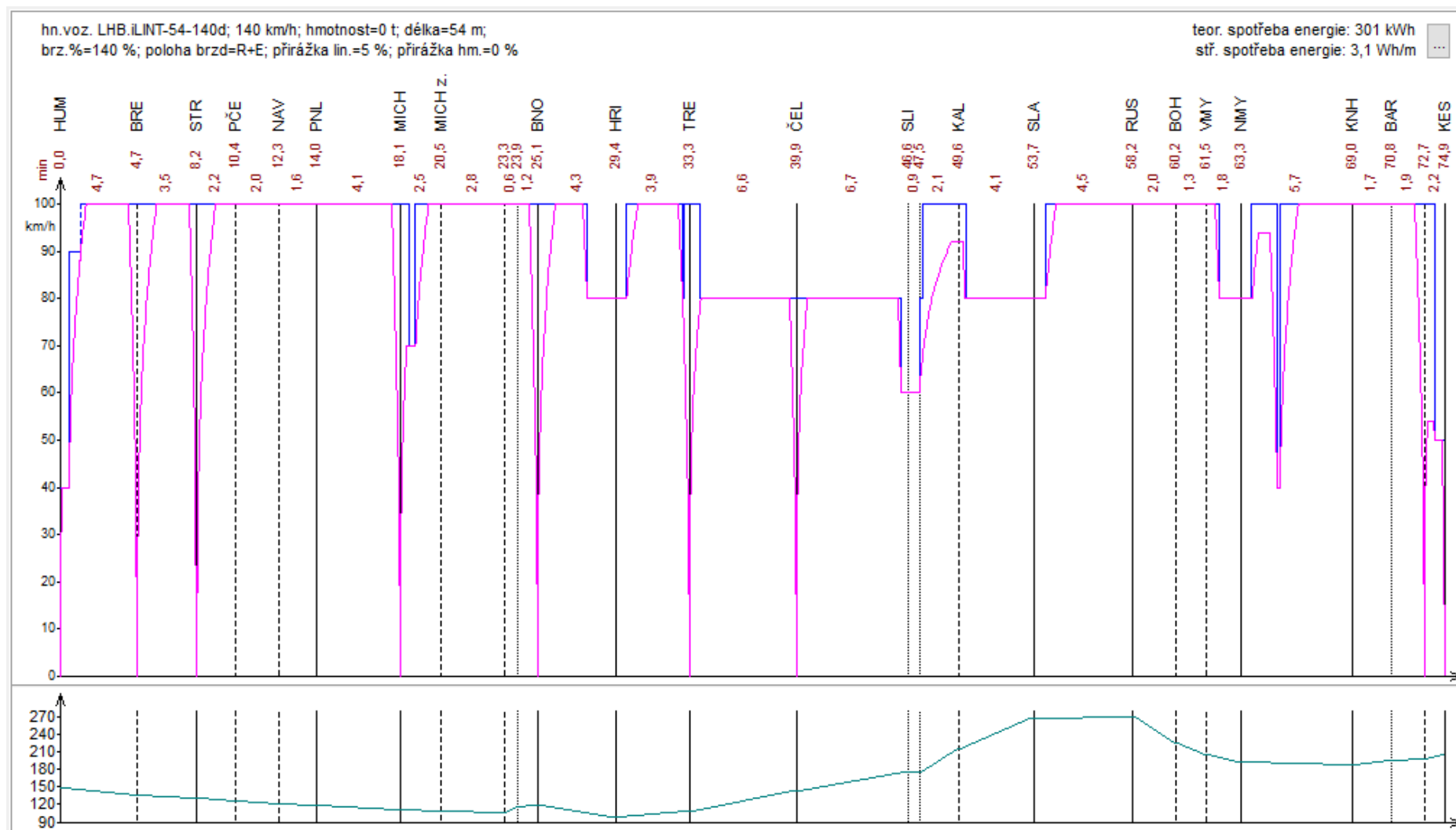
Legenda: • Výkon na palivovom článku • Rýchlosť vlaku





