

Konečný návrh vibroizolace v železničních tunelech na trati Dejvice – Veleslavín pro dodržení limitů FÚ AVČR na Ořechovce

Zadavatel : **Metroprojekt, a.s.**
Náměstí I.P.Pavlova 1786
120 00 Praha 2

Vypracoval: **Ing. Jan Stěnička, CSc.**
Kozí 9
110 00 Praha 1
tel.: 603438065

Obsah:

1. Úvod – požadavky zadavatele
2. Výsledky modelového měření vibrací
3. Umístění tunelů versus geologické podloží
4. Určení skutečných velikosti vibrací
5. Požadavky vložného útlumu na vibroizolace pro dosažení požadavků zadavatele
6. Ideový návrh řešení vibroizolace
7. Závěr – tabulka
8. Seznam literatury

Přílohy:

1. Poloha tunelů „stará trasa“ a „nová trasa“, poloha vrtů, versus FÚ AVČR
2. Detail polohy blízkého tunelu „nové trasy“ vůči budovám A a F, FÚ AVČR
3. Pevná jízdní dráha, železniční svršek s uložením Vossloh W14, se změnou vibroizolace
4. Detail uložení Vossloh W14 používaného v obou antivibračních opatřeních
5. Pohyblivý železniční svršek – antivibrační opatření ve štěrku se změnou vibroizolace
6. Řez situací budov, tunelů „nové trasy“ a vrtů u FÚ AVČR
7. Geologie podloží s budovami FÚ AVČR a železničními tunely v „nové trase“
8. Geotech. charakteristiky zemin a skalního podloží v oblasti FÚ AVČR a žel. tunelů
9. Technické podmínky pro zadání projektu železničního tunelu v úseku Praha Dejvice – Praha Veleslavín /požadavky FÚ AVČR/
10. Stěnička J.: Komentář k uvedeným požadavkům FÚ AVČR 17.2.2017
11. Poloha tunelů „nová trasa“ a „výsledná trasa“, situace
12. Poloha tunelů „nová trasa“ a „výsledná trasa“, řez
13. Budova A, poloha měřících bodů
14. Budova F, poloha měřících bodů
15. Posouzení a návrh vibroizolace pro PJD

1. Úvod – požadavky zadavatele

Požadavky na velikost vibrací byly stanoveny ředitelem AV-ČR, viz lit.1 a příloha 9:

- ve frekvenčním pásmu 1– 20 Hz menší než 10^{-7} m /výchylka/
- ve frekvenčním pásmu 20 – 100 Hz menší než 10^{-5} m/s /rychlost/

Tyto požadavky, viz lit.1, jsou atypické a nemají souvislost s požadavky hygienickými, viz příloha 10. V současné době dochází k překročení těchto hodnot o cca 100 % v důsledku provozu dopravy v blízkém i vzdáleném okolí areálu FÚ AV-ČR, viz měření Ing.Mertlem, lit.13.

Požadavky zadavatele byly fixovány na podlahu dvou laboratoří v budově A (nejnižší podlaží), viz příloha č. 12 a 13:

- 1) severozápadní rohová místnost SN3 /pod stolem/, viz lit.3
- 2) jihovýchodní rohová místnost SN1 /v prohlubni pod stolem/, viz lit.3

Kromě těchto míst byly zadavatelem určeny další místa:

- 1) laboratoř A1,2/Z SN4, viz lit.3 v budově A
- 2) dvě místnosti /sklad a depozitář/, měřicí místa SN5 a SN6 v budově F, ve kterých nebyly stanoveny limity

Zadáním bylo posouzení velikosti vibrací před a po vibroizolaci v tunelech.

Na základě postupu prací byl první posudek, viz lit.8, přepracován ve smyslu objednávky z hlediska dvou aspektů:

- 1) velikost a míra překročení bude vyjádřena v absolutních hodnotách, tj. v metrech pro výchylku /do 20 Hz/, rychlost v m/s pro frekvenční rozsah 20 – 200 Hz, nikoliv v dB, nebo v %-ech, jak tomu bylo doposud.
- 2) byly získány přesnější podklady pro určení velikosti vibrací, generované průjezdem vlakových souprav v tunelech, viz lit.10.

Použité veličiny:

f_0 /Hz/- frekvenční oktávová pásma

D1 - překročení limitu, pro frekvence 1 – 20 Hz

D2 – překročení limitu, pro frekvence 20 – 250 Hz

Jistota dodržení limitu v %

Y /m/ - výchylka vibrací

v /m/s/ - rychlost vibrací

Chyby a nejistoty:

Chyba výpočtu představuje směrodatnou odchylku vypočtené velikosti výchylky vibrací, bez vibroizolace pro frekvence 1 – 20 Hz v m

Chyba výpočtu představuje směrodatnou odchylku vypočtené velikosti rychlosti vibrací, bez vibroizolace pro frekvence 20 – 200 Hz v m/s

Nejistota kontrolního měření představuje velikosti výchylky pro frekvence 1 – 20 Hz s vibroizolací v m

Nejistota kontrolního měření představuje velikosti rychlosti vibrací pro frekvence 20 – 200 Hz s vibroizolací v m/s

Přehledná tabulka výsledků a nutných vibroizolací pro dodržení požadovaných limitů je uvedena v závěru v kap. 8. Jde o tabulku č. 8.

2. Výsledky měření šíření vibrací

Pro účely stanovení šíření vibrací horninovým prostředím od provozovaného tunelu k Fyzikálnímu ústavu Akademie věd bylo provedeno měření dynamických účinků ve vrtu. Měření bylo sestaveno z následujících prvků:

- 2 vrty o hloubce 60m (vrt HPJ4) a 10m (vrt J4a)
- Snímače rychlosti kmitání umístěné ve vrtu HPJ4 ve dvou hloubkách 25,7m a 30,4 m
- Zdroj vibrací - Střední penetrační souprava s beranem o hmotnosti 30 kg, který padá volným pádem z výšky 50 cm na úderníkovou hlavu a energie úderu se přes soutyčí přenáší na dno vrtu

Ačkoliv se nepodařilo získat časový průběh tohoto impaktního rázu a tím i jeho spektra, tak bylo nutné vycházet z naměřených velikostí vibrací v originálním hlubinném vrtu a to ve dvou úrovních

Jako odezvu na tento umělý zdroj vibrací byly zjištěny odezvy v budově F, ve vzdálenější budově A již nebylo možné odezvu na tento signál rozeznat v „šumu“ pozadí.

Místa zdrojového vrtu a vedlejšího vrtu se snímači ve dvou hloubkách byly označeny jako referenční místa pro určení celkového přenosu od budoucího železničního tunelu až po vzdálenější laboratorní místa v budově A.

Podrobně viz lit. 3.

3. Umístění tunelů versus geologické podloží

V průběhu zpracování posouzení byly uvažovány celkem 3 varianty trasy:

- „**Stará trasa**“, trasa dle TES z 04/2016 - překročení požadovaného limitu bylo řádově neřešitelné, vzhledem k tomu nebyla tato varianta dále sledována a trasa byla odsunuta severním směrem.
- „**Nová trasa**“, trasa dle varianty č. 4 – trasa umístěna v místě předpokládaného tektonického zlomu
- „**Výsledná trasa**“, trasa dle varianty č. 5 – trasa umístěná severně za tektonický zlom

Pozdější výpočty přenosu vibrací geologickým podložím ukázaly, že po přesunutí tunelů do pozice na sever se stala situace řešitelnou. Dále je rozhodujícím aspektem tektonický zlom zjištěný na základě geotechnického průzkumu, na jehož základě byla původně sledována „nová trasa“ modifikována do „výsledné trasy“ (která umísťuje obě dvě tunelové trouby za zmíněný tektonický zlom).

Podrobná znalost geologického podloží, včetně podrobné tabulky s charakteristiky zemin a skalního položí, viz příloha 8, umožnily aplikovat výpočetní programy, viz lit.2 a 14.

Situace tras je znázorněna v přílohách č. 1 a 11.

4. Určení skutečných velikostí vibrací

Protože doposud železniční tunely nebyly vybudovány a výkon umělého buzení ve zkušebním vrtu nebyl dostatečně mohutný, aby byla změřitelná odezva až v budově A, tak určení velikosti vibrací se skládá ze čtyř částí:

- 1) predikce velikosti vibrací v různých tunelech pro 3 rychlosti průjezdů vlakových souprav a dvě varianty kolejového svršku bez vibroizolace, podle lit.2
- 2) určení přenosu vibrací od tunelů do referenčních míst ve kterých proběhlo měření firmou Inset při umělém vybuzení dle lit.14.
- 3) přenos vibrací z referenčních míst /viz bod 2/ do budovy F /místa SN5 a SN6/, viz lit.3 s limity FÚ AV-ČR na základě kalibrace měření Inset, viz lit.3, který byl určen pomocí umělého buzení a byl ve frekvenčním rozsahu 1 – 250 Hz použit jako náhrada

za reálný zdroj. Jedná se o záměnu frekvenční charakteristiky, tj. impaktu, za reálné spektrum vibrací od železničního tunelu

- 4) přenos vibrací z referenčních míst /viz bod 2, viz lit.3/ do budovy F a do budovy A /viz bod 2/ s limity FÚ AV-ČR byl určen pomocí programů P12 a P13 běžně používaného pro přenos vibrací s využitím znalosti geologického podloží z objektu do objektu, viz lit.15.

Vybrané údaje o tomto výpočetním postupu představují hlavní výsledky řešeného úkolu a jsou shrnuty do následující tabulky č.1. **Dále prezentované hodnoty jsou určeny pro „Novou trasu“.**

Tab.1 Velikosti vibrací v tunelech a v obou budovách ve frekvenčních pásmech
/1 – 250 Hz/ **pro reálný zdroj vibrací** /záměna frekvenční charakteristiky umělého buzení za frekvenční charakteristiku reálného zdroje/
/výchylka v 10^{-7} m pro pásma 1 – 16 Hz, rychlost v 10^{-5} m/s pro pásma 31 – 250 Hz/

f ₀ /Hz/	1	2	4	8	16	31	63	125	250	místo	rychlost	svršek
tunely	velikosti vibrací					rychlosti vibrací						
blízký	1010	820	730	870	710	8280	7620	6250	1680	kolej	120 km/h	pevný
blízký	1050	840	780	890	800	8730	6822	7830	2762	kolej	120 km/h	šterk
vzdálený	950	802	750	810	760	7650	5760	4630	3520	kolej	120 km/h	pevný
vzdálený	1010	830	762	850	780	7690	6810	5710	3580	kolej	120 km/h	šterk

f ₀ /Hz/	1	2	4	8	16	31	63	125	250	místo	rychlost	svršek
Budova F	velikosti vibrací					rychlosti vibrací						
blízký	10	12	11	9	8	30	28	20	12	F SN5	120 km/h	pevný
blízký	7	8	6	4	2	5	4	5	2	F SN5	120 km/h	šterk
vzdálený	3	5	4	0	0,8	3,1	2	0,9	0,7	F SN5	120 km/h	pevný
vzdálený	1	0,9	1	0,9	0,7	1,1	0,8	0,6	0,6	F SN5	120 km/h	šterk

f ₀ /Hz/	1	2	4	8	16	31	63	125	250	místo	rychlost	svršek
Budova A	velikosti vibrací					rychlosti vibrací						
blízký	5	6	5	3	0	3	1	0,5	0,4	A SN3	120 km/h	pevný
blízký	4	5	4	2	0	2	0,9	0,4	0,2	A SN3	120 km/h	šterk
vzdálený	4	4	3	3	0,9	1	0,8	0,4	0,3	A SN3	120 km/h	pevný
vzdálený	2	3	2	1	0,8	1,5	0,7	0,3	0,1	A SN3	120 km/h	šterk

5. Požadavky na vložený útlum pro vibroizolace pro dosažení požadavků zadavatele

Požadavky na vibroizolaci jsou dány nejen vložitelným útlumem, ale i délkou vibroizolačních opatření v tunelech. Požadavky se zásadně liší polohou tunelů vůči FÚ AV-ČR:

- 1) blízký tunel (levá tunelová trouba pro směr Veleslavín - Dejvice)
- 2) vzdálenější tunel (pravá tunelová trouba pro směr Veleslavín – Dejvice)

Středobodem těchto variant je řez v km 5.090, viz příloha 3. Tab.1 a 2 vyjadřují požadavky na minimální útlum v tunelech.

Tab.2 Požadavky na vibroizolaci v tunelech pro frekvenci 1 – 20 Hz /násobky odvozeny od násobku překročení limitů/

f ₀ /Hz/	1	2	4	8	16	poloha tunelů
D1	2x	2,2x	2x	1,8x	1,7x	blízký
D1	1,7x	1,9x	1,8x	1,4x	1x	vzdálený

Tab.3 Požadavky na vibroizolaci v tunelech pro frekvence 20 – 200 Hz /násobky odvozeny od násobku překročení limitů/

fo/Hz/	31	63	125	250	poloha tunelů
D2	1,5x	1,3x	1,4x	1,2x	blízký
D2	0,8x	1x	1,2x	0,9x	vzdálený

Zadavatelem byla vyžádána zjednodušená tabulka limitů velikosti vibrací, tj. velikosti očekávaných vibrací bez vibroizolace a s vibroizolací, pro určení dalšího postupu prací pro průjezd vlakových souprav ve vzdálenější variantě tunelu a rychlosti 120 km/hod. /směr do centra/, která je uvedena v závěru v kap.7.

