



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**PORUCHY NÁSYPOVÝCH TĚLES ŽELEZNIČNÍHO
SPODKU SPOJENÉ S JEJICH POSTUPNÝM
ROZŠIŘOVÁNÍM**

DEFECTS OF RAILWAY EMBANKMENTS RESULTING FROM THEIR WIDENING IN THE PAST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivana Buzgóová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Jan Štefaňák, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geotechniky
Studentka: **Bc. Ivana Buzgóová**
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Jan Štefaňák, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Poruchy násypových těles železničního spodku spojené s jejich postupným rozšiřováním

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

- rešerše historického vývoje šířky násypů na železničních tratích na území ČR,
- rešerše metod sanací svahů těles železničního spodku,
- příklady konkrétních provedených sanačních opatření,
- návrh a posouzení sanace konkrétního zvoleného úseku železniční trati

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je zpracování rešerše historického vývoje násypů na železničních tratích na území ČR, na kterou bude navazovat návrh a posouzení sanace konkrétního zvoleného úseku železniční trati.

Seznam doporučené literatury a podklady:

KREJČIŘÍK, Mojmír, 1991. Po stopách našich železnic. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů. ISBN 80-703-0061-2.

SPRÁVA ŽELEZNIC, 2021. SŽ S4 - Železniční spodek. Praha: Správa Železnic, státní organizace - Odbor traťového hospodářství.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 15. 3. 2022

L. S.

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. et Ing. Jan Štefaňák, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Prvá kapitola diplomovej práce popisuje špecifiká výstavby násypových telies v minulosti, ktoré tvoria základ pre lepšie porozumenie ďalších kapitol. Následne je opísaný vývoj šírkových pomerov železničnej pláne od obdobia prvých železníc (počiatky 19. storočia) až po súčasnosť. Kvôli predpokladu vzniku porúch železničných násypov vplyvom historického vývoja opisuje samostatná kapitola rozličné lokality v rámci Českej republiky, kde došlo k svahovým deformáciám násypových telies. Popis obsahuje okrem samotných porúch aj prevedené sanácie daných úsekov. Samostatná kapitola pojednáva o metódach sanácií násypových telies podľa platného predpisu SŽ S4.

V praktickej časti diplomovej práce bolo navrhnuté konkrétne sanačné opatrenie nevyhovujúceho násypového telesa v obci Česká Kamenice (okres Děčín). V rámci tejto časti bola prevedená numerická simulácia v programe Plaxis 2D. Práca popisuje vstupné údaje modelu ako aj získané výsledky.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Historický vývoj železničného spodku, poruchy násypových telies, sanácie násypových telies, Plaxis 2D, numerické modelovanie

ABSTRACT

First chapter of this master's thesis describes specific features of railway embankments in the past and it creates basics for appropriate understanding of following parts. Next, historical development of dimensions of railway platform is introduced. Historical development of dimensions is expected to be a possible reason in field of defects of embankments. Separate chapter refers to various locations in Czech republic where defects of railway embankments can be detected. Description contains not only defects of embankments but also ways of rehabilitation that were performed. Subsequently, the methods of rehabilitation of railway embankments are stated in regard to SŽ S4.

In second part of the master's thesis, rehabilitation arrangement of particular railway embankment is designed. It is situated in Česká Kamenice in Děčín region. A numerical simulation of embankment is carried out in Plaxis 2D. The description of model and acquired results are given.

KEYWORDS

Historical development of subgrade, defects of railway embankments, rehabilitation of railway embankments, Plaxis 2D, numerical modelling

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

Bc. Buzgóová, Ivana. *Poruchy násypových těles železničního spodku spojené s jejich postupným rozšiřováním*. Brno, 2023. 81 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Jan Štefaňák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci s názvem *Poruchy násypových těles železničního spodku spojené s jejich postupným rozšiřováním* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2023

.....
Bc. Ivana Buzgóová

POĎAKOVANIE

Chcela by som poďakovať vedúcemu tejto diplomovej práce, Ing. et. Ing. Jan Štefaňák Ph.D., za jeho cenné rady, trpezlivosť a pomoc pri vypracovaní záverečnej práce. Poďakovanie patrí aj Ing. Pavlovi Koudelovi za priblíženie výpočtových postupov programu Plaxis 2D. Veľká vďačnosť patrí spoločnosti DIPONT s.r.o. za poskytnutie podkladov k vypracovaniu záverečnej práce. Za neutíchajúcu podporu počas celého štúdia ďakujem najmä mojej rodine a priateľom.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	Historická výstavba násypových telies.....	11
3	Historický vývin šírky násypových telies.....	19
3.1	Obdobie konskej železnice (1825 - 1853).....	19
3.2	Počiatky parostrojových dráh (1837 - 1841).....	21
3.3	Obdobie rokov 1845 – 1880.....	22
3.4	Obdobie od roku 1885.....	23
3.5	Medzivojnové obdobie (1919 - 1945).....	25
3.6	Povojnové obdobie (od roku 1945).....	27
3.7	Súčasnosť	28
4	Príklady porúch násypových telies v Českej republike	31
4.1	Hájek – Dalovice.....	31
4.2	Kněžice.....	37
4.3	Litochovice nad Labem.....	42
4.4	Pastuchovice.....	45
5	Opatrenia prevedené Správou železníc Českej republiky	48
6	Metódy sanácií zemných telies železničného spodku	49
6.1	Založenie násypu.....	52
6.2	Teleso násypu	54
6.2.1	Násyp zo súdržných zemín	54
6.2.2	Násyp z nesúdržných zemín.....	54
6.2.3	Násyp zo špeciálnych materiálov a konštrukcií	55
6.3	Ochrana svahov	55
6.3.1	Vegetačná ochrana	56
6.3.2	Technická ochrana	56
6.3.3	Kombinovaná ochrana	58
7	Návrh a posúdenie sanácie konkrétneho železničného násypu	59
7.1	Lokalita a identifikačné údaje	59
7.2	Geomorfologické a geologické pomery	60
7.3	Popis vzniknutých problémov.....	61