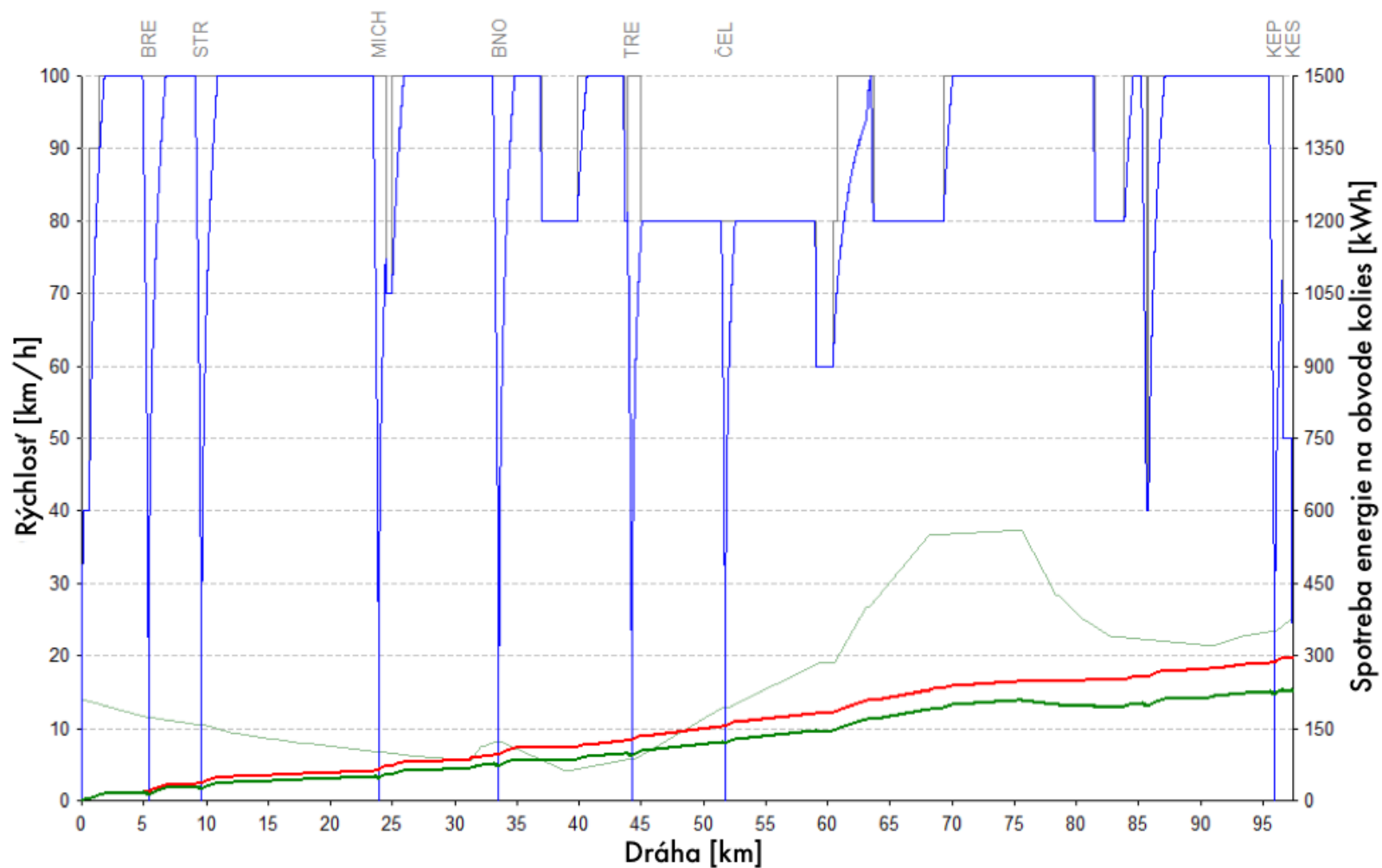
Graf 35- Simulácia č. A3a – výkon na akumulátore

Legenda: • Výkon na akumulátore • Rýchlosť vlaku



Graf 36- Simulácia č. A3b v závislosti rýchlost/dráha

Legenda: • Pohyb vlaku (stred vlaku) • Výškový profil trate [m n.m.] • Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 37- Simulácia č. A3b – spotreba energie na obvode kolies