Poznámka:

Přestože zásadně byly provedeny výpočty přenosu vibrací pro rychlosti 80 – 120 km/hod., a to jak ve „staré trase“, tak posunutím na sever v „nové trase“. V předkládané verzi posudku jsou uvedeny hodnoty pouze pro maximálně uvedenou rychlost 120 km/hod. a v nové trase.

6. Ideový návrh řešení vibroizolace

Vibroizolace je navržena odlišně pro blízký a pro vzdálený tunel

1. Blízký tunel

- Složení vibroizolace **pro pohyblivý svršek** /antivibrační opatření ve štěrku/, viz příloha 5:
50 mm Sylodyn,
100 mm betonová deska,
330 mm štěrk frakce 32 – 63 mm, drcený ostrohranný
celkem 480 mm

nebo

75 mm Sylodyn
5 mm deska z materiálu o hustotě 2000 – 3000 kg/m³
400 mm štěrk
celkem 480 mm
- Složení vibroizolace pro pevný svršek, viz příloha 3:
100mm Sylodyn
380 mm beton
celkem 480 mm

Délka vibroizolace v blízkém tunelu 540 m vůči středobodu ve smyslu definice této zprávy /tj. od staničení tunelu km 5.090/, tj. ± 240 mm na obě strany

2. Vzdálený tunel

- Složení vibroizolace pro pohyblivý svršek /antivibrační opatření ve štěrku/, viz příloha 5:
37 mm Sylodyn,
100 mm ŽB deska,
343 mm štěrk velikosti frakce 32 – 63 mm, drcený ostrohranný,
celkem 480 mm

nebo

50 mm Sylodyn
5 mm deska z materiálu o hustotě 2000 – 3000 kg/m³
425 mm štěrk
celkem 480 mm

- Složení vibroizolace pro pevný svršek, viz příloha 3:
50 mm Sylodyn
430 mm beton
Celkem 480 mm

Délka vibroizolace ve vzdálenějším tunelu vůči středobodu ve smyslu definice této zprávy 480 m /tj. od staničení tunelu km 5.090/, t.j. ± 270 m na obě strany

V následujících tabulkách č. 4 – 7 jsou vypočteny hodnoty jistoty splnění zadaných hodnot pro aplikaci antivibračních opatření pro „Novou trasu“, dodržení limitu je vyjádřeno v procentech.

Tab.4

Velikost překročení a jistoty splnění limitů udaných zadavatelem při rychlosti vlaků 120 km/hod – blízký tunel, pevný svršek-beton, pro frekvenční rozsah 1 – 20 Hz

$f_0/\text{Hz}/$	1	2	4	8	16	varianta
jistota v %	10	15	15	10	10	vibroizolace, pevný svršek

Tab.5

Velikost překročení a jistoty splnění limitu 10^{-7}m udaných zadavatelem při rychlosti vlaků 120 km/hod – vzdálený tunel, pohyblivý svršek-štěrk, frekvenční rozsah 1 – 20 Hz

$f_0/\text{Hz}/$	1	2	4	8	16	varianta
jistota v %	9	14	15	10	9	vibroizolace, pohyblivý svršek /štěrk/

Tab.6

Velikost překročení a jistoty splnění limitu 10^{-5}m/s udaných zadavatelem při rychlosti vlaků 120 km/hod – blízký tunel, pevný svršek-beton, pro frekvenční rozsah 20 – 200 Hz

$f_0/\text{Hz}/$	31	63	125	250	varianta
jistota v %	10	15	10	10	vibroizolace, pevný svršek

Tab.7

Velikost překročení a jistoty splnění limitu 10^{-5}m/s udaných zadavatelem při rychlosti vlaků 120 km/hod – vzdálený tunel, pohyblivý svršek - štěrk, pro frekvenční rozsah 20 – 200 Hz

$f_0/\text{Hz}/$	31	63	125	250	varianta
jistota v %	10	14	12	10	nová vibroizolace, pohyblivý svršek, štěrk

Jak plyne z tabulek 4 - 7, teprve navržené řešení vibroizolace, viz příloha 3 a 5, zajišťují splnění požadavků zadavatele s jistotou 9 – 15 %.

7. Kalibrace výpočtu

Na základě měření vibrací a rozsáhlých teoreticko experimentálních zkušeností byl proveden výpočet vibrací ve 2 referenčních místech v místě vrtu HPJ4 ve dvou hloubkách 25,7m a 30,4 m, v lit.3.označeno etapa 1 a etapa 2, ve vazbě na zdroj vibrací umístěný ve vrtu J4a v hloubce 10m. Následně bylo jako základní referenční místo pro výpočet a následnou korekci, tj. kalibraci, zvoleno místo SN7 ve smyslu lit.3, v hloubce 30,4 m pod povrchem, etapa 1. Namísto změřených hodnot byly hodnoty nahrazeny vypočtenými hodnotami v pomocném základním referenčním místě, tj. v místě shodném s měřicím místem (30,4 m pod povrchem), kde byly použity charakteristiky reálného zdroje vibrací, namísto umělého vybuzení ve smyslu bodu 3) postupu výpočtu, popsáném v kap.4.

Následně byly porovnávány předpokládané hodnoty v budově F s výsledky měření. Měření vibrací ovšem používá zdroj vibrací, který je odlišný od průjezdu vlakových souprav v tunelech (frekvenčně i absolutně), proto nelze přímo tyto naměřené hodnoty v budově F použít pro porovnání s limity udanými zadavatelem. Způsob vyhodnocení umožňuje využít měření pro testování dílčího přenosu od místa „testovacího“ impaktního rázu do místností bližší budovy F, obdobně, jak je uvedeno v předchozím odstavci.

Výpočet byl proveden pomocí standardního programu P10 a P11, viz lit.2, v plném rozsahu frekvencí 1 – 1000 Hz. Pro účely návrhu vibroizolace pro dodržení limitů udaných zadavatelem byl frekvenční rozsah zúžen na 1 – 200 Hz s rozdělením na dva frekvenční podrozsahy 1 – 20 Hz a 20 – 200 Hz.

Pozn.: Limit 200 Hz určený zadavatelem spadá do oktávového pásma výpočtu 250 Hz, proto je v tabulkách naměřených i vypočtených hodnot uváděna oktáva 250 Hz.

Aby bylo možné určit pokud možno nejpřesnějším způsobem velikost vibrací v zadaných kontrolních místech, tak bylo potřeba spojit výpočet s měřicím testem. Teprve takto určené hodnoty mohly být porovnány s limitem požadovaným zadavatelem. Toto spojení výpočtu s měřením probíhá prostřednictvím tzv. kalibrace výpočtu.

8. Výsledná trasa

Z prvotního posouzení „Nové trasy“ bez aplikovaných antivibračních opatření, uvedeného v kapitole č. 4, vyplynulo překročení zadaných limitů, proto byla navržena maximálně možná a realizovatelná vibroizolace, viz kap.6. Navržené způsoby vibroizolace se liší pro varianty železničního svršku a pro blízký a vzdálený tunel, včetně délky opatření v tunelu. Průjezd vlakové soupravy tunelem je liniový zdroj vibrací, z toho vyplynulo, že při rychlosti 120 km/h musí být opatření v tunelech v délce cca 500 m.

Na základě podrobného geotechnického průzkumu byla zjištěna přibližná poloha tektonického zlomu, na jehož základě byla původně sledována „nová trasa“ modifikována do „výsledné trasy“. Výsledná trasa umísťuje obě dvě tunelové trouby za zmíněný tektonický zlom do geologicky výhodnějšího prostředí a zároveň zajišťuje zajištění dostatečné jistoty splnění zadaných limitů vibrací.

Nestandardním způsobem byly vyjádřeny požadavky na minimální vibroizolační útlum v absolutních hodnotách výchylek 10^{-7} m a rychlosti 10^{-5} m/s, oproti běžnému způsobu v dB nebo v %. Všechna měření i výpočty byly provedeny v trojdimenzionálním vyjádření a teprve v závěru pro specifikaci vibroizolace bylo převedeno vektorové vyjádření na

modulové. Standardní programy pracují s hodnotami modulů pružnosti, resp. přetvárnosti hornin s jejich vnitřními útlumy a rychlostmi šíření podélných zvukových vln.

Přesunutí poloh tunelů do větší vzdálenosti od FÚ AVČR na sever je významně výhodnější, neboť se tunely kromě větší vzdálenosti se dostávají do pevnějšího horninového podloží, mimo tektonický zlom. Vzdálenější tunely se nachází mimo jiné také v tzv. vzdáleném poli, kde vibrace se šíří systematictěji, tj. téměř jako rovinné vlny.

Následující tab. 8 obsahuje dva frekvenční rozsahy dle zadání, místa v nejdůležitějších laboratořích v budovách A a F, chyby určení výpočtu, velikosti vibrací a nejistoty kontrolního měření po realizaci. **Uvedené výsledky jsou platné pro „Výslednou trasu“ pro variantu s pohyblivým svrškem - štěrk.**

Varianta pro pevný svršek (pevnou jízdní dráhu) vychází v porovnání s variantou s pohyblivým svrškem (štěrk) v rámci standardního výpočtu hůře, proto bylo provedeno kontrolní posouzení, viz příloha 15. Lze konstatovat, že frekvence pod 16 Hz jsou velice obtížně tlumitelné (naopak jsou antivibrační opatření kontraproduktivní), proto zpracovatel doporučuje dále prezentované řešení se štěrkovým ložem.

Tab.8 Přehledná tabulka požadovaných limitů, jejich překročení a hodnot po navržené vibroizolaci

Frekv. rozsah	budova	požadov.limit	bez vibroizol.	chyba výpočtu	po vibroizolaci	nejistota měření
1-20 Hz	A	10^{-7} m	$1,5 \cdot 10^{-7}$ m	$\pm 0,4 \cdot 10^{-7}$ m	$0,01 \cdot 10^{-7}$ m	$\pm 0,6 \cdot 10^{-7}$ m
20-200 Hz	A	10^{-5} m/s	$1,8 \cdot 10^{-5}$ m/s	$\pm 0,5 \cdot 10^{-5}$ m/s	$0,2 \cdot 10^{-5}$ m/s	$\pm 0,7 \cdot 10^{-5}$ m/s
1-20 Hz	F	10^{-7} m	$2,2 \cdot 10^{-7}$ m	$\pm 0,4 \cdot 10^{-7}$ m	$0,4 \cdot 10^{-7}$ m	$\pm 0,6 \cdot 10^{-7}$ m
20-200 Hz	F	10^{-5} m/s	$3 \cdot 10^{-5}$ m/s	$\pm 0,5 \cdot 10^{-5}$ m/s	$0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s	$\pm 0,7 \cdot 10^{-5}$ m/s

Na rozdíl od stejných výsledků v předchozích posudcích, viz lit.7, 8 a 11, jsou veškeré hodnoty ve výše uvedené tabulce uváděny jednotně, v absolutních hodnotách.

Zjednodušená tabulka 8 určuje maximální hodnoty překročení požadovaných limitů při průjezdu vlaků ve vzdálenější tzv. „Výsledné trase“, pouze s nejvyšší rychlosti 120 km/h, po sjednocení vibrační odezvy z obou tunelů, avšak s frekvenčním rozlišením (pro 1-20 Hz, pro výchylky v m a pro 20 – 200 Hz, rychlosti v m/s). Dále tabulka obsahuje očekávané velikosti vibrací ve stejných místech a stejných budovách po realizaci vibroizolace, rovněž ve stejných absolutních jednotkách.

Metodika výpočtu očekávaných velikostí vibrací pro obě varianty tunelů a při rychlosti průjezdů vlaků je popsána v lit.14. Ideový návrh vibroizolace pro dodržení požadovaných limitů je popsán v kap.6, graficky v přílohách 3 a 5.

Pro obě velikosti, s vibroizolací a bez vibroizolace, jsou v tabulce uvedeny chyby výpočtů resp. nejistoty kontrolního měření, opět v absolutních hodnotách. V případě velikosti vibrací bez vibroizolace byly vypočtené hodnoty doplněny chybami výpočtů. V případě velikosti vibrací po realizaci navrhované vibroizolace, jsou tyto opatřeny tzv. celkovou nejistotou kontrolního měření před kolaudací. Očekávaná velikost nejistot měření po realizaci vibroizolace bude zákonitě obsahovat nejen chyby výpočtů, ale i vlastní nejistoty měření vibrací. Proto budou nejistoty kontrolního měření vždy vyšší, než chyby výpočtů.