7.4	Sanácie úseku	64
7.5	Metodika a parametre výpočtu	65
7.5.1	Základné charakteristiky 2D modelu	65
7.5.2	Vibrované štrkové piliere	65
7.5.3	Parametre materiálov	69
7.5.4	Zaťaženie od koľajovej dopravy	70
7.5.5	Betónový podval	71
7.5.6	Konsolidačná vrstva vystužená geosyntetikom	71
7.5.7	Založenie na pilótach	72
7.6	Fázy výpočtu	72
7.7	Posúdenie stability.....	75
8	ZÁVER.....	78
9	POUŽITÁ LITERATÚRA.....	79

1 ÚVOD

V súčasnosti je možné badať poruchy až kolapsy násypových svahov naprieč celou Českou republikou. Príkladom je masívny zosuv zemného telesa v úseku Hájek – Dalovice. V týchto situáciách je nutné zamýšľať sa nad všetkými faktormi, ktoré môžu ovplyvňovať takéto katastrofy a premýšľať nad poškodeným územím ako nad celkom. Vznik oblastí svahových deformácií môže byť kombináciou viacerých faktorov.

Práca sa snaží priblížiť výstavbu železničných násypov v minulosti so zreteľom na celkový vývoj výstavby železníc na území ČR. Cieľom je poukázať na vývin šírkových pomerov železničnej pláne či sklonov svahov násypov a stavebných metód. Tieto nemuseli byť vždy realizované vhodným spôsobom, čo môže viesť k dnešným poruchám. Pri akejkoľvek analýze existujúceho geotechnického diela je nutné venovať pozornosť aj jeho histórii. Nie je na mieste podceňovať inžiniersko-geologický prieskum a štúdium všetkých dostupných podkladov. Každé stavebné dielo tvorí komplexný celok, v ktorom nastáva súhra čiastkových elementov.

V minulosti bol pri výstavbe tratí častokrát kladený dôraz na úpravy a zmeny železničného zvršku, pričom boli opomínané ostatné dôležité prvky správne fungujúcej železničnej trate. „Pravidla technického provozu železnic“ z roku 1954 ustanovujú: „Železniční spodek je jednou ze základních složek tratí a na jeho dobrém stavu závisí bezvadnost celé trati.“ Jednotlivé časti železničného spodku spolu úzko súvisia a ich riešenie by malo byť prepojené. Dnes sa pojmom železničný spodek rozumie: teleso železničného spodku, stavby železničného spodku, dopravné plochy a komunikácie, drobné stavby a zariadenie železničného spodku [1].

Každý úsek, kde dôjde k poruchám je nutné vyšetriť a koncipovať spôsob nápravy. Metódy sanácie môžu byť rozmanité a ich výber sa odvíja od pomerov daného problematického úseku. Projektantovi v tomto napomáha predpis SŽ S4, ktorý popisuje možné spôsoby sanácií konkrétnych porúch.

2 Historická výstavba násypových telies

Pre správne porozumenie a definovanie možných porúch násypových telies je najprv nutné predostrieť to ako sa v minulosti takéto zemné telesá budovali. Kapitola poukazuje na jednotlivé špecifiká, ktoré zohrávajú dôležitú úlohu pre správne fungovanie železničného spodku kam sa radia aj násypové telesá.

V minulosti nebol kladený dostatočný dôraz na výstavbu železničného spodku, o čom svedčia jeho rôzne poruchy na celoštátnych tratiach. Najčastejšie dochádza k problémom spôsobeným nesprávnym odvodnením, sypaním násypov, nesprávnym založením či nedostatočným zhutnením jednotlivých vrstiev násypu. Netreba zabúdať, že časti železničného spodku sú prepojené a pri jeho navrhovaní je nutné premýšľať nad samotnou výstavbou ako nad jedným celkom. Napríklad akokoľvek kvalitný materiál násypového telesa nemusí byť dostačujúci, ak nie je sypanie prevádzané s ohľadom na povahu toho daného materiálu alebo ak nie je zvolený správny zhutňovací mechanizmus.