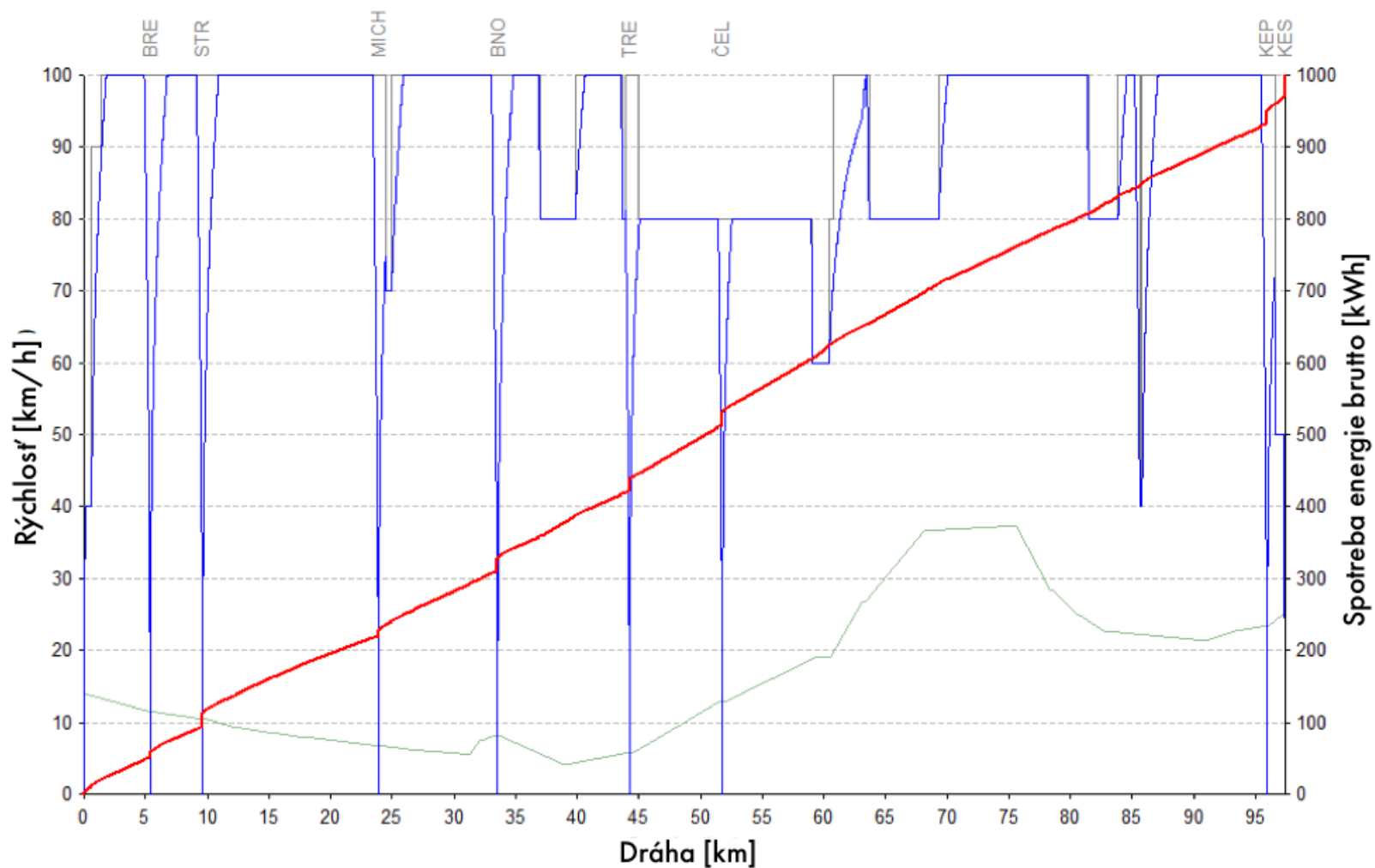
Legenda:

• Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies bez rekuperácie

• Kumulovaná spotreba energie na obvode kolies s rekuperáciou

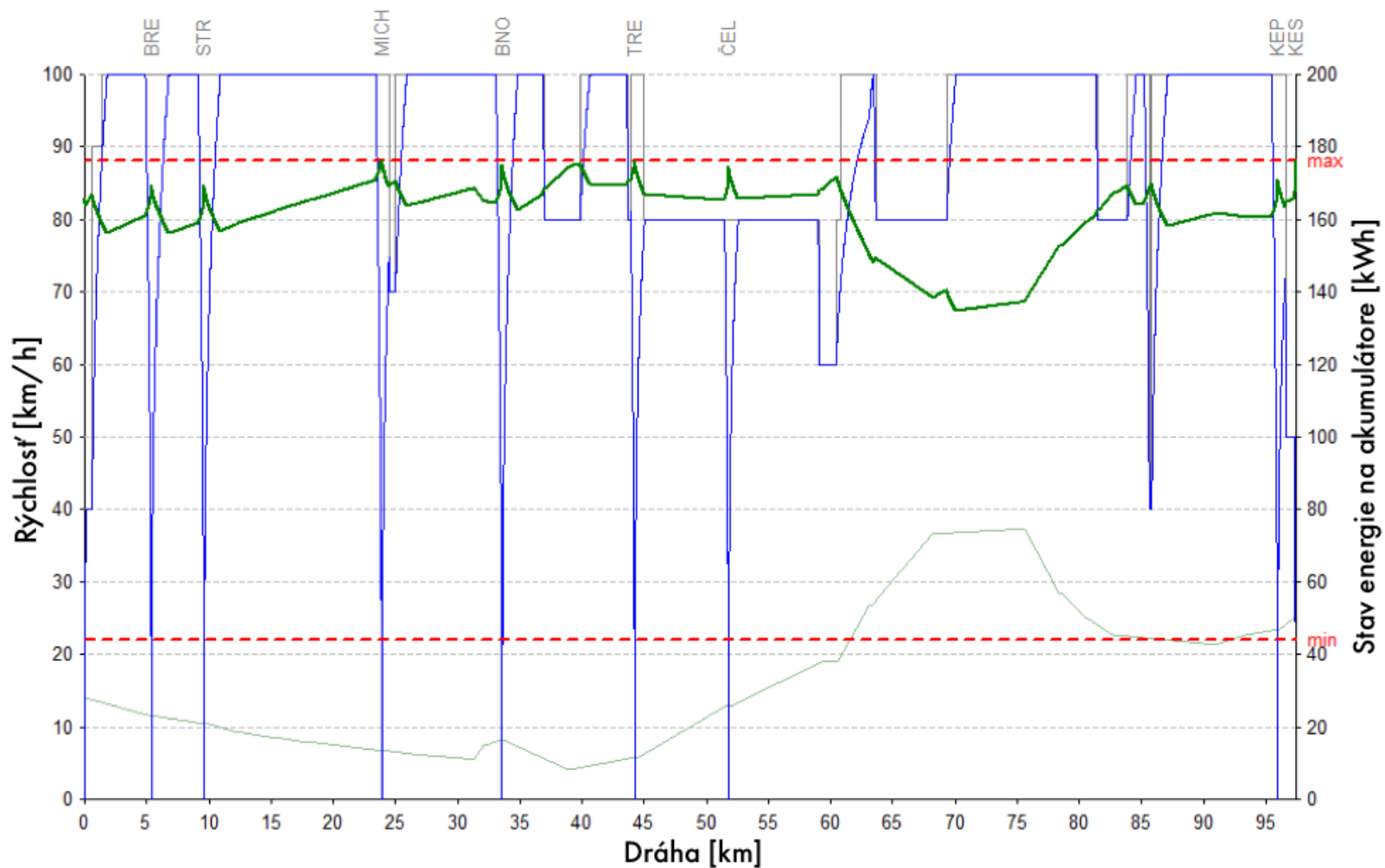
• Rýchlosť vlaku

• Traťová dovolená rýchlosť vlaku