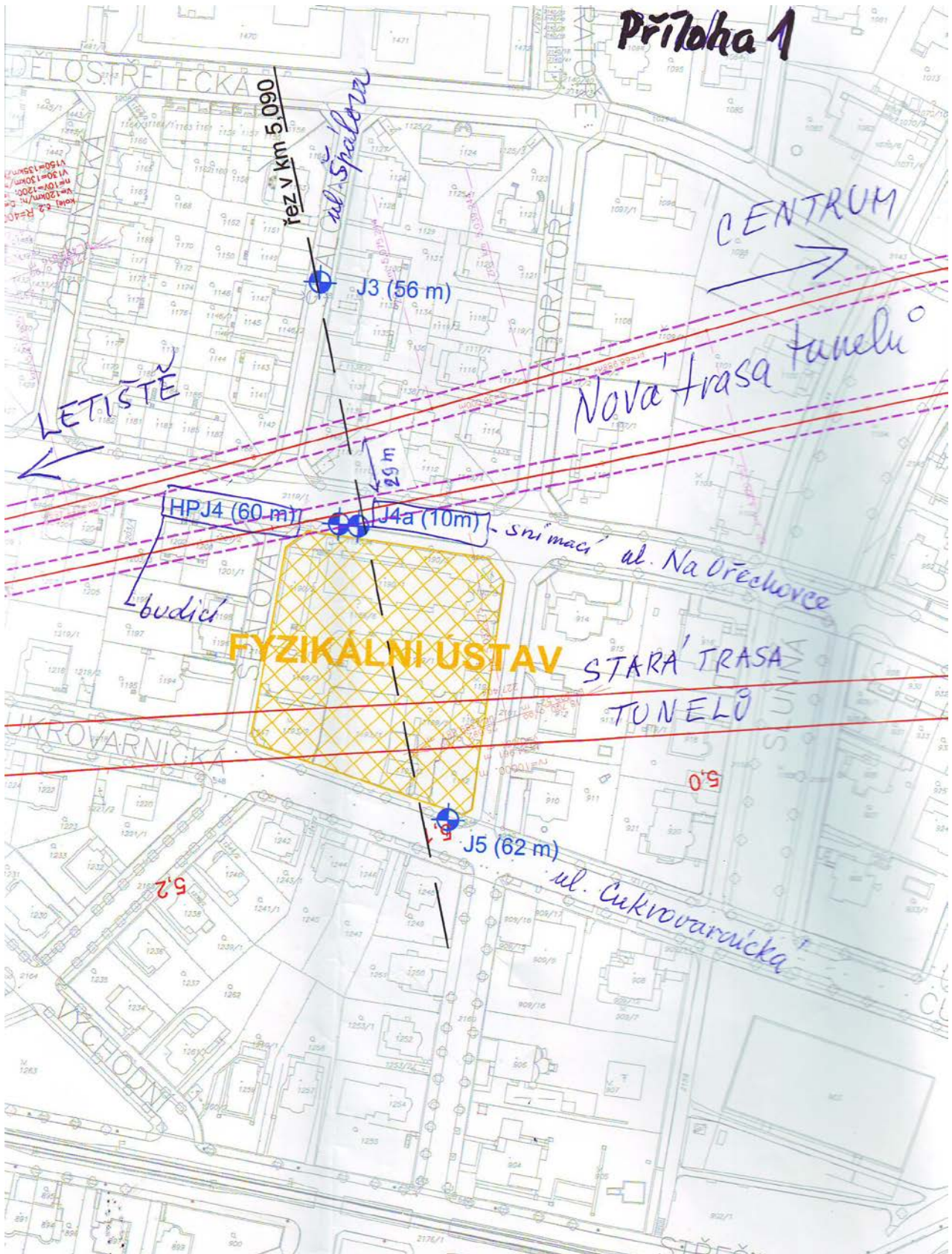
Pro práci a úvahy s hodnotami v tabulce byl ponechán stejný rozměr pro chyby výpočtu a nejistoty kontrolního měření.

Výsledky práce byly prezentovány v FÚ AVČR dne 8.2.2019.

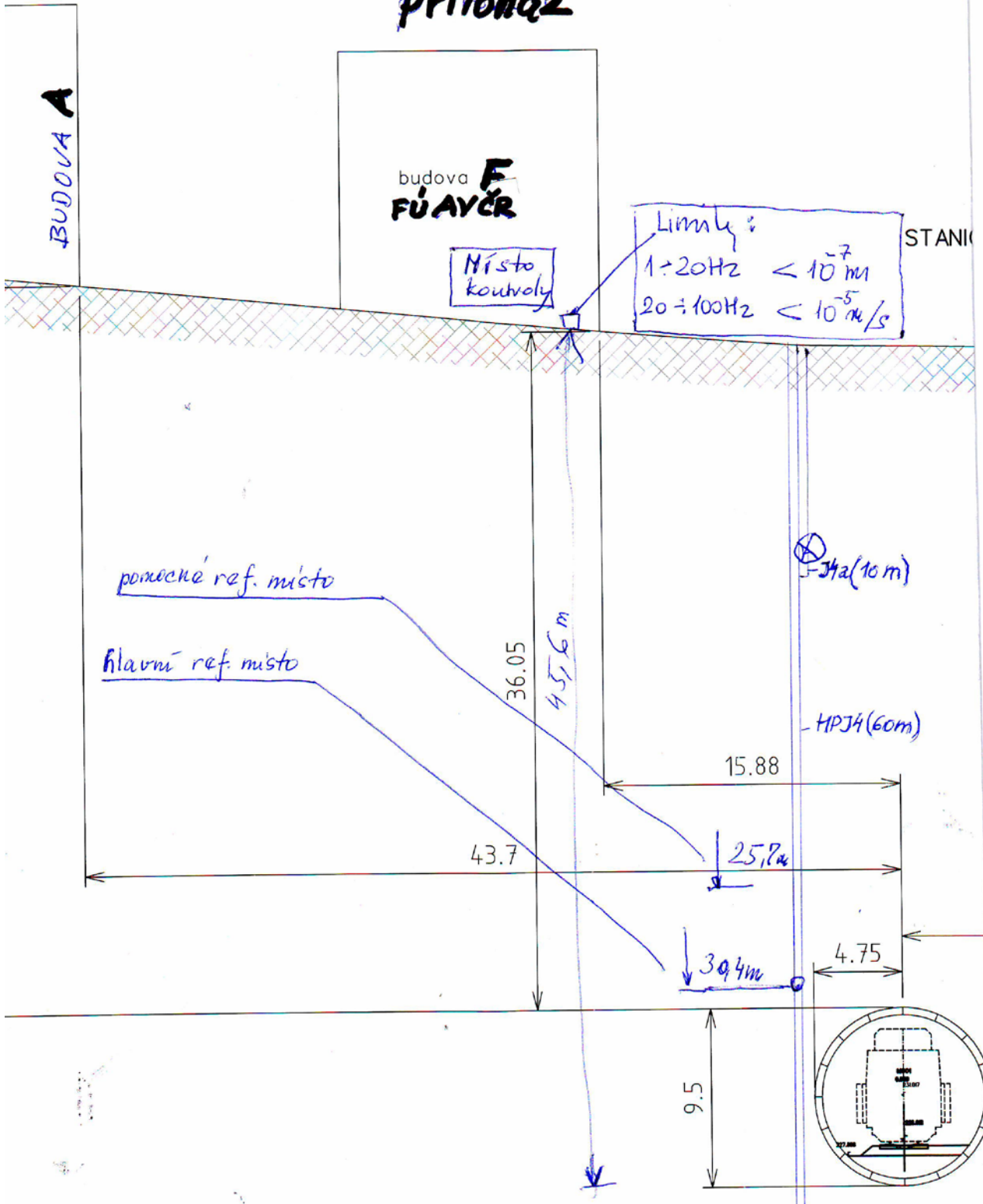
8. Seznam literatury

1. Mareš J.: Požadavky na dodržení velikosti vibrací, e-mail, 12.12.2018
2. Dědič, Stěnička.: Směrnice pro návrh vibroizolace v tunelech metra v Pražské aglomeraci, Metroprojekt a.s. 4/2001
3. Čermák M.: Modernizace trati Výstaviště-Veleslavín – měření dynamických účinků ve vrtu u FÚ-AV ČR, Inset, 12/2018
4. Vitásek P.: Rozložení vrtů v oblasti FÚ AV-ČR, SUDOP Praha, 20.12.2018
5. Chmelař R.: Geotechnické charakteristiky zemin a hornin, PUDIS, 6.1.2019
6. Pátek V.: Variantní řezy tunely Výstaviště-Veleslavín, Metroprojekt, 21.1.2019
7. Stěnička J.: Požadavky na vibroizolaci v železničních tunelech na letiště Ruzyně, pro dodržení hygienických limitů v stávající zástavbě na Ořechovce, Metroprojekt Praha, 15.8.2016
8. Stěnička J.: Posouzení vlivů modernizace podzemního vedení trati v úseku Praha – Dejvice-Veleslavín na vibrace, ve speciálních laboratořích FÚ AV-ČR v Cukrovarnické ulici, Metroprojekt, 17.2.2017
9. Stěnička J.: Návrh vibroizolace pro dodržení limitů FÚ AV-ČR e-mail ze dne 22.1.2019, Metroprojekt Praha
10. Pátek V.: Technické parametry vlakových souprav a kolejového svršku v tunelech v blízkosti FÚ AV-ČR, e-mail 23.1.2019. Metroprojekt
11. Stěnička J.: Dodržení limitů na vibrace u FÚ AVČR na Ořechovce od provozu železničních tunelů Dejvice – Vokovice, Metroprojekt, 5.2.2019
12. Meller M., Stěnička J.: Směrnice pro výpočet přenosu vibrací v obytných a průmyslových budovách, VÚPS Praha, 1985
13. Mertl M.: Protokol o měření vibrací v FÚ AVČR č.A-14/2017, Mertl Akustika, Praha 1/2017
14. Dolejší F, Stěnička J.: Metodika výpočtu přenosu vibrací od liniových zdrojů mimo budovu do vnitřních chráněných prostorů, Sborník Akustického semináře Jetřichovice, 10/2009

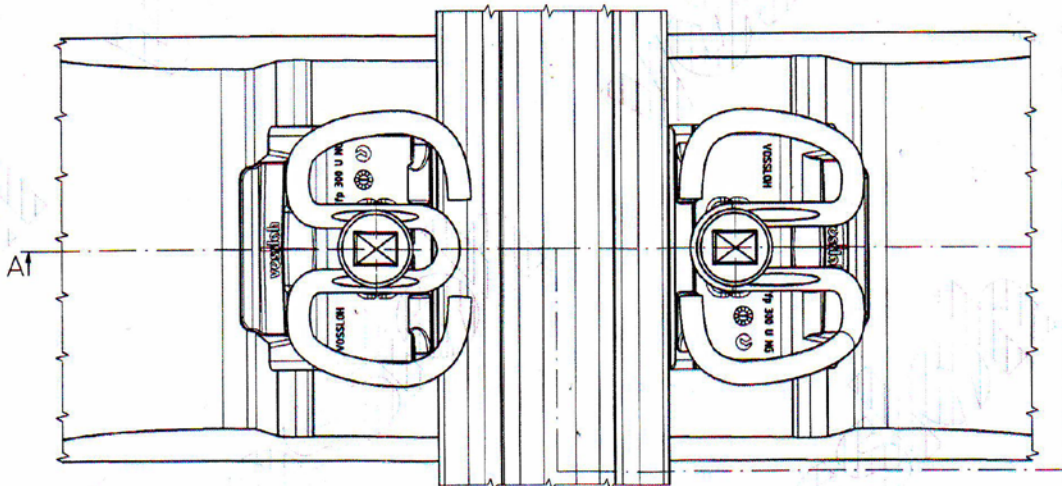
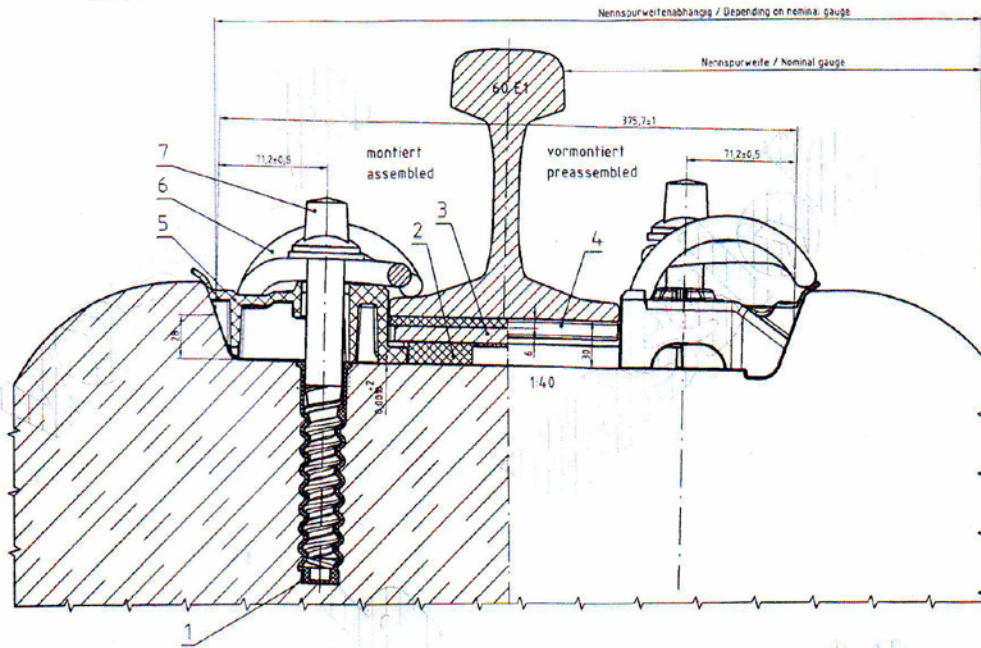
Priloha 1