Dôležitým prvkom železničného spodku bola neodmysliteľne železničná pláň tvoriaca podporu železničného zvršku, ktorá prenášala aj jeho zaťaženie a mohla byť vytváraná vo vykopanom záreze alebo z nasypaného zemného telesa či priamo na pôvodnom teréne. Násyp sypaný z ílov či ílovitých zemín bol prípustný, ale potom tento materiál nebolo možné použiť aj na vybudovanie železničnej pláne. Ak sa mal ílovitý materiál použiť na výstavbu podložia násypu, tak samotný násyp musel byť z priepustných zemín akými sú napríklad piesky, štrkopiesky či štrky. Aby bola železničná pláň dostatočne únosná bolo nutné zabezpečiť odtok povrchovej vody, nedochádzalo tak k narušovaniu jej stability. Pláň sa upravovala v priečnom aj v pozdĺžnom smere. V priečnom smere bola upravovaná do strechovitého sklonu od stredu pláne k jej okrajom a v pozdĺžnom smere vždy podľa projektovaného sklonu. Upravovaná pláň nesmela vykazovať žiadne trhlinky, tie mohli byť spôsobené dlhotrvajúcim suchom, ale mohli poukazovať i na nesprávne zvolenú výšku vrstvy či nesprávne zvolený zhutňovací stroj. Vytvorená pláň musela byť udržiavaná, aby sa na nej nezdržiavala voda, nevznikali prepadnuté miesta a aby sa na nej neusadzovala vegetácia. Šírkové pomery pláne v staniách dosahovali väčších rozmerov ako v širšej trati [2].

Ďalším významným aspektom fungujúceho železničného spodku bolo správne navrhnuté odvodnenie. Jeho úlohou bolo odvieť vody, povrchové i spodné, mimo železničný spodok. Odvodňovacie systémy boli navrhované v priečnom aj v pozdĺžnom smere. Budované boli predovšetkým trativody v pláni či priekopy dráhy pozdĺž pláne. Spodná voda bola odvádzaná trativodmi alebo odvodňovacími štôľňami a rebrami pri väčších prítokoch [2].

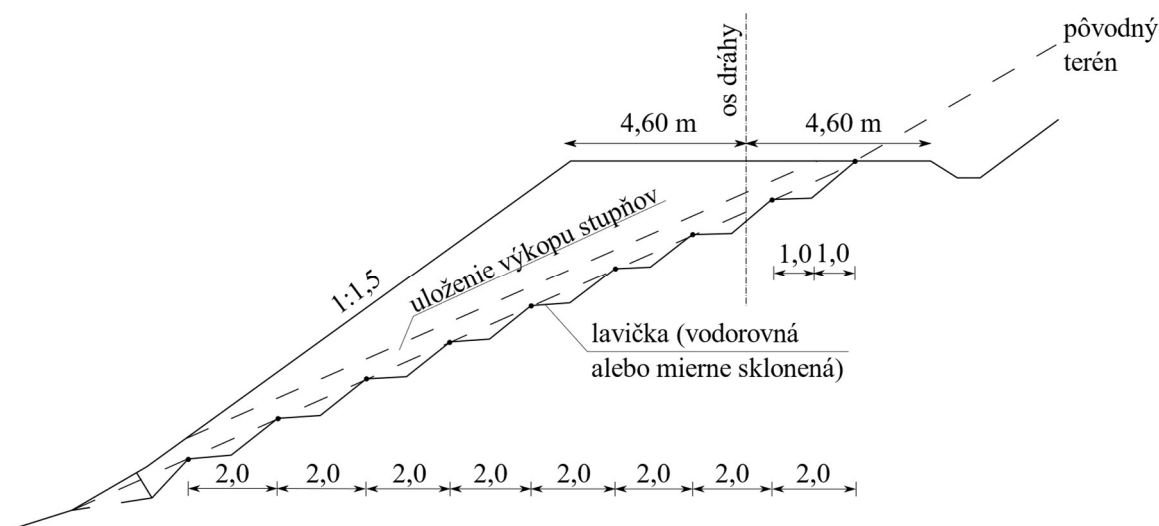
Nie každý materiál bol vhodný na výstavbu násypového telesa, a preto Tabuľka 2.1 poukazuje na vhodnosť či nevhodnosť, prípadne podmienené použitie daných zemín do samotných násypov alebo do ich podložia.

Tabuľka 2.1: Materiály používané do násypov a do podložia násypových telies [2].

Typ materiálu	Vhodnosť použitia	
	násyp	podložie
Zemina s organickými zložkami	Nevhodná kvôli obsahu kyselín.	Nevhodná kvôli obsahu kyselín.
Hlina Spraš	Vhodná, ak ukladaná do vrstiev a správne zhutňovaná.	Vhodná za predpokladu zamedzenia prístupu akejkoľvek vody.
Íl	Kedysi pokladaný za nevhodný, je však vhodný, ak sú dodržané dané technologické zásady a postupy.	Vhodný ak je suchej povahy, ale na styku so skalným podložím môže vytvárať klzné plochy.
Slieň	Nevhodný kvôli nepriaznivému správaniu po nasýtení vodou ale aj po vysušení.	Vhodný i nevhodný, nutné postupovať podľa konkrétnych odborných posudkov.
Prach	Vhodný len ako prímes do hlinitých násypov.	Nutné doplnenie napr. pilótového založenia.
Piesok	Vhodný piesok čistý, hlinitý aj umelý za predpokladu overenia podielu hlinitých zložiek.	-
Štrk	Vhodný – najlepší násypový materiál.	Vhodný.
Suť	Podmienečne vhodná ale nutné očistiť od organických látok.	Nebezpečná.
Bahno	Nevhodné – pórovitosť, nasiakavosť, poddajnosť, vysychavosť a zmršťovanie.	Nevhodné.