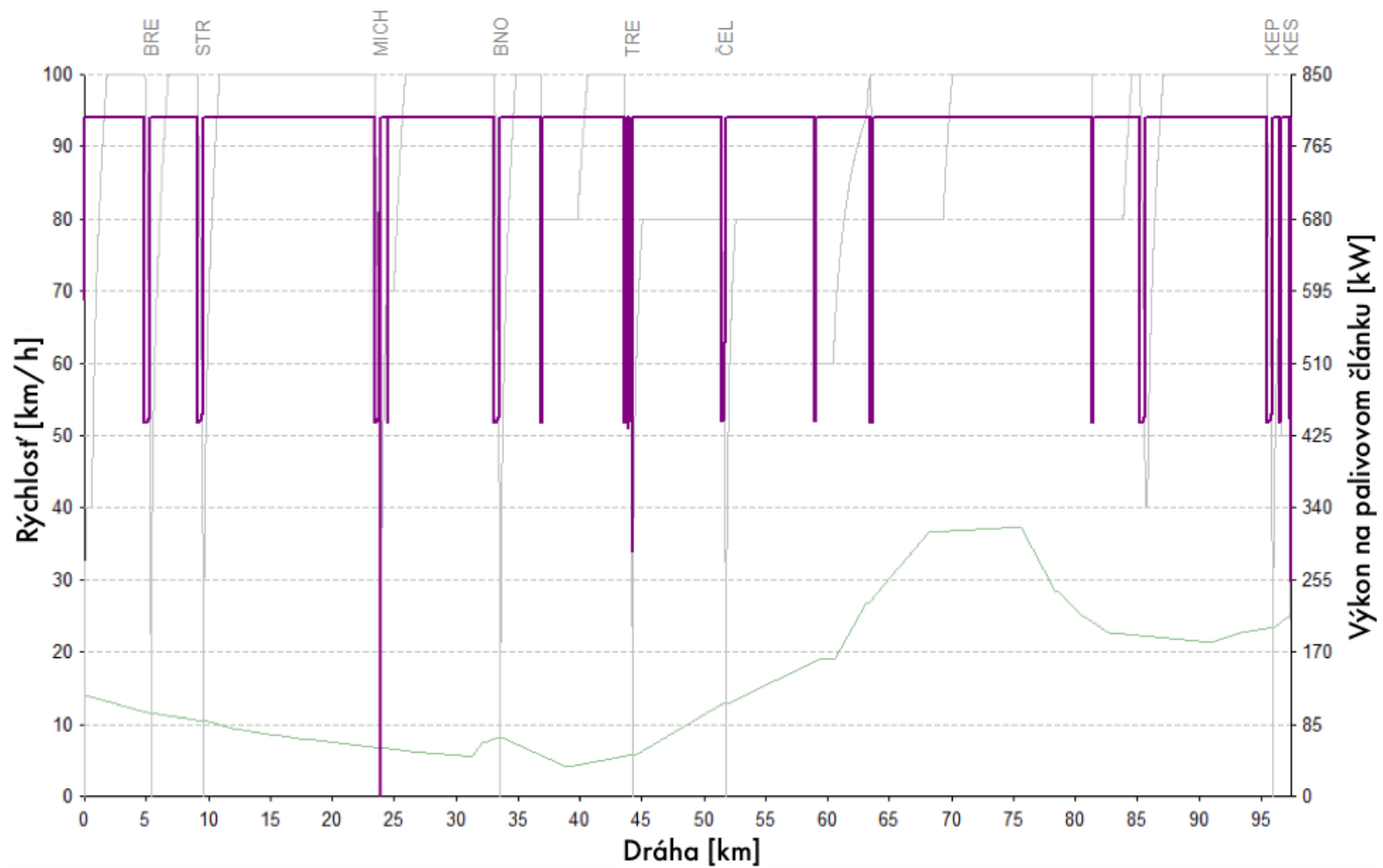
Graf 38- Simulácia č. A3b – spotreba energie brutto (na palivovom článku)

- Legenda:
- Kumulovaná spotreba energie BRUTTO na palivovom článku
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