Příloha 2

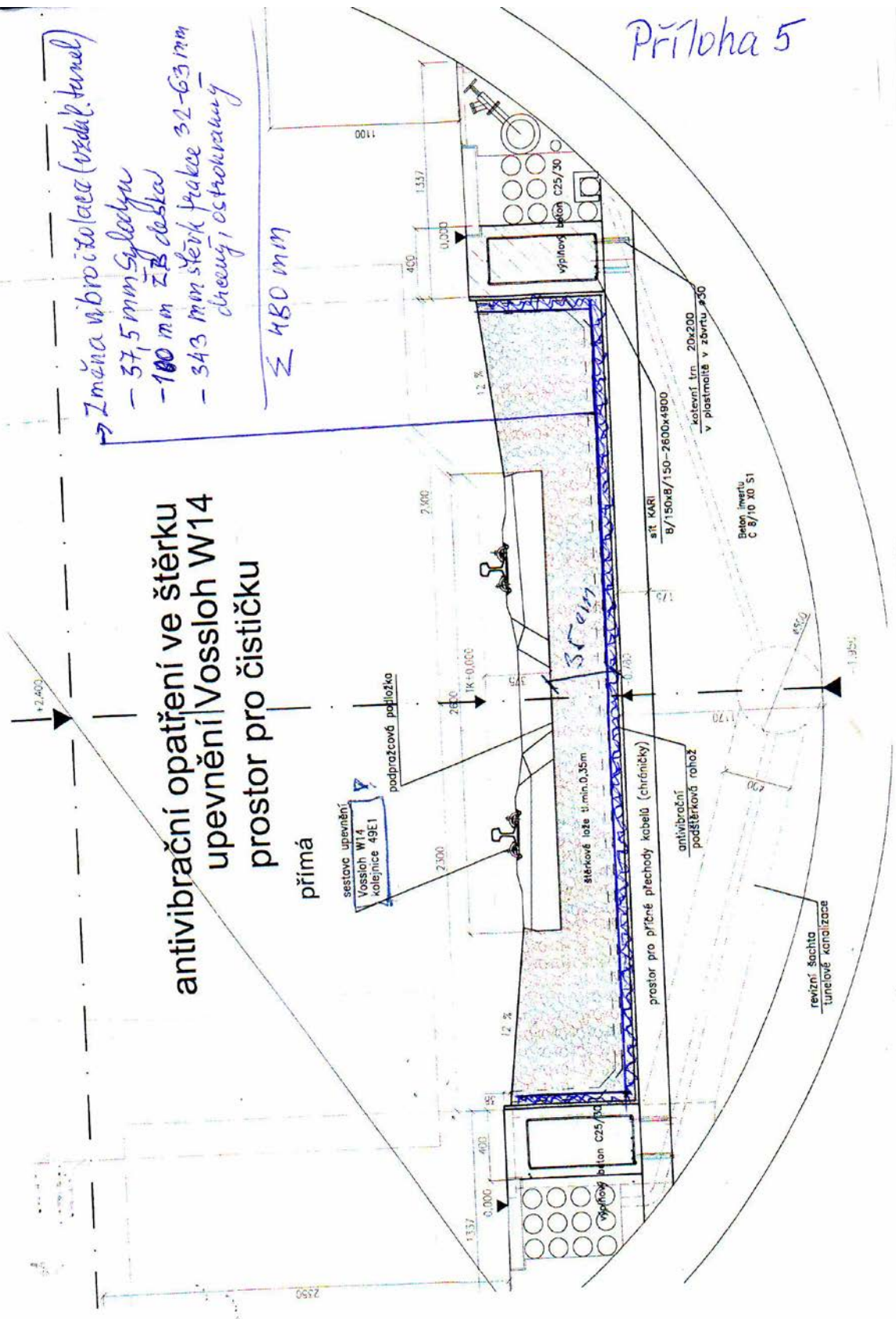


A-A

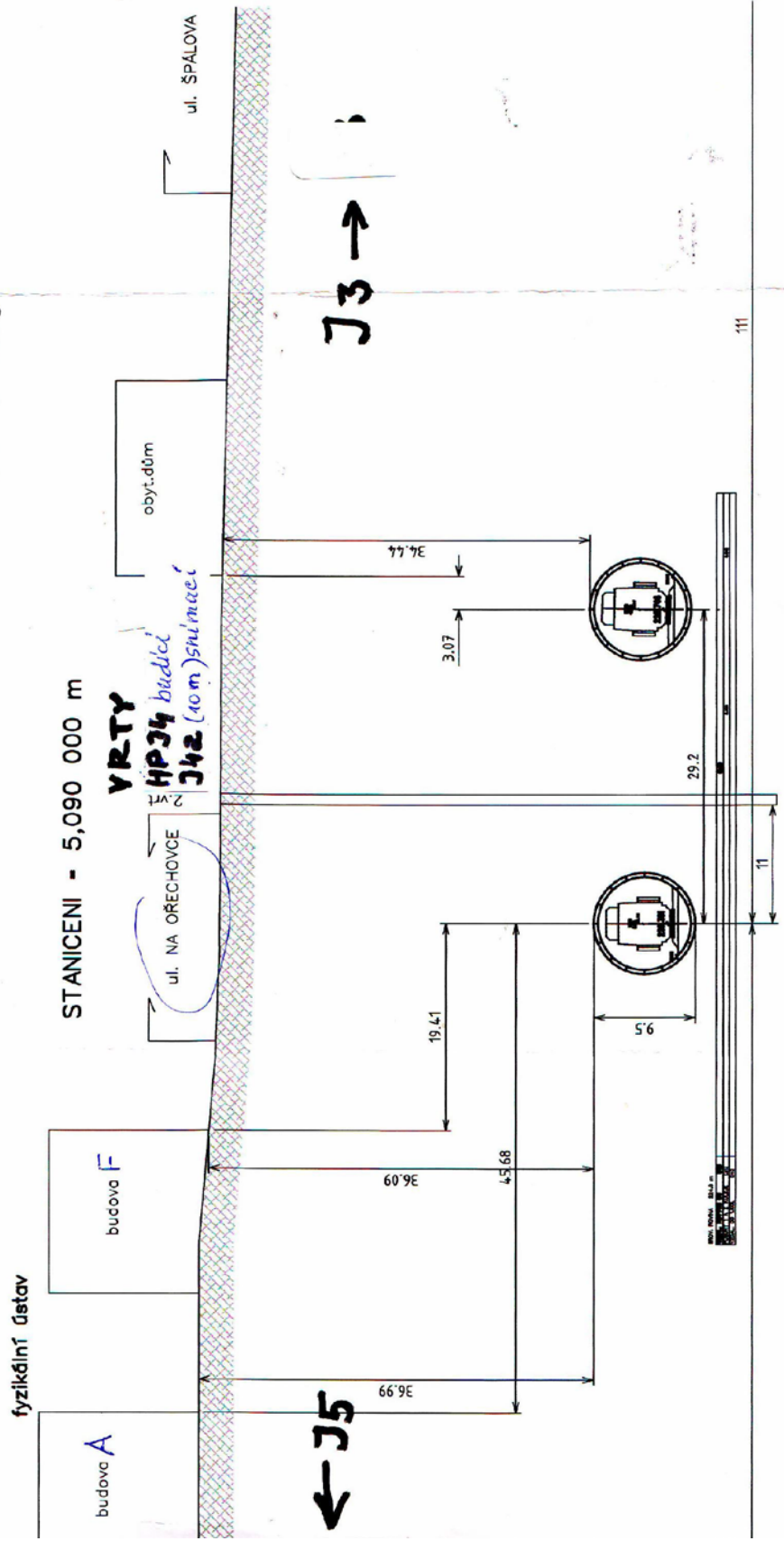


Zmena vibro izolacia (vzdal. tunel)
- 37,5 mm Splochy
- 100 mm ZB dablak
- 343 mm šterk frakce 32-63 mm
chery, ostronazny
Σ 480 mm

antivibrační opatření ve šterku upevnění Vossloh W14 prostor pro čističku přímá



Príloha 6



Příloha 8

KVARTÉR	stratigrafický útvar a genetický komplex	symbol stupně zvětrání	geologická charakteristika	úroveň	součinitel filtrace k_f [m.s ⁻¹]	obj.tíha v přirozeném uložení γ [kN.m ⁻³]	Přetvárné parametry			Smyk. pevnost	
							modul přetvárnosti E_{def} [MPa]	modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [1]	soudržnost c_{ef} [kPa]	úhel vnitř.tření ϕ_{ef} [°]
PALEOZOIKUM ordovík, souvrství lelenské, Ltn	různorodé navážky brádice jílovitopískitá slabě tek. narušená s vločkami jemnozrnného křemenného pískovce	AN	písek hlinitý až šterk hlinitý s úlomky brádice a betonu	povrch báze	10^{-5} 10^{-6}	17 18	5 8	10 20	0,40 0,33	3 6	26 28
		W5	zcela zvětralé (rozložené)	povrch báze	10^{-8} 10^{-7}	20,5 22,0	8 25	20 50	0,40 0,35	20 25	26 28
		W4/W3	zvětralé	povrch báze	10^{-7} 10^{-6}	22,0 24,0	25 100	50 200	0,35 0,30	25 25	28 35
		W2	navětralé	povrch báze	10^{-6} 10^{-7}	24,0 25,5	100 350	200 600	0,30 0,25	100 200	35 38
		W1	zdravé	povrch 10,0 m 25,0 m	10^{-7} 10^{-8} 10^{-8}	25,5 26,0 26,5	350 420 450	700 800 850	0,25 0,23 0,22	200 300 350	38 40 41
lelenské - poruchová zóna	brádice s vločkami pískovce	Tekt.	tektonické pásmo s velmi velkou až extrémně velkou HD	*	10^{-6}	22,0	65	130	0,33	20	29
PALEOZOIKUM ordovík, souvrství libeňské Lbn	brádice jílovito- prachovitá	W5	zcela zvětralé (rozložené)	povrch báze	10^{-8} 10^{-7}	21,0 21,5	7 20	15 40	0,40 0,38	15 25	18 22
		W4/W3	zvětralé	povrch báze	10^{-7} 10^{-7}	21,5 23,5	20 30	40 60	0,38 0,32	25 20	22 26
		W2	navětralé	povrch báze	10^{-7} 10^{-7}	23,5 25,0	30 70	60 150	0,32 0,28	20 25	26 30
		W1	zdravé	povrch 10,0 m 25,0 m	10^{-7} 10^{-8} 10^{-8}	25,0 25,7 26,0	70 120 150	150 250 300	0,30 0,27 0,26	25 40 50	30 32 33

Tab. 1: Předběžné geotechnické charakteristiky zemín pokravných útvarů a hornin skalního podloží

Technické podmínky pro zadání projektu železničního tunelu v úseku Praha-Dejvice – Praha-Veleslavín (požadavky za FZÚ AV ČR v. v. i.)

Pro udržení vhodného prostředí pro fyzikální výzkum v areálu FZÚ AVČR Cukrovarnická v Praze 6 je třeba zajistit, aby realizace plánovaného železničního tunelu Praha Dejvice – Praha Veleslavín nenavýšila hladinu vibračního rušení v této oblasti nad stávající stav.

Aktuální stav hladiny vibrací v suterénních místnostech budovy A, kde jsou umístěny laboratoře obzvláště citlivé na mechanické rušení, byl ve dnech 15. - 16. 11. 2016 na dvou stanovištích proměřen pracovníky Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. (Tento ústav lze v rámci ČR považovat za standardní pracoviště v daném oboru.) Vibrace byly měřeny pomocí seismických snímačů Wilcoxon Research 731A ve třech směrech se vzorkovací frekvencí ~1 kHz po dobu 24 hodin, a to od 12:00 do 12:00 druhého dne.