Pred výstavbou samotného násypu bolo nutné upraviť jeho podložie, čo aj dnes predstavuje kľúčovú úlohu v ďalšom budovaní násypov alebo zárezov. Mohlo sa jednať o úpravu podložia na únosných (súdržné, sypké a prípadne skaly nerozrušené vodou) či neúnosných zeminách (tečúce piesky, prachy, bahná, rašeliny a rozbahnené súdržné zeminy, íly a sliene ovplyvnené podzemnou vodou v strmých svahoch). Pred samotnou výstavbou sa sondami overilo zloženie pôdy, ich únosnosť a hladina podzemnej vody. Pri únosných zeminách postačovalo previesť stupňovanie zobrazené na Obrázku 2.1, zatiaľ čo neúnosné zeminy si vyžadovali úpravu, ktorá sa odvíjala od charakteru zeminy a jej

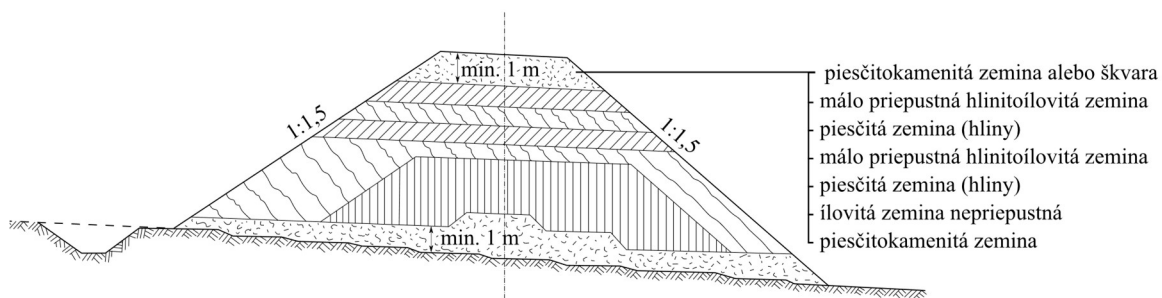
únosnosti. V minulosti dochádzalo k opomínaniu dôležitosti vhodnosti podložia. Stupňovanie sa neprevádzalo podľa normálnych plánov železničného spodku, odstránenie koreňov a humusu nebolo prevedené s dostatočnou kvalitou, neboli vhodne upravené pätky násypov alebo nebolo zabezpečené dostatočné odvodnenie. Často dochádzalo k problémom hneď po výstavbe a zaťažení násypu. Svahové stupne bolo nutné zriaďovať na celú plochu a vždy pri strmších svahoch alebo pri prisypávaní na staršie násypy. Lavičky stupňov boli široké asi 1,0 m a mohli byť vytvárané ako vodorovné (u nepriepustných zemín) alebo ako mierne sklonené (u priepustných zemín). Sklon od 1 % do 3 % sa prevádzal kvôli povrchovej vode prenikajúcej do násypu, ktorá mohla vytvárať klzné plochy, ak zotrúvala na stupňoch. Stupne bolo nutné zriaďiť aj vtedy, ak sa zemina nasypávala kvôli rozšíreniu alebo kvôli výstavbe druhej koľaje. Akákoľvek voda, ktorá sa objavila pri prevádzaní stupňov, musela byť odvedená trativodom. Pätky násypu museli byť zapustené a vyhlíbené časti vyplnené priepustným materiálom ako je kameň, štrk, piesok alebo škvara. Ak podložie nebolo dostatočne únosné, tak sa prevádzalo spevnenie. U hlinito-ílovitých svahov to bolo valcovanie, ílovité podložie bolo nutné upraviť tak, aby ho z podložia nevytlačila vlastná váha násypu napríklad sploštením svahu či výstavbou protinásypov. Nevhodnú zeminu, ktorú nebolo možné zlepšiť, bolo nevyhnutné odťažiť a nahradiť inou, čo bolo vždy finančne nákladné. Pri zeminách bahňitého a rašelinového charakteru bolo veľmi náročné zabezpečiť požadovanú únosnosť, možné spôsoby spevnenia takýchto materiálov boli finančne aj technologicky náročné, a preto bolo vždy najpriateľnejšie zmeniť trasovanie a nezakladať násypy v takýchto geologických pomeroch [2].



Obrázok 2.1: Svahové stupne [2].