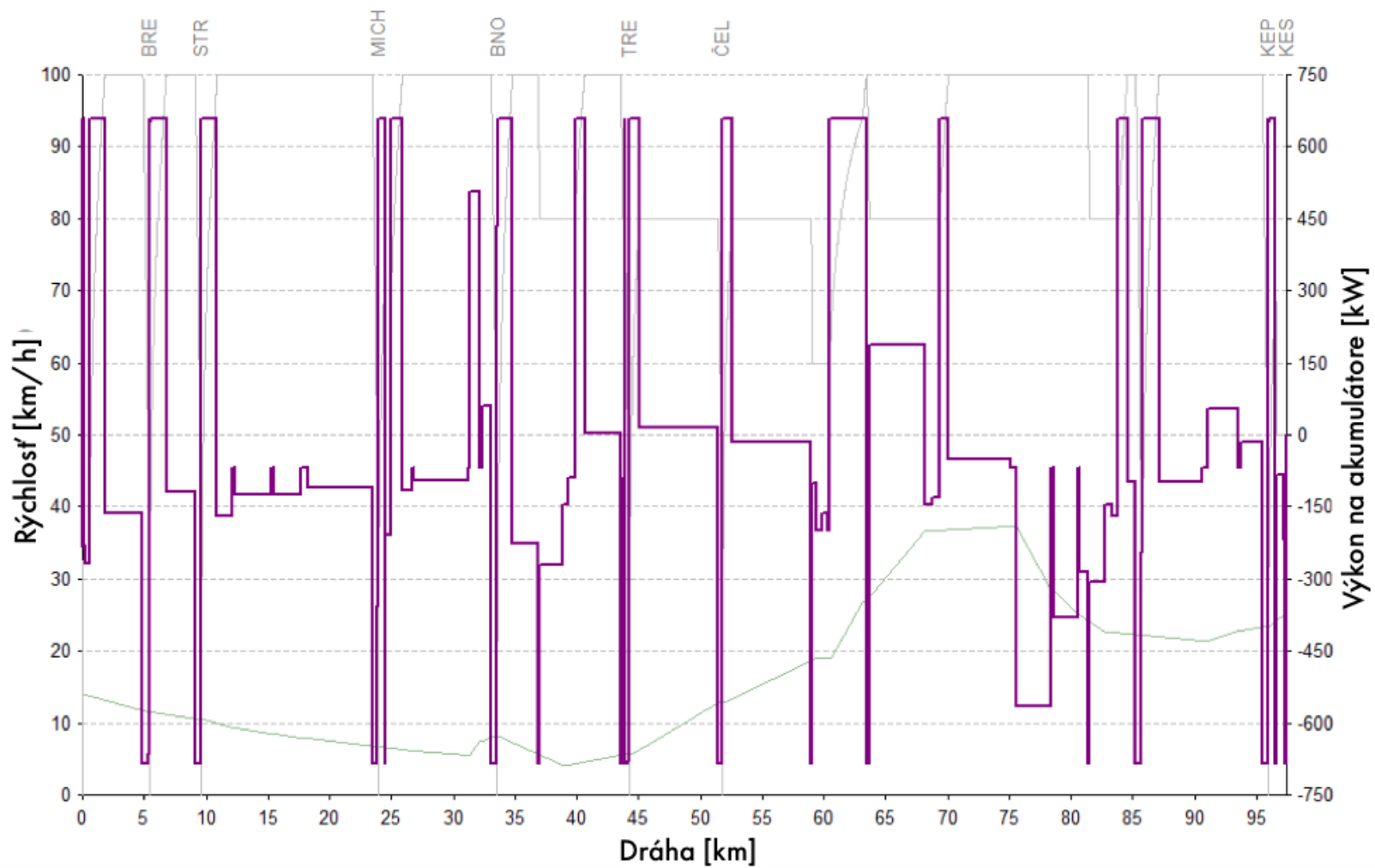
Graf 39- Simulácia č. A3b – stav energie na akumulátore

- Legenda:
- Hranice využitia kapacity akumulátora v prevádzke
  - Stav energie na akumulátore
  - Rýchlosť vlaku
  - Traťová dovolená rýchlosť vlaku