Celkově se úroveň rušení ve směru svislém pohybovala po celou dobu měření v okolí basální hladiny ~ 0.002 (± 0.001) m/s², ve směru severojižním pak u hodnot ~ 0.008 (± 0.001) m/s². Jak víme ze zkušenosti, tyto hodnoty jsou zcela vyhovující pro provádění všech fyzikálních měření v našich laboratořích. V ranní a odpolední špičce se ovšem celkem 3x ojediněle vyskytla krátkodobá singulární maxima dosahující v severojižním směru (tj. ve směru kolmice k ulicím Cukrovarnická a Střešovická spuštěné z měřicího stanoviště) vrcholových hodnot ~ 0.015 m/s². Tyto události, způsobené pravděpodobně průjezdem nějakého těžkého vozidla v těsné blízkosti areálu, jsou v některých případech již schopny zcela znehodnotit výsledky přesných měření. Kromě měření vektoru zrychlení byla současně ve frekvenčním oboru 1 - 20 Hz zjišťována maximální amplituda vibrací a ve frekvenčním oboru 20 - 100 Hz maximální rychlost dosažená ve vibračním pohybu. Z vyhodnocení příslušných spekter vyplynulo, že po celou dobu měření nebyly překročeny limity 10⁻⁷ m pro amplitudu vibrací a 10⁻⁵ m/s pro maximální rychlost při vibracích.

Ve světle těchto měření můžeme naše požadavky na úroveň vibračního rušení v suterénních laboratořích v areálu Cukrovarnická formulovat takto:

- 1) Požadujeme nepřekročit maximální amplitudu zrychlení ve svislém směru ~0.003 m/s², ve vodorovných směrech (s vyloučením ojedinělých událostí) pak ~0.009 m/s².
- 2) V oboru frekvencí 1 - 20 Hz požadujeme udržet amplitudu < 10⁻⁷ m.
- 3) Ve frekvenčním oboru 20 – 100 Hz hodnotu maximální rychlosti při vibracích požadujeme udržet v limitu < 10⁻⁵ m/s.

Komentář k uvedeným požadavkům FZÚ AV ČR v. v. i, 17.2.2017

(Ing. Jan Stěnička Csc.)

Ačkoli jsou limity dané FZÚ velice nesourodé, vychází to z tradičního hodnocení, odlišného pro různá frekvenční pásma, pro která jsou vibrace, resp. hluk, odvozovány:

- pro nejnižší frekvenční pásma pomocí výchylky [m]
- pro střední pásma jako rychlost [m/s]
- ve slyšitelné oblasti jako zrychlení [m/s^2]

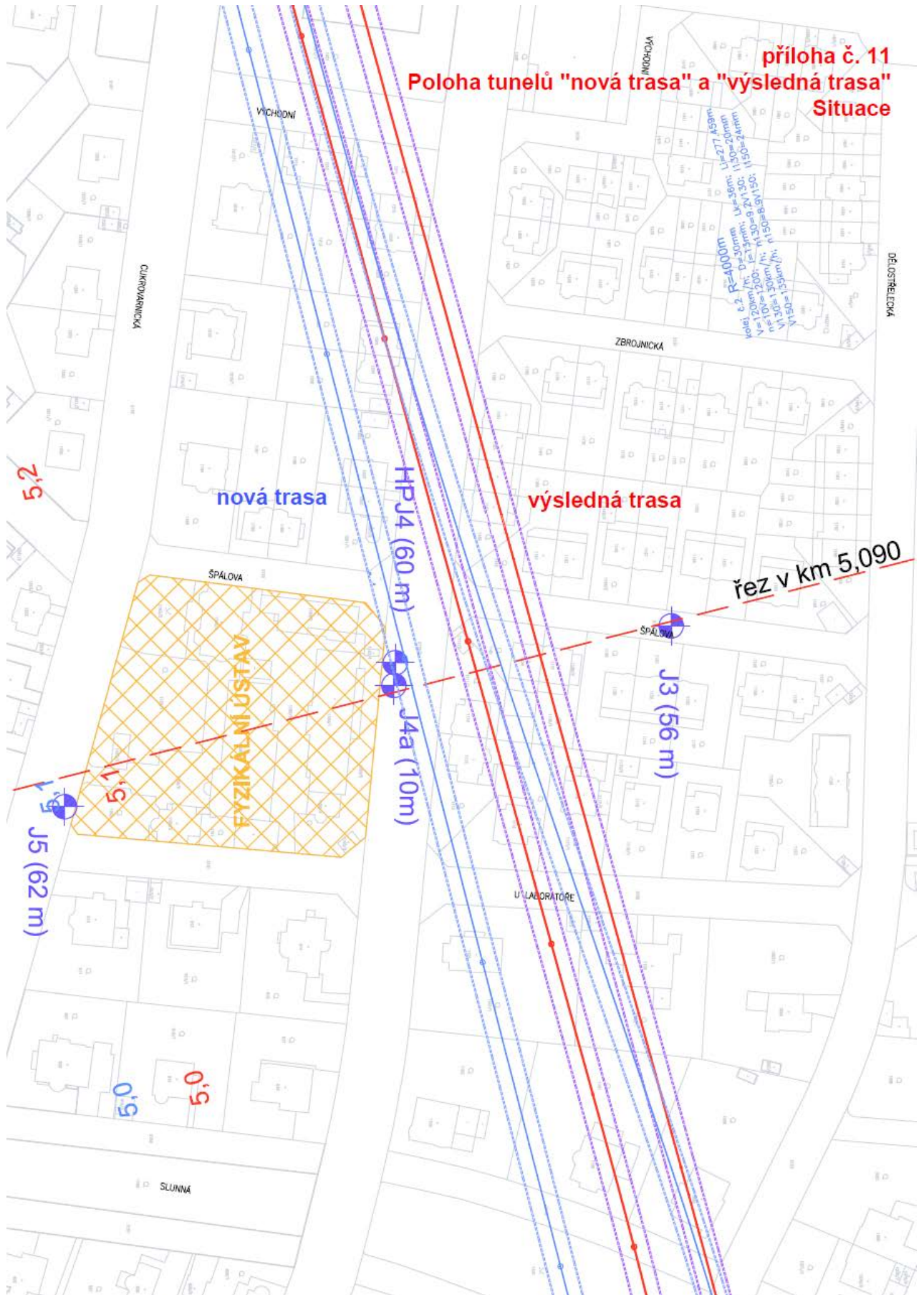
Přestože nelze v celém frekvenčním rozsahu sjednotit limity do jedné veličiny s jednotnými jednotkami, tak lze zobecněně limit označit všepokrývající veličinou zrychlení, konkrétně hladinou 40 dB, tj. orientačně výchylka 10^{-7} m pro nejnižší frekvenční pásmo, protože jediné tyto hladiny zrychlení jsou převážně měřitelné.

Jestliže porovnáme výsledky referenčního měření předložené FZÚ AV ČR s našimi výsledky měření (Mertl Akustika, 18.1.2017), jsou výsledky FZÚ o cca 20dB vyšší, přesto současný stav velikosti vibrací v budově podle vyjádření FZÚ AV ČR, vyhovuje. .

Protože neexistují všeobecné limity pro vibrace kromě hygienických limitů, je nutno se řídit limity, resp. hodnotami udanými provozovateli, resp. výrobci měřících přístrojů.

Závěrem lze konstatovat, že po realizaci vibroizolace v tunelu, která je zapotřebí pro dodržení hygienických limitů v obytné zástavbě, budou limity FZÚ AV ČR s jistotou 10 dB splněny, dle jejich výše uvedených požadavků.

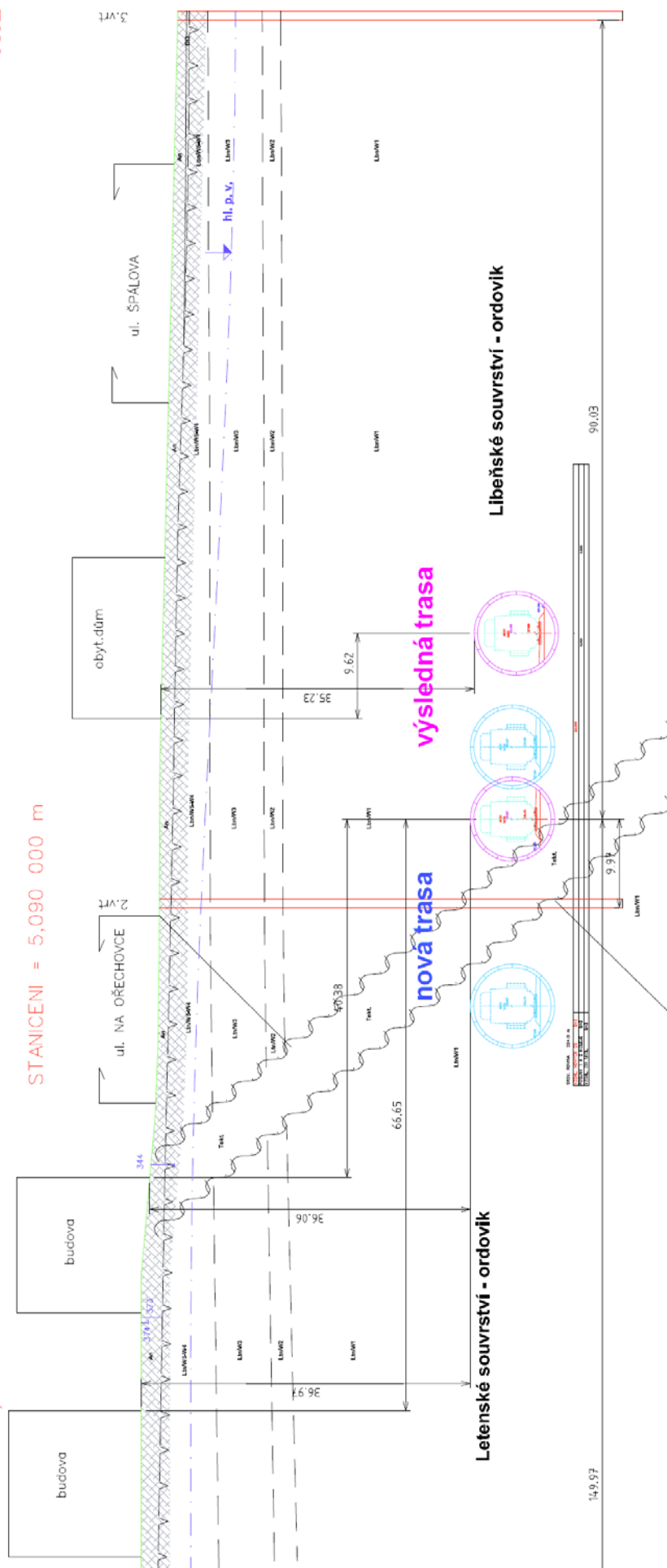
příloha č. 11
Poloha tunelů "nová trasa" a "výsledná trasa"
Situace



příloha č. 12
Poloha tunelů "nová trasa" a "výsledná trasa"
Řez

fyzikální ústav

STANICENÍ = 5,090 000 m



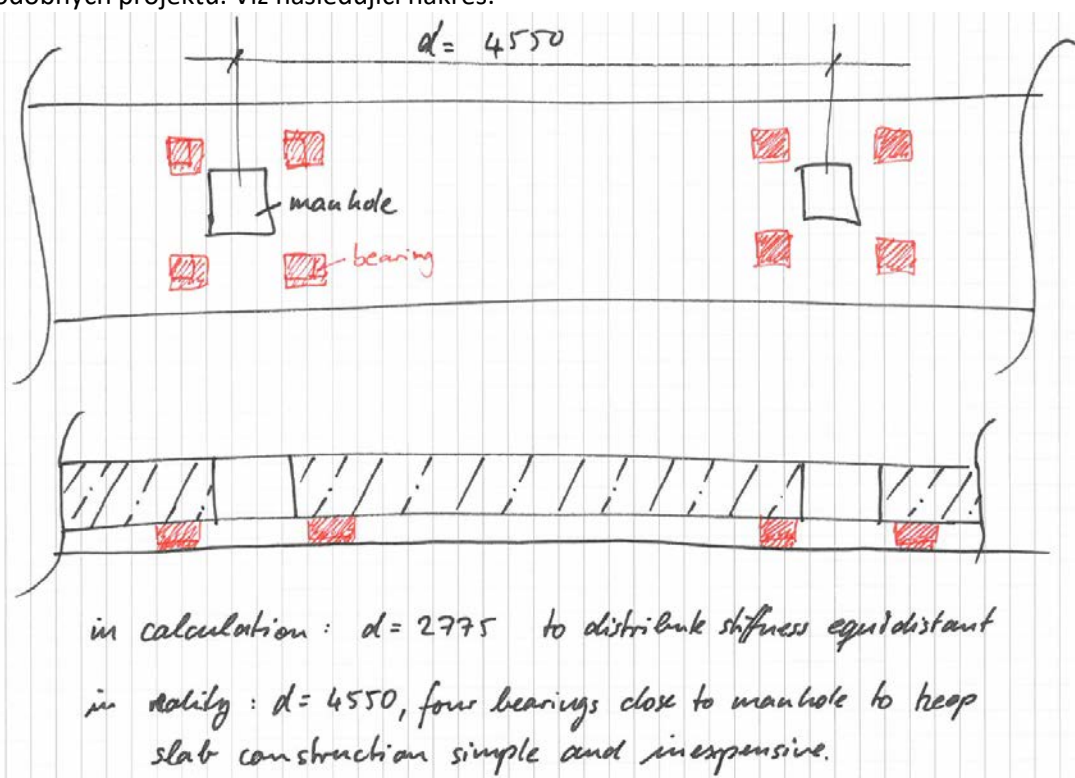
Příloha č. 15

Všechny následující předpokládají realizaci pevné jízdní dráhy na bodovém uložení bez výplňového materiálu. PJD bude zhotovena na separační fólii, nazdvižená a následně podložena „ložiskami“ (podložkami). Za těchto podmínek při zachování stavební výšky svršku jsou navrženy následující varianty:

Varianta	Materiál	Rozměry ložiska	Vlastní frekvence (s vlakem)	Celkový průhyb KP při jízdě vlaku
1.	Sylodyn N6252	500x500x25 mm	10,2 Hz	2,9 mm (lokálně 0,7 mm)
2.	Sylodyn N6372	490x490x37,5 mm	7,9 Hz	4,1 mm (lokálně 0,7 mm)
3.	Sylodyn N6502	480x480x50 mm	6,5 Hz	5,1 mm (lokálně 0,7 mm)

Větší výšky ložisek (50 a 37,5 mm) je možné zapustit do kapes v betonovém invertu. V kontextu navazující tratě, na rohoži pod kolejové lože a s použitím podvalových podložek, s průhybem 3,0mm je v případě variant 2 a 3 potřebné zřízení přechodových oblastí se stupněm á 0,5 mm a jednotlivých délkách cca 17 m (0,5 sek. jízdy vlaku).