Samotné násypy sa prevádzali sypaním, na základe metódy sypania to mohli byť násypy voľne sypané alebo násypy umelo zhutňované. Technologický postup bol stanovený na základe geologických vlastností zemín a určenej nosnosti násypov. Aby však teleso spĺňalo všetky požiadavky na neho kladené bolo nutné správne upraviť podložie

násypu. Násypy, ktoré boli sypané voľne, bez zhutnenia na celú výšku, smeli byť sypané len z rozpojených skál. Tieto nesmeli meniť svoje vlastnosti pôsobením podzemnej vody či tlakom budúceho zaťaženia. V minulosti sa prevádzali násypy sypané na celú výšku aj zo sypkých zemín, tie sa už nesmú prevádzať približne od polovice 20. storočia. Takéto násypy boli stavané s projektovaným navýšením, no dlhodobo na nich bolo možné pozorovať ďalšie sadanie a deformácie. Na takýchto telesách dochádzalo k častým sanáciám vo forme opakujúcich sa dosypávaní či úprav nivelety. Pri dosypávaní ďalšieho materiálu bolo nutné tento materiál dosypať vo vrstvách a dodržať určenú výšku vrstvy. Hrúbka sanačnej vrstvy závisela nielen na vlastnostiach dosypávanej zeminy, ale aj na spôsobe zhutnenia a zvolenom zhutňovacom prostriedku. Pre výšku vrstvy platila zásada daná praktickými skúsenosťami a laboratórnymi skúškami, že celková výška vrstiev tvorených zo zemín nepriepustných musela byť menšia ako celková výška vrstiev zo zemín priepustných [2]. Obrázok 2.2 zobrazuje príklad ako mohol byť sypaný násyp a akým spôsobom bolo uložené jadro násypu v telese.



Obrázok 2.2: Príklad umiestnenia násypového jadra [2].

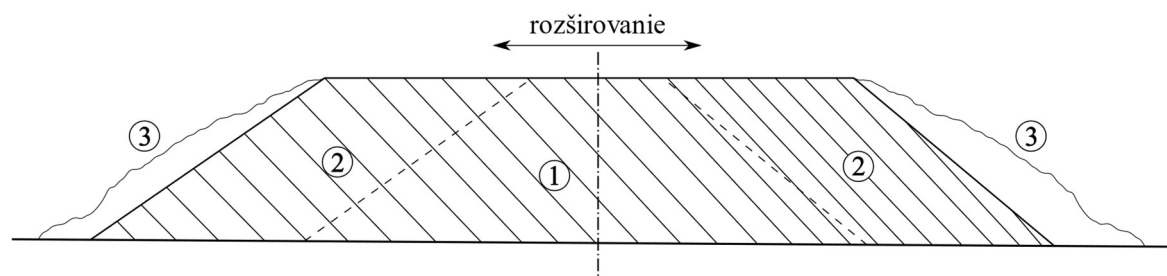
Najčastejšie chyby pri výstavbe násypových telies:

- do jadra násypu sa použili priepustné zeminy, no nebol zabezpečený odvod vody z telesa násypu,
- íly a ílovité zeminy boli ukladané priamo na upravené podložie alebo na celú šírku telesa, ich vrstvy bývali relatívne vysoké a na zhutnenie nebol zvolený správny zhutňovací stroj,
- pri jadrách násypov z nepriepustných zemín nebolo prevedené odstupňovanie a zazubenie do vrstiev z priepustných zemín – správne by mala byť najväčšia hrúbka jadra v strede a mala by klesať k okrajom, pričom povrch nepriepustného jadra mal byť uložený v strechovitom sklone od jeho stredu [2].

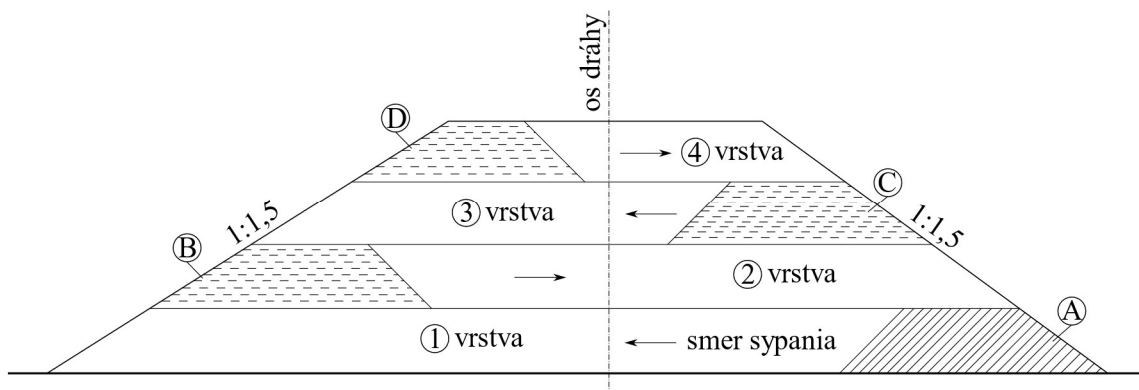
Podľa typu zeminy (jej geologických vlastností a pôdneho laboratórneho výskumu) boli stanovené výšky sypaných vrstiev násypu. Dôležitým aspektom bolo zhutňovanie vrstiev, ktoré sa prevádzalo vyvinutím špecifického tlaku. Ten bol volený na základe výšky celého násypu a celkového zaťaženia, ktoré na neho pôsobilo. Podľa tlaku boli stanovené objemové váhy taktiež nazývané rovnovážne objemové váhy. Jednalo sa o tabuľkovú hodnotu podľa druhu zeminy. Zhutňovala sa každá vrstva v celej svojej výške a proces