Graf 40- Simulácia č. A3b – výkon na palivovom článku

Legenda: • Výkon na palivovom článku • Rýchlosť vlaku



Graf 41- Simulácia č. A3b – výkon na akumulátore

Legenda: • Výkon na akumulátore • Rýchlosť vlaku

## 7.5 Výsledky simulácií vlakov s alternatívnym pohonom

Tabuľka 8 - Výsledky simulácií vlakov typu BEMU

Simulácia č.	A1a	A1b	A1 súhrn (obeh)	A2a	A2b	A2 súhrn (obeh)
Typ	BEMU	BEMU	<b>BEMU</b>	2x BEMU	2x BEMU	<b>2x BEMU</b>
Jazdný čas (bez pobytov) [min]	73,6	73,3	<b>146,9</b>	73,8	73,6	<b>147,4</b>
Teoretická kumulovaná spotreba energie bez rekuperácie (na obvode kolies) [kWh]	299,0	351,6	<b>650,6</b>	597,8	700,4	<b>1298,2</b>
Teoretická kumulovaná spotreba energie s rekuperáciou (na obvode kolies) [kWh]	185,2	232,7	<b>417,9</b>	370,2	464,0	<b>834,2</b>
Teoretická kumulovaná spotreba energie bez rekuperácie (na zberači) [kWh]	294,9	683,0	<b>977,9</b>	589,83	1358,4	<b>1948,23</b>
Teoretická kumulovaná spotreba energie s rekuperáciou (na zberači) [kWh]	248,7	642,2	<b>890,9</b>	497,5	1277,3	<b>1774,8</b>
Teoretická kumulovaná spotreba energie na akumulátore s rekuperáciou [kWh]	149,5	131,8	<b>281,3</b>	298,9	263,1	<b>562</b>
Percentuálne vyjadrenie spotreby energie na akumulátore z kapacity akumulátoru (100% = 80 % využiteľnej kapacity počas životnosti akumulátoru) [%]	23,4	20,6	<b>44,0</b>	23,4	20,6	<b>44,0</b>



**Tabuľka 9 - Výsledky simulácií vlakov typu HMU**

Simulácia č.	A3a	A3b	A3 súhrn (obeh)
Typ	HMU	HMU	HMU
Jazdný čas (bez pobyto) [min]	74,8	74,9	149,7
Teoretická kumulovaná spotreba energie bez rekuperácie (na obvode kolies) [kWh]	256,9	295,7	552,6
Teoretická kumulovaná spotreba energie s rekuperáciou (na obvode kolies) [kWh]	182,0	226,6	408,6
Teoretická kumulovaná spotreba energie na palivovom článku - BRUTTO [kWh]	846,5	991,8	1838,3

## **8 ZOZNAM TABULIEK**

<b>Tabuľka 1</b> - Charakteristika použitých typov súprav pre energetické výpočty konvenčných typov pohonu .....	5
<b>Tabuľka 2</b> - Charakteristika použitých typov súprav pre energetické výpočty alternatívnych typov pohonu .....	6
<b>Tabuľka 3</b> - Základná výkonnostná charakteristika použitého fiktívneho vozidla typu BEMU .....	6
<b>Tabuľka 4</b> - Zoznam skratiek dopravní použitých v programe FBS .....	8
<b>Tabuľka 5</b> - Zoznam simulácií dynamiky jazdy konvenčných vlakov .....	9
<b>Tabuľka 6</b> - Výsledky simulácií vlakov s konvenčným pohonom .....	20
<b>Tabuľka 7</b> - Zoznam simulácií dynamiky jazdy a energetickej spotreby vozidiel s alternatívnym pohonom .....	24
<b>Tabuľka 8</b> - Výsledky simulácií vlakov typu BEMU .....	56
<b>Tabuľka 9</b> - Výsledky simulácií vlakov typu HMU .....	57

## **9 ZOZNAM OBRÁZKOV**

<b>Obrázok 1</b> - Nastavenie parametrov adhézie a odporov (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie) .....	21
<b>Obrázok 2</b> - Nastavenia účinnosti elektrických častí a iných parametrov vozidla BEMU (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie) .....	22
<b>Obrázok 3</b> - Nastavenia účinnosti elektrických častí a iných parametrov vozidla HMU (zdroj: program FBS, vlastné spracovanie) .....	23