Výpočty jednotlivých variant jsou doloženy v následujících tabulkách. Pro účely výpočtu (rovnoměrné rozdělení) je uvedena vzdálenost ložisek 2775 mm, vždy po dvou symetricky pod KP. Reálně však bylo uvažováno s ložisky okolo revizních otvorů vzdálených 4550 mm, na základě podobných projektů. Viz následující nákras:



Výše uvedené odpovídá standardně dodávaným systémovým panelům PJD. V tomto případě by pro byly využity revizní otvory a panely by byly umístěny do předem vybetonovaného koryta. Alternativně (bez použití systémových panelů) z hlediska provádění by bylo možné nejdříve na separační fólii zhotovit jednotlivé bloky PJD s prahy pro hydraulické zdviháky, následně zvednout PJD a podsunout ze stran ložiska. Výplňový beton C25/30 by se zhotovil až následně.

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann
Calculation of the Natural Frequency

Input Parameter **Remark**

Vehicle:

axle load 1	$Q_1 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{12} =$	1800 mm	(2)
axle load 2	$Q_2 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{23} =$	0 mm	
axle load 3	$Q_3 =$	0 kN	
distance	$a_{34} =$	0 mm	
axle load 4	$Q_4 =$	0 kN	
velocity	$v =$	120 km/h	(1)

Rail: 60E2

moment of inertia	$I_s =$	3,02E+07 mm ⁴	(1)
Young's modulus	$E_s =$	2,10E+05 N/mm ²	(1)
section modulus	$W_u =$	3,75E+05 mm ³	(1)
mass per meter	$m_s =$	60,0 kg	(1)

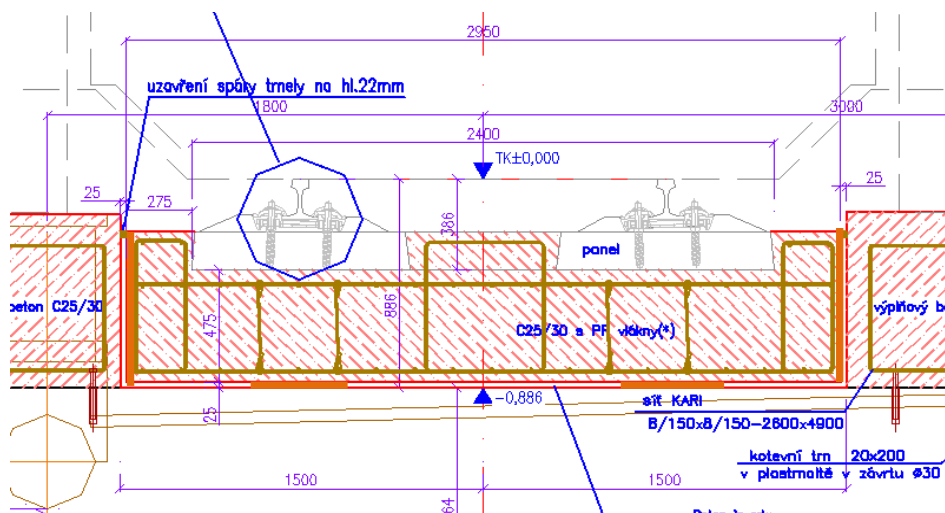
Embedded Rail System (ERS):

material: Sylomer / Sylodyn	BPP 40kN/mm		
thickness	$d_{zwp} =$	10 mm	(2)
stat. stiffness	$k_{zwp, stat} =$	40 kN/mm	(1)
dyn. stiffness	$k_{zwp, dyn} =$	60 kN/mm	(2) $k_{dyn} / k_{stat} = 1,5$
mechanical loss factor	$\eta_{zwp} =$	0,20	(2)

Rail fastening system:

support point distance	$a_{sch} =$	650 mm	(1)
mass of fastening system	$m_{st} =$	10 kg	(2)
system damping	$\eta_{System} =$	0,00	

Cross-section of slab:



List of references / Explanations:

- (1) according to technical informatino received per mail on 31.08.2018 and on 03.09.2018
- (2) assumed by Getzner Werkstoffe GmbH
- (3)
- (4)

Project: New LRT track Prague Dejvicka-Veleslavin
Product: Point bearing without side mats
Comment: Axle load 18t, straight line

Input Parameter	Remark
-----------------	--------

Concrete slab 1:

height	$h_1 =$	475 mm	(1)
width	$b_1 =$	1500 mm	(1) = 1500 mm - 25 mm
density	$\rho_1 =$	2500 kg/m ³	(2)
Young's modulus C25/30	$E_1 =$	26700 N/mm ²	(1)
moment of inertia	$I_1 =$	2,148E+10 mm ⁴	

Top layer:

height	$h_2 =$	160 mm	(1) Porr slab
width	$b_2 =$	1200 mm	(1) Porr slab
density	$\rho_2 =$	2400 kg/m ³	(2)

Total mass (without vehicle): = **2537 kg/m**

MSS bearing:

material: Sylomer / Sylodyn	MSS N6252		
length	$a_{MFS} =$	500 mm	
width	$b_{MFS} =$	500 mm	
thickness	$d_{MFS} =$	25 mm	
distance	$l_{MFS} =$	2775 mm	
stat. bedding modulus	$C_{MFS, stat} =$	0,101 N/mm ³	Evaluation area: 0,276 - 0,516 N/mm ²
dyn. bedding modulus	$C_{MFS, dyn} =$	0,131 N/mm ³	at 0,516 N/mm ² ; f = 10,2 Hz
mechanical loss factor	$\eta_{MFS} =$	0,08	

Side mats:

material: Sylomer / Sylodyn	no side mats		
height	$h_{MFS, seite} =$	0 mm	= 475 mm + 160 mm
thickness	$d_{MFS, seite} =$	0 mm	

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (only ERS)

Max. rail deflection (ERS)

stationary train	=	0,9 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	0,7 mm

Calculation of Slab Deflection acc. to Zimmermann (MSS)

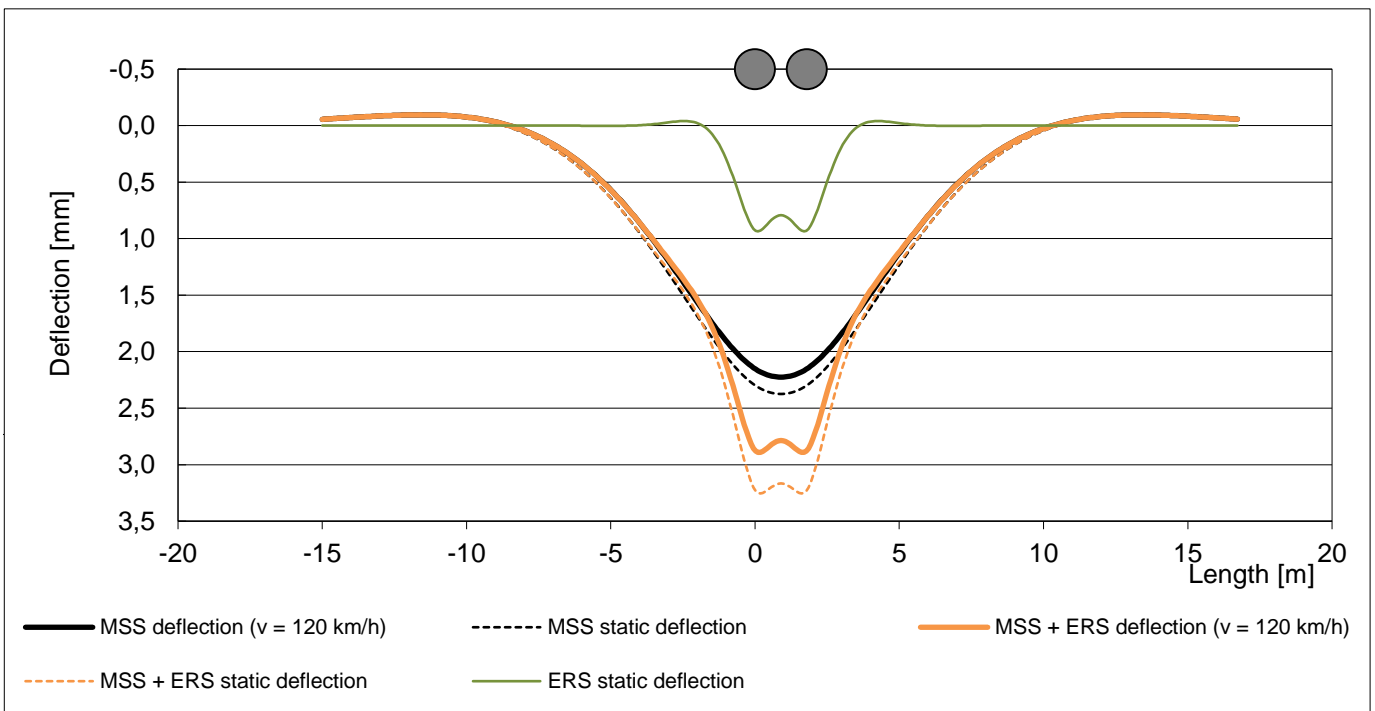
Max. stat. deflection of slab

superstructure without train	=	1,9 mm
superstructure + train	=	4,3 mm

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (MSS + ERS)

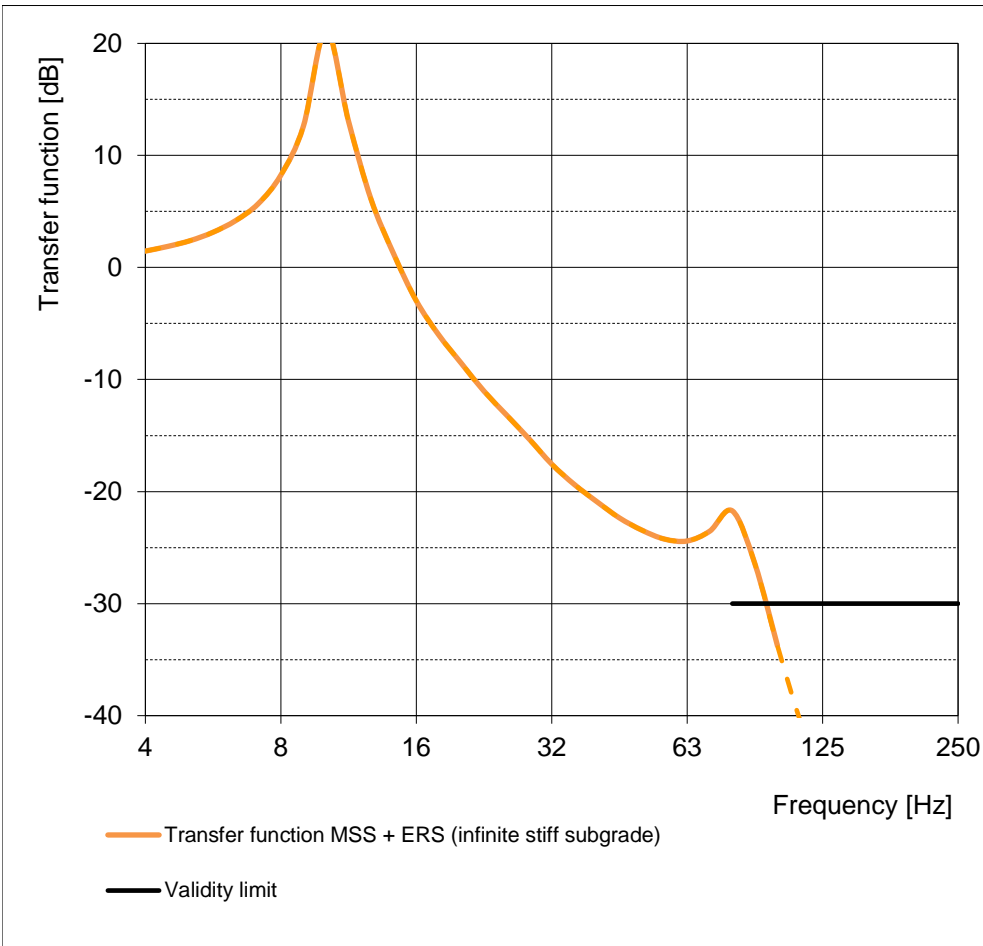
Max. rail deflection (MSS + ERS)

stationary train	=	3,3 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	2,9 mm