zhutnenia mal byť prevádzaný hneď ako bolo možné vrstvu zaťažiť zhutňovacím strojom. Samotný proces bol dôležitý najmä preto, že ním dochádzalo k urýchleniu sadnutia. To sa dialo vtláčaním jemnejšej zeminy do jednotlivých pórov, čo zamedzilo skorší prístup vody do pórov. Vyplnením póru tak bolo zväčšované celkové vnútorné trenie, to viedlo k lepšiemu prenosu vonkajšieho zaťaženia i zaťaženia od ďalších vrstiev násypu. Dôležitý bol aj výber správneho zhutňovacieho prostriedku pre daný typ zeminy. Pri sypkých zeminách bolo vhodné použiť ubíjacie stroje (ručné, doskové alebo výbušné), vibračné či striasacie stroje. Pre súdržné zeminy boli vhodným zhutňovacím prostriedkom valce [2]. Zo stavebného hľadiska bolo možné rozlišovať násypy sypané ručne alebo strojne. Podľa spôsobu nasypovania a zriadenia samotného telesa to mohli byť násypy sypané šikmo (pozri Obrázok 2.3), vodorovne (pozri Obrázok 2.4 a Obrázok 2.5) alebo násypy sypané z lešenia (pozri Obrázok 2.6). Pri šikmom alebo úklonnom sypaní násypu bolo teleso zriadené naraz v celej svojej výške. Vodorovné, vrstevnaté, sypanie násypu znamenalo sypanie násypu po jednotlivých vrstvách a bolo používané hlavne pri sypkých a súdržných zeminách. Ako najlepší spôsob sa osvedčilo sypanie materiálu od okrajov k jadrú, pretože to zaistilo prirodzený odtok povrchovej vody. Pri sypaní ďalších vrstiev bolo vždy nutné uistiť sa či sa na vrstve nenachádza stojatá voda, ktorá by mohla vsiaknuť do nasledujúcej vrstvy. Tá mohla spôsobiť vlhnutie spodnej vrstvy po procese zhutnenia. Sypanie pomocou lešenia bolo prevádzanie z drevených či oceľových konštrukcií nazývaných aj bárky. Tie sa budovali ako pevné pilotované konštrukcie, ktorých spodná časť ostávala natrvalo zabudovaná v násypoch alebo ako prenosné stavebné kozy, tie boli celé odstránené z hotového násypu. Sypanie z lešenia sa prevádzalo na celú výšku telesa násypu a konštrukcia bola výškovo budovaná v úrovni budúcej nivelety pláne [2].

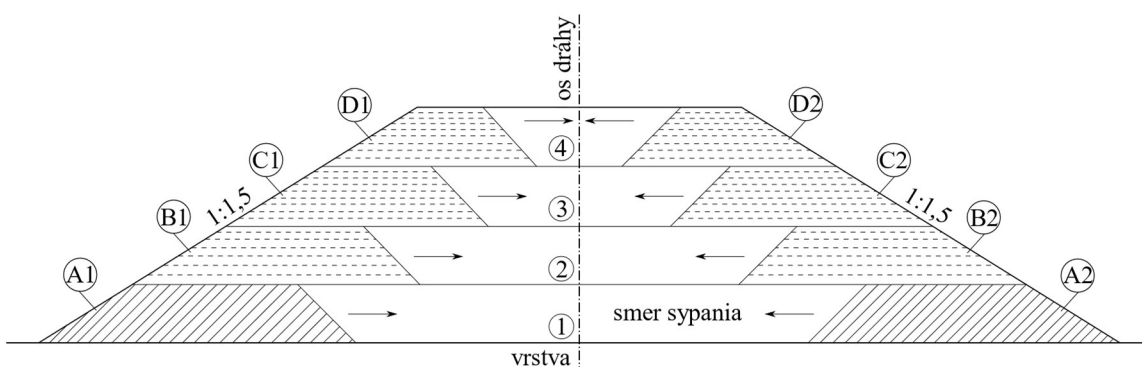
Výstavbu násypov ovplyvňovalo aj nakyprenie zemín a skál. Táto vlastnosť popisuje, že zeminy alebo skály po rozpojení naberajú na svojom objeme. Takéto nakyprenie môže mať prechodnú alebo trvalú povahu, pričom prechodné nakyprenie je len dočasné a zaniká časom alebo okamžite kvôli zhutneniu vrstvy. Z tohto hľadiska bolo nutné teoretické tvary násypov dané priečnymi profilmi budovať ako rozšírené a prevýšené. Hodnoty boli dané tabuľkovo a pohybovali sa v desiatkach centimetrov podľa typu zeminy násypu a tvaru terénu pod násypom (vodorovný alebo sklonený) [2].