## 10 ZOZNAM GRAFOV

<b>Graf 1</b> - Simulácia č. 1a v závislosti rýchlosť/dráha .....	10
<b>Graf 2</b> - Simulácia č. 1b v závislosti rýchlosť/dráha .....	11
<b>Graf 3</b> - Simulácia č. 2a v závislosti rýchlosť/dráha .....	12
<b>Graf 4</b> - Simulácia č. 2b v závislosti rýchlosť/dráha.....	13
<b>Graf 5</b> - Simulácia č. 3a v závislosti rýchlosť/dráha .....	14
<b>Graf 6</b> - Simulácia č. 3b v závislosti rýchlosť/dráha.....	15
<b>Graf 7</b> - Simulácia č. 4a v závislosti rýchlosť/dráha .....	16
<b>Graf 8</b> - Simulácia č. 4b v závislosti rýchlosť/dráha.....	17
<b>Graf 9</b> - Simulácia č. 5a v závislosti rýchlosť/dráha .....	18
<b>Graf 10</b> - Simulácia č. 5b v závislosti rýchlosť/dráha .....	19
<b>Graf 11</b> - Simulácia č. A1a v závislosti rýchlosť/dráha .....	25
<b>Graf 12</b> - Simulácia č. A1a – spotreba energie na obvode kolies.....	26
<b>Graf 13</b> - Simulácia č. A1a – spotreba energie na zberači.....	27
<b>Graf 14</b> - Simulácia č. A1a – stav energie na akumulátore.....	28
<b>Graf 15</b> - Simulácia č. A1a – výkon na akumulátore .....	29
<b>Graf 16</b> - Simulácia č. A1b v závislosti rýchlosť/dráha.....	30
<b>Graf 17</b> - Simulácia č. A1b – spotreba energie na obvode kolies .....	31
<b>Graf 18</b> - Simulácia č. A1b – spotreba energie na zberači.....	32
<b>Graf 19</b> - Simulácia č. A1b – stav energie na akumulátore .....	33
<b>Graf 20</b> - Simulácia č. A1b – stav energie na akumulátore po prestoji v Humennom v dĺžke 1 h a 48 min (limit) pri pustených pomocných pohonoch.....	34
<b>Graf 21</b> - Simulácia č. A1b – výkon na akumulátore.....	35
<b>Graf 22</b> - Simulácia č. A2a v závislosti rýchlosť/dráha .....	36
<b>Graf 23</b> - Simulácia č. A2a – spotreba energie na obvode kolies za obe jednotky .....	37
<b>Graf 24</b> - Simulácia č. A2a – spotreba energie na zberači za obe jednotky.....	38
<b>Graf 25</b> - Simulácia č. A2a – stav energie na akumulátoroch oboch jednotiek (súhrn)....	39

<b>Graf 26-</b> Simulácia č. A2b v závislosti rýchlosť/dráha.....	40
<b>Graf 27-</b> Simulácia č. A2b – spotreba energie na obvode kolies za obe jednotky .....	41
<b>Graf 28-</b> Simulácia č. A2b – spotreba energie na zberači za obe jednotky .....	42
<b>Graf 29-</b> Simulácia č. A2b – stav energie na akumulátoroch oboch jednotiek (súhrn)....	43
<b>Graf 30-</b> Simulácia č. A3a v závislosti rýchlosť/dráha .....	44
<b>Graf 31-</b> Simulácia č. A3a – spotreba energie na obvode kolies.....	45
<b>Graf 32-</b> Simulácia č. A3a – spotreba energie brutto (na palivovom článku).....	46
<b>Graf 33-</b> Simulácia č. A3a – stav energie na akumulátore.....	47
<b>Graf 34-</b> Simulácia č. A3a – výkon na palivovom článku.....	48
<b>Graf 35-</b> Simulácia č. A3a – výkon na akumulátore .....	49
<b>Graf 36-</b> Simulácia č. A3b v závislosti rýchlosť/dráha.....	50
<b>Graf 37-</b> Simulácia č. A3b – spotreba energie na obvode kolies .....	51
<b>Graf 38-</b> Simulácia č. A3b – spotreba energie brutto (na palivovom článku) .....	52
<b>Graf 39-</b> Simulácia č. A3b – stav energie na akumulátore .....	53
<b>Graf 40-</b> Simulácia č. A3b – výkon na palivovom článku .....	54
<b>Graf 41-</b> Simulácia č. A3b – výkon na akumulátore.....	55