Calculation of the Natural Frequency

Natural frequency superstructure	=	11,9 Hz	(1-mass spring system; MSS)
Natural frequency superstr. + train	=	10,2 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
Natural frequency superstr. + train	=	82,9 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
eff. unsprung mass	=	2867 kg/m	
percent unsprung mass of train	=	15 %	(2)



f [Hz]	k [dB]	l [%]
4	1,5	-18,3
5	2,4	-31,9
6,3	4,2	-61,9
8	8,2	-158,2
10	21,2	-1049
12,5	6,1	-101,0
16	-3,0	29,0
20	-8,6	62,7
25	-13,2	78,1
32	-17,6	86,7
40	-20,9	91,0
50	-23,5	93,3
63	-24,4	94,0
80	-21,7	91,8
100		
125		
160		
200		
250		

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann
Calculation of the Natural Frequency

Input Parameter **Remark**

Vehicle:

axle load 1	$Q_1 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{12} =$	1800 mm	(2)
axle load 2	$Q_2 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{23} =$	0 mm	
axle load 3	$Q_3 =$	0 kN	
distance	$a_{34} =$	0 mm	
axle load 4	$Q_4 =$	0 kN	
velocity	$v =$	120 km/h	(1)

Rail: 60E2

moment of inertia	$I_s =$	3,02E+07 mm ⁴	(1)
Young's modulus	$E_s =$	2,10E+05 N/mm ²	(1)
section modulus	$W_u =$	3,75E+05 mm ³	(1)
mass per meter	$m_s =$	60,0 kg	(1)

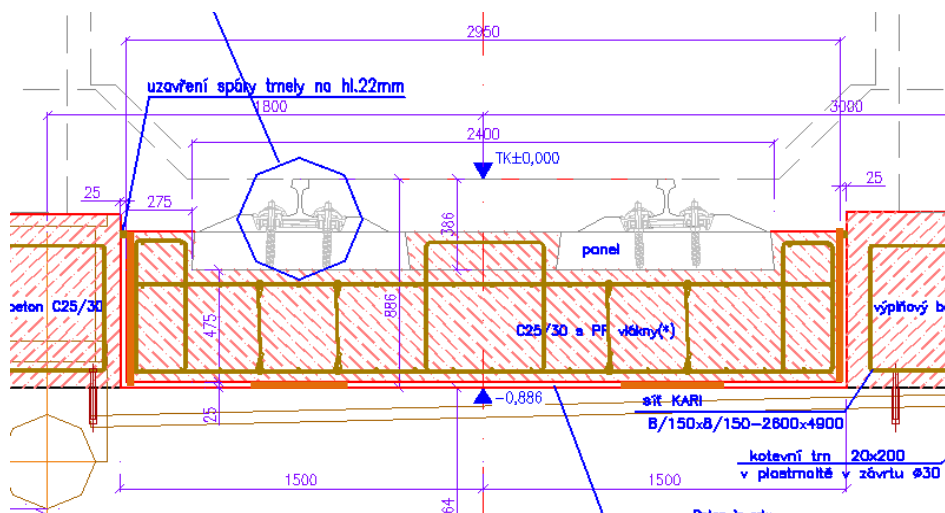
Embedded Rail System (ERS):

material: Sylomer / Sylodyn	BPP 40kN/mm		
thickness	$d_{zwp} =$	10 mm	(2)
stat. stiffness	$k_{zwp, stat} =$	40 kN/mm	(1)
dyn. stiffness	$k_{zwp, dyn} =$	60 kN/mm	(2) $k_{dyn} / k_{stat} = 1,5$
mechanical loss factor	$\eta_{zwp} =$	0,20	(2)

Rail fastening system:

support point distance	$a_{sch} =$	650 mm	(1)
mass of fastening system	$m_{st} =$	10 kg	(2)
system damping	$\eta_{System} =$	0,00	

Cross-section of slab:



List of references / Explanations:

- (1) according to technical informatino received per mail on 31.08.2018 and on 03.09.2018
- (2) assumed by Getzner Werkstoffe GmbH
- (3)
- (4)

Project: New LRT track Prague Dejvicka-Veleslavin
Product: Point bearing without side mats
Comment: Axle load 18t, straight line

Input Parameter	Remark
-----------------	--------

Concrete slab 1:

height	$h_1 =$	475 mm	(1)
width	$b_1 =$	1500 mm	(1) = 1500 mm - 25 mm
density	$\rho_1 =$	2500 kg/m ³	(2)
Young's modulus C25/30	$E_1 =$	26700 N/mm ²	(1)
moment of inertia	$I_1 =$	2,148E+10 mm ⁴	

Top layer:

height	$h_2 =$	160 mm	(1) Porr slab
width	$b_2 =$	1200 mm	(1) Porr slab
density	$\rho_2 =$	2400 kg/m ³	(2)

Total mass (without vehicle): = **2537 kg/m**

MSS bearing:

material: Sylomer / Sylodyn		MSS N6372	
length	$a_{MFS} =$	490 mm	
width	$b_{MFS} =$	490 mm	
thickness	$d_{MFS} =$	37,5 mm	
distance	$l_{MFS} =$	2775 mm	
stat. bedding modulus	$C_{MFS, stat} =$	0,061 N/mm ³	Evaluation area: 0,288 - 0,506 N/mm ²
dyn. bedding modulus	$C_{MFS, dyn} =$	0,081 N/mm ³	at 0,506 N/mm ² ; f = 7,9 Hz
mechanical loss factor	$\eta_{MFS} =$	0,08	

Side mats:

material: Sylomer / Sylodyn		no side mats	
height	$h_{MFS, seite} =$	0 mm	= 475 mm + 160 mm
thickness	$d_{MFS, seite} =$	0 mm	

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (only ERS)

Max. rail deflection (ERS)

stationary train	=	0,9 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	0,7 mm

Calculation of Slab Deflection acc. to Zimmermann (MSS)

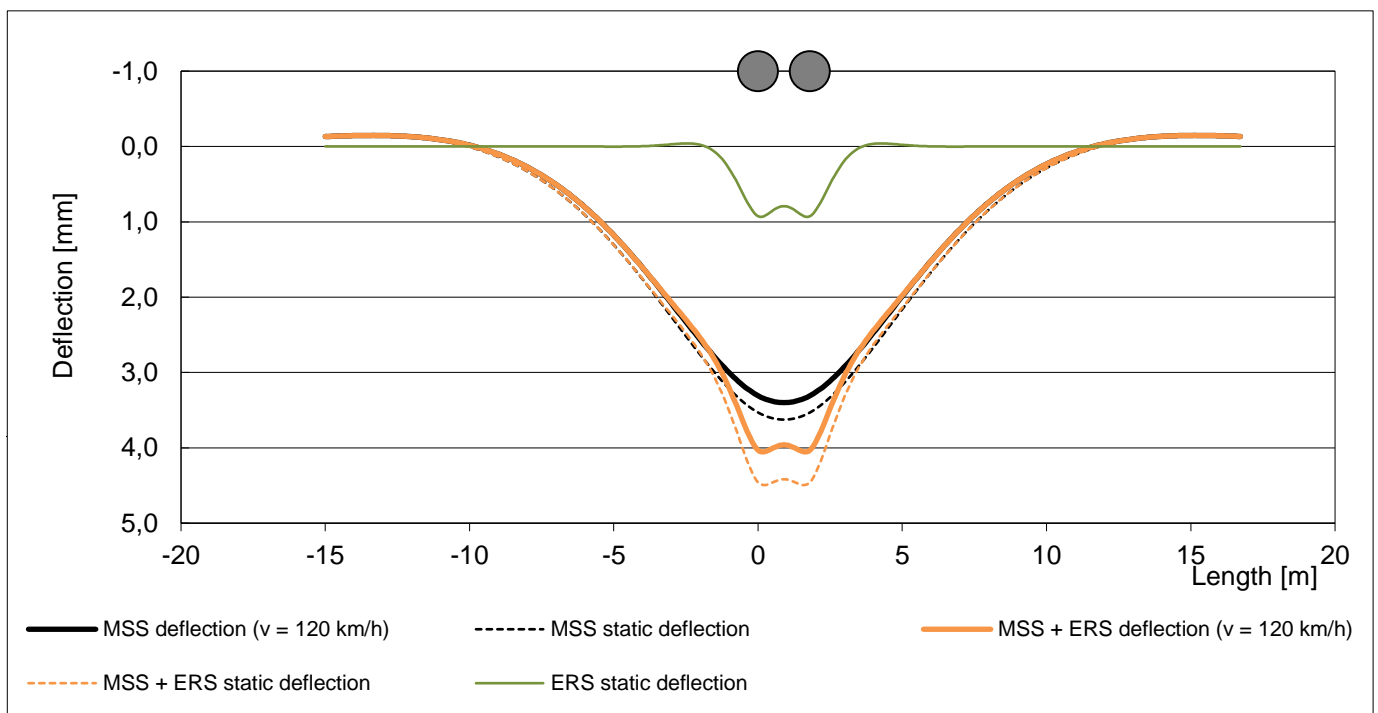
Max. stat. deflection of slab

superstructure without train	=	3,0 mm
superstructure + train	=	6,6 mm

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (MSS + ERS)

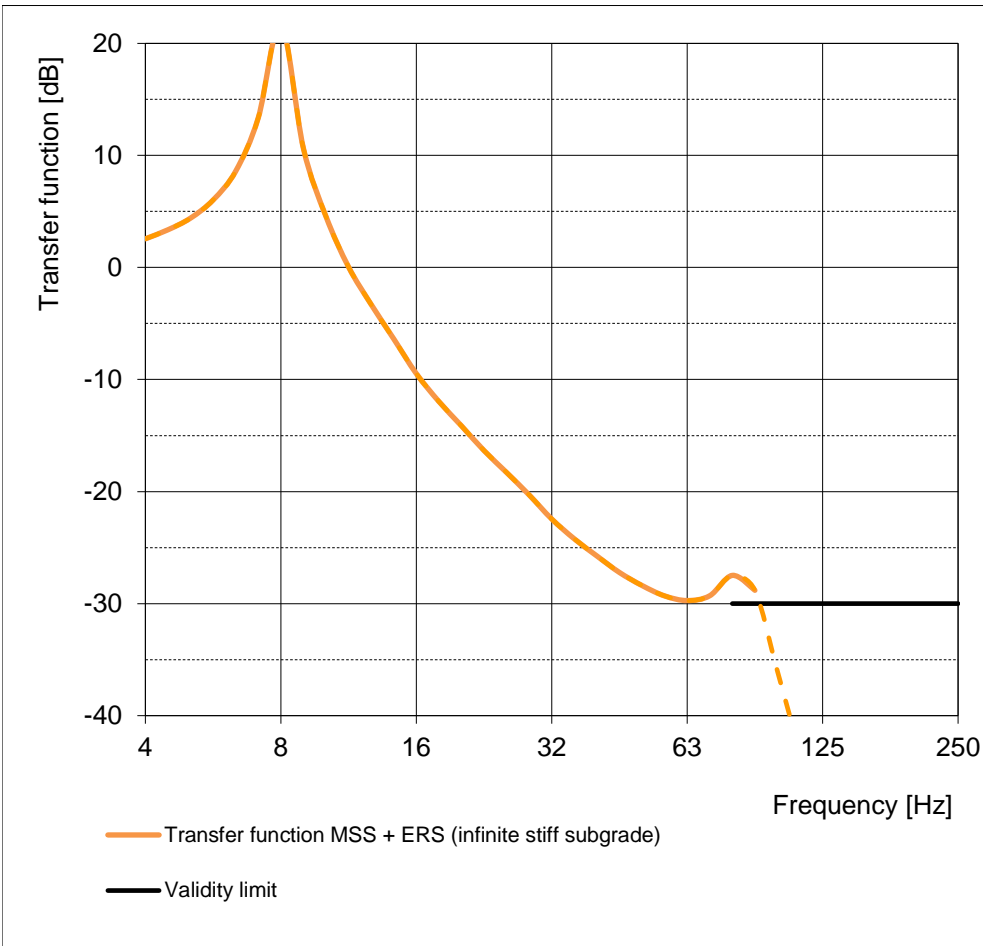
Max. rail deflection (MSS + ERS)

stationary train	=	4,5 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	4,1 mm