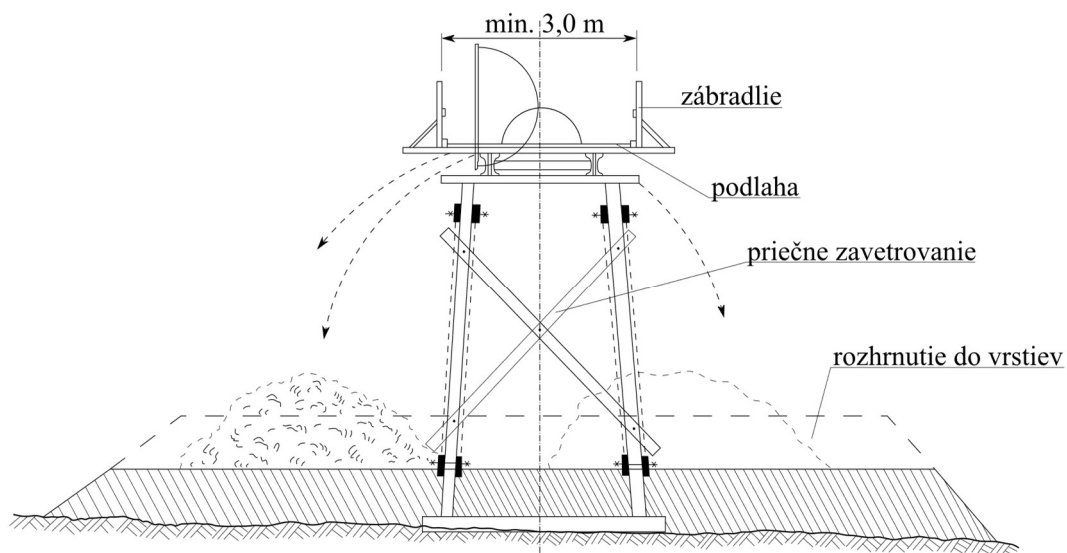
Obrázok 2.3: Šikmé sypanie násypu, kde 1 – 3 udáva poradie sypaných častí [2].



Obrázok 2.4: Vrstevnaté sypanie násypu pri jednej rozvoznej koľaji, kde A až D predstavujú počiatočné rampy v jednotlivých vrstvách [2].



Obrázok 2.5: Vrstevnaté sypanie násypu pri dvoch rozvozných koľajách, A1 až D1 a A2 až D2 predstavujú počiatočné rampy v každej vrstve [2].



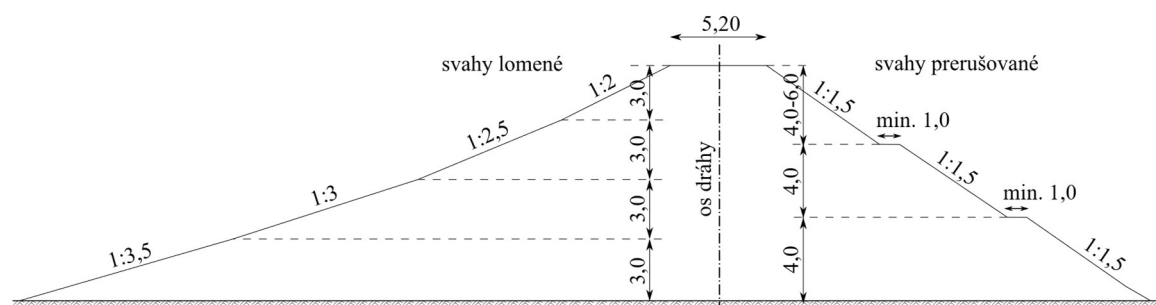
Obrázok 2.6: Sypanie násypu z lešenia (v priečnom reze) [2].

Ďalším dôležitým parametrom pri výstavbe násypu bol sklon svahu, ktorý závisel od typu zemin (jej vlastností), od zaťaženia pôsobiaceho na teleso a od únosnosti podlažia. Každá zemina má svoj uhol prirodzenej sklonitosti, čo je sklon svahu, pri ktorom sa zemina

po zaťažení udrží vlastnou tiažou. Túto skutočnosť zabezpečujú fyzikálne a geologické vlastnosti zemín, no sklonitosť môže klesať s meniacimi sa poveternostnými vplyvmi ako je mráz či vlhkosť. Pôsobením zaťaženia na násyp dochádza taktiež k zmenšeniu prirodzenej sklonitosti zemín. Sklony sa prvotne určovali podľa tabuliek a praktických skúseností až následne za pomoci pôdneho prieskumu. Použitie tabuľkových hodnôt bolo limitované len pre zeminy odpovedajúce presným podmienkam, za ktorých boli tieto tabuľky zostavené. V prípade iných zemín (prevažne hĺn, pieskov a štrkov, ktoré neboli pod pôsobením podzemnej vody) sa určovali sklony svahov podľa Normálnych plánov železničného spodku a Dopĺňajúcich študijných plánov železničného spodku. Jednotlivé používané sklony svahov zobrazuje Tabuľka 2.2. Vo všeobecnosti platilo, že sklony násypových svahov musia byť viac ploské ako zárezové svahy a nikdy nie strmšie ako 1:1. Svahy boli často prerušované (odstupňované lavičkami na každých 4 až 6 m výšky násypu) či lomené ako zobrazuje Obrázok 2.7. Ploské svahy sa prevádzali najmä kvôli lepšiemu roznášaniu tlaku na podložie násypu. Ak sa svahovanie prevádzalo strojne, tak neboli budované odstupňované svahy [2].

Tabuľka 2.2: Hodnoty sklonov násypových svahov [2].

Typ zeminy	Sklon svahu násypu
súdržné zeminy	min. 1:1,5
sypké zeminy	1:1,75 až 1:2
zeminy so sklonom k zväžaniu a rozpadaniu	1:2 až 1:3
mimoriadne súdržné zeminy čiastočne zvetrané skaly zeminy chránené na svahoch dlažbou	1:1,25 alebo 1:1



Obrázok 2.7: Možnosti prevádzania svahov násypových telies – lomený svah (vľavo) alebo svah prerušovaný lavičkami (vpravo); hodnoty sú uvádzané v metroch [2].