Calculation of the Natural Frequency

Natural frequency superstructure	=	9,1 Hz	(1-mass spring system; MSS)
Natural frequency superstr. + train	=	7,9 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
Natural frequency superstr. + train	=	86,7 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
eff. unsprung mass	=	2827 kg/m	
percent unsprung mass of train	=	15 %	(2)



f [Hz]	k [dB]	l [%]
4	2,6	-34,2
5	4,4	-66,0
6,3	8,6	-168,8
8	21,7	-1118,6
10	4,6	-69
12,5	-3,3	31,6
16	-9,5	66,4
20	-14,1	80,3
25	-18,3	87,8
32	-22,5	92,5
40	-25,7	94,8
50	-28,4	96,2
63	-29,7	96,7
80	-27,5	95,8
100		
125		
160		
200		
250		

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann
Calculation of the Natural Frequency

Input Parameter **Remark**

Vehicle:

axle load 1	$Q_1 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{12} =$	1800 mm	(2)
axle load 2	$Q_2 =$	180 kN	(1)
distance	$a_{23} =$	0 mm	
axle load 3	$Q_3 =$	0 kN	
distance	$a_{34} =$	0 mm	
axle load 4	$Q_4 =$	0 kN	
velocity	$v =$	120 km/h	(1)

Rail: 60E2

moment of inertia	$I_s =$	3,02E+07 mm ⁴	(1)
Young's modulus	$E_s =$	2,10E+05 N/mm ²	(1)
section modulus	$W_u =$	3,75E+05 mm ³	(1)
mass per meter	$m_s =$	60,0 kg	(1)

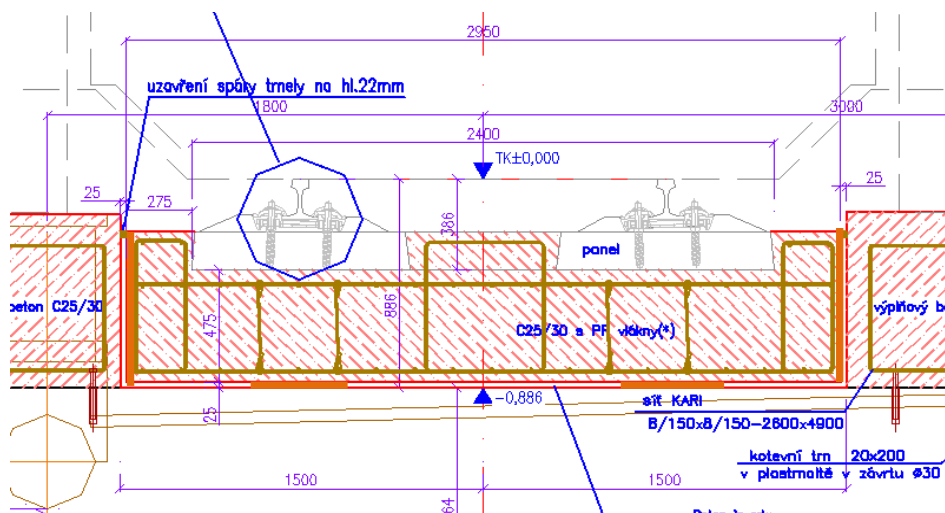
Embedded Rail System (ERS):

material: Sylomer / Sylodyn	BPP 40kN/mm		
thickness	$d_{zwp} =$	10 mm	(2)
stat. stiffness	$k_{zwp, stat} =$	40 kN/mm	(1)
dyn. stiffness	$k_{zwp, dyn} =$	60 kN/mm	(2) $k_{dyn} / k_{stat} = 1,5$
mechanical loss factor	$\eta_{zwp} =$	0,20	(2)

Rail fastening system:

support point distance	$a_{sch} =$	650 mm	(1)
mass of fastening system	$m_{st} =$	10 kg	(2)
system damping	$\eta_{System} =$	0,00	

Cross-section of slab:



List of references / Explanations:

- (1) according to technical informatino received per mail on 31.08.2018 and on 03.09.2018
- (2) assumed by Getzner Werkstoffe GmbH
- (3)
- (4)

Project: New LRT track Prague Dejvicka-Veleslavin
Product: Point bearing without side mats
Comment: Axle load 18t, straight line

Input Parameter	Remark
-----------------	--------

Concrete slab 1:

height	$h_1 =$	475 mm	(1)
width	$b_1 =$	1500 mm	(1) = 1500 mm - 25 mm
density	$\rho_1 =$	2500 kg/m ³	(2)
Young's modulus C25/30	$E_1 =$	26700 N/mm ²	(1)
moment of inertia	$I_1 =$	2,148E+10 mm ⁴	

Top layer:

height	$h_2 =$	160 mm	(1) Porr slab
width	$b_2 =$	1200 mm	(1) Porr slab
density	$\rho_2 =$	2400 kg/m ³	(2)

Total mass (without vehicle): = **2537 kg/m**

MSS bearing:

material: Sylomer / Sylodyn	MSS N6502		
length	$a_{MFS} =$	480 mm	
width	$b_{MFS} =$	480 mm	
thickness	$d_{MFS} =$	50 mm	
distance	$l_{MFS} =$	2775 mm	
stat. bedding modulus	$C_{MFS, stat} =$	0,045 N/mm ³	Evaluation area: 0,3 - 0,51 N/mm ²
dyn. bedding modulus	$C_{MFS, dyn} =$	0,057 N/mm ³	at 0,51 N/mm ² ; f = 6,5 Hz
mechanical loss factor	$\eta_{MFS} =$	0,08	

Side mats:

material: Sylomer / Sylodyn	no side mats		
height	$h_{MFS, seite} =$	0 mm	= 475 mm + 160 mm
thickness	$d_{MFS, seite} =$	0 mm	

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (only ERS)

Max. rail deflection (ERS)

stationary train	=	0,9 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	0,7 mm

Calculation of Slab Deflection acc. to Zimmermann (MSS)

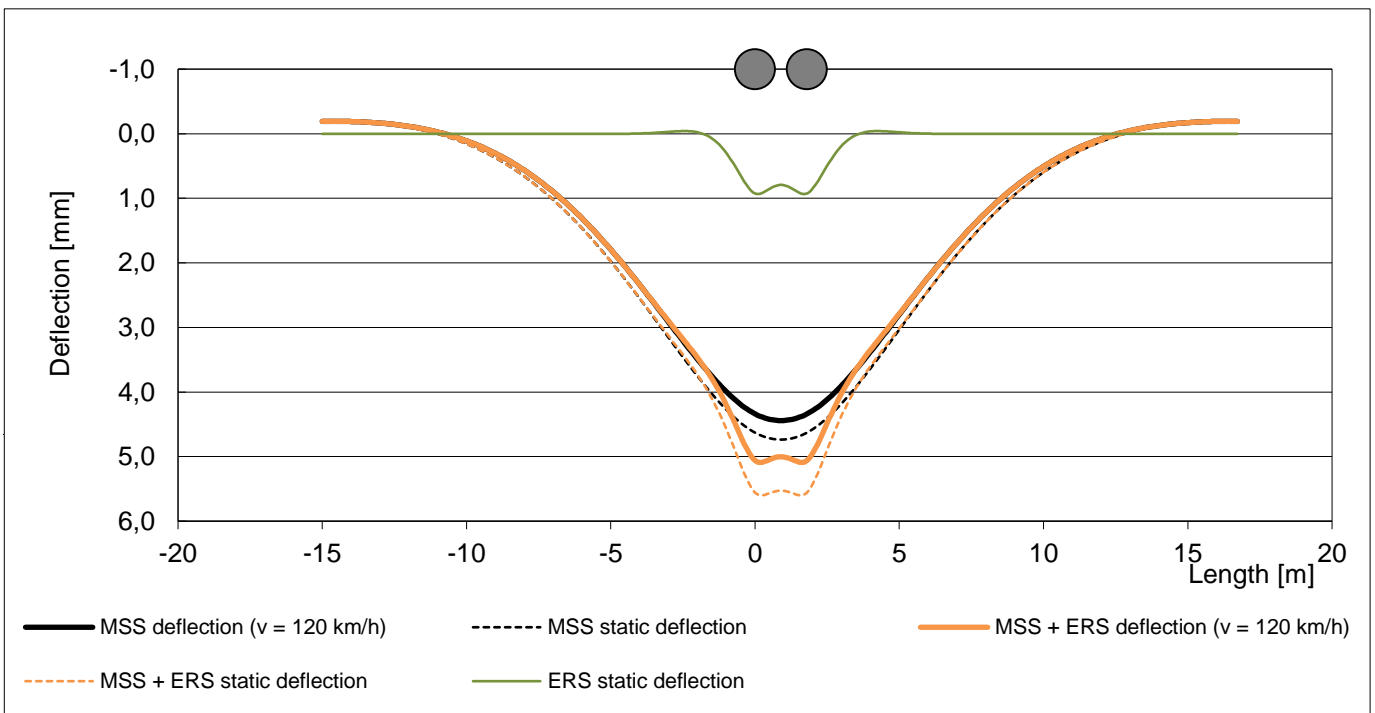
Max. stat. deflection of slab

superstructure without train	=	4,4 mm
superstructure + train	=	9,1 mm

Calculation of the Rail Deflection acc. to Zimmermann (MSS + ERS)

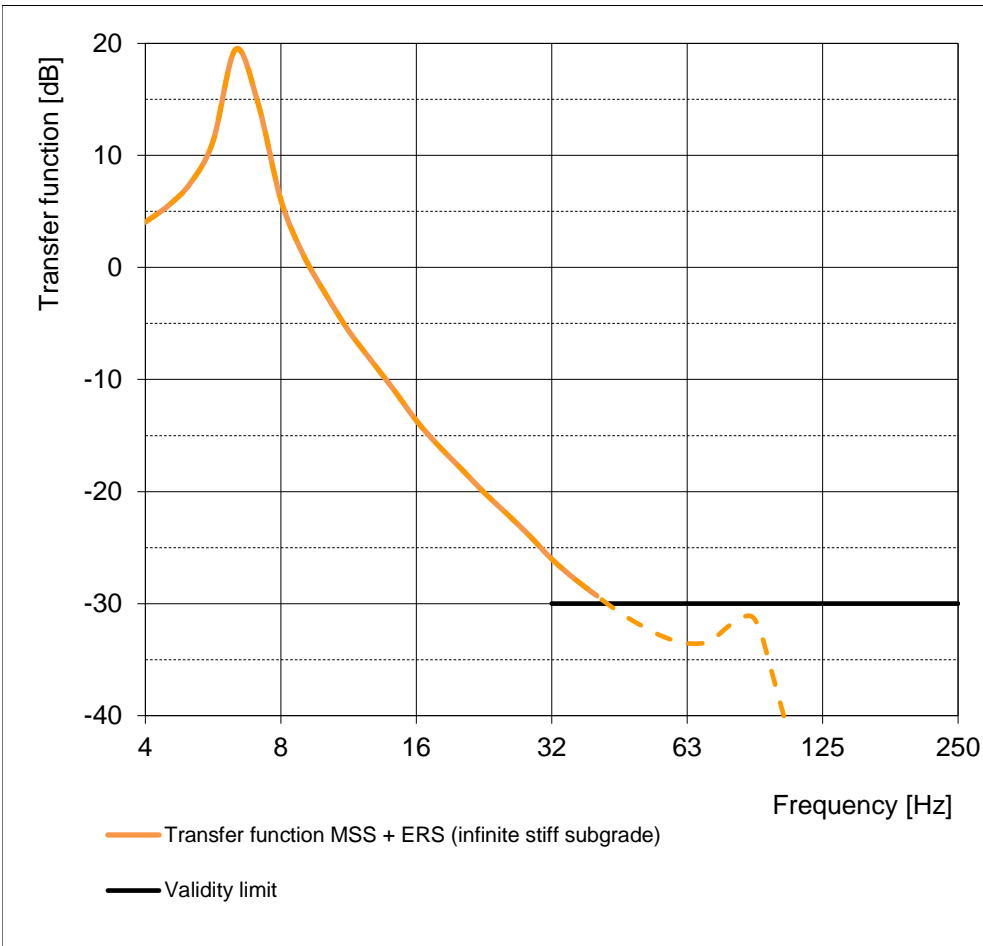
Max. rail deflection (MSS + ERS)

stationary train	=	5,6 mm
at velocity $v = 120$ km/h	=	5,1 mm



Calculation of the Natural Frequency

Natural frequency superstructure	=	7,5 Hz	(1-mass spring system; MSS)
Natural frequency superstr. + train	=	6,5 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
Natural frequency superstr. + train	=	89,1 Hz	(2-mass spring system; MSS + ERS)
eff. unsprung mass	=	2804 kg/m	
percent unsprung mass of train	=	15 %	(2)



f [Hz]	k [dB]	l [%]
4	4,0	-59,4
5	7,5	-138,1
6,3	19,5	-841,2
8	6,0	-100,5
10	-2,4	24
12,5	-8,3	61,5
16	-13,7	79,2
20	-18,0	87,4
25	-22,0	92,0
32	-26,0	95,0
40	-29,3	96,6
50		
63	-33,5	97,9
80		
100		
125		
160		
200		
250		