Každý svah musel byť chránený, jednalo sa najmä o ochranu pred poveternostnými vplyvmi či účinkami vody, ktoré mohli narušiť stabilitu sklonených svahov. Táto ochrana mohla byť prevedená humusovaním, drnovaním či plôtikmi a pleteninami. Práve ohumusovanie svahov bolo základným spôsobom ochrany svahov, kedy bola na svah dovezená ornica, tá bola rozprestretá a následne osiata trávny semenom. Vrstva ornice musela byť prepojená s materiálom násypu, čo sa najčastejšie prevádzalo vykopaním jamôk alebo ryhovaním. Vrstvu ornice (humusu) bolo nutné zhutniť. Drny chránili svahy pred

vysúšaním (najmä suché piesčité svahy) a prevádzali sa v troch variantoch: drnovanie na plocho, čelné alebo štvorcové drnovanie. Ďalšiu časť tvorili dopĺňajúce ochranné prvky ako plôtky, pleteniny, krovy a stromčeky. Plôtky a pleteniny boli vhodné pre použitie pri veľmi vlhkých a mokrých svahoch, ktoré vykazovali nestability už pri kladení humusu. Pri ochrane pomocou krovín a stromov bol svah spevňovaný koreňmi, tie mali značný hĺbkový aj šírkový dosah a zabezpečovali ochranu svahu pred vysúšaním slnečným žiarením. Korene však mohli pôsobiť ako zvody vody a dokázali narušiť súdržnosť zemín. Takáto doplnková ochrana sa odporúčala v piesčitých hlinách aj v pieskoch, kde zaručovali zvýšenie stability. Svahy mohli byť taktiež opatrené rovnaninou alebo dlažbou (svahy v blízkosti vodných tokov), čo však nebolo tak časté [2].

3 Historický vývin šírky násypových telies

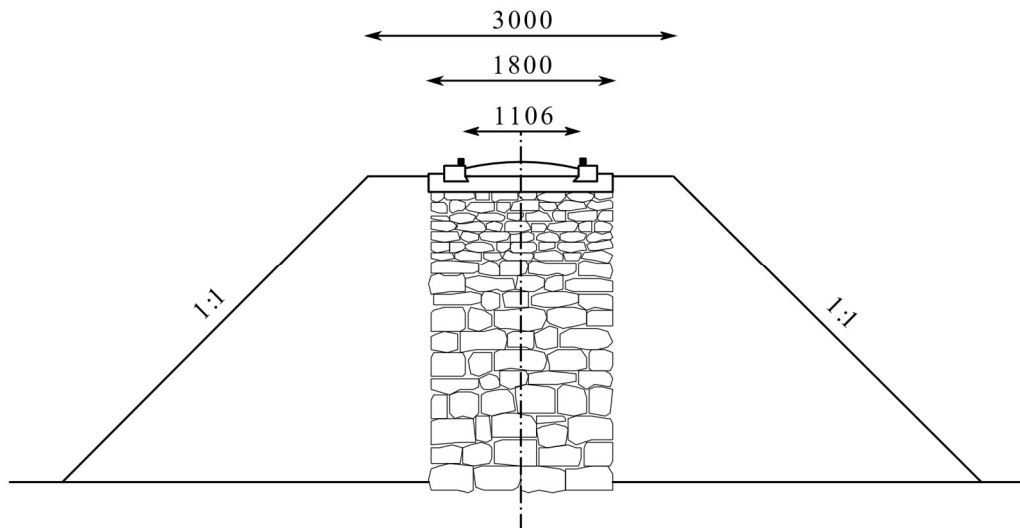
História popisuje priebeh dejov, ich súvislostí v čase a v priestore. Doprava sa vyvíjala spoločne s vývinom človeka, ktorý už od počiatkov musel prekonávať vzdialenosti či už kvôli hľadaniu domova alebo potravy. Inak tomu nie je ani v oblasti železničnej dopravy. V počiatkoch bolo cieľom premiestňovať najmä materiál rôzneho druhu a objemu. Až neskôr došlo k vývinu dopravy, ktorá mala slúžiť na presun obyvateľstva. Veľká časť vývoja súvisí s historickým rozmachom v oblasti stavebného či strojárenského priemyslu. Táto kapitola približuje historický priebeh výstavby v oblasti násypov na železničných tratiach ako aj výzvy, ktoré bolo nutné pri týchto činnostiach prekonávať. Tento aspekt môže pomáhať k lepšiemu porozumeniu terajších problémov a zaručene uľahčuje hľadanie možných príčin kolapsov na tratiach v súčasnosti.

3.1 Obdobie konskej železnice (1825 - 1853)

Myšlienka budovania železnice ako prostriedku na prepravu obyvateľstva padla už v roku 1820. Väčšina českých železničných tratí bola zriadená v období rakúsko-uhorskej monarchie. V týchto zemepisných šírkach bol výstavbou poverený František Josef Gerstner. Jednalo sa o výstavbu Budějovicko-lineckej dráhy, na ktorej sa začala prevádzka v roku 1828 [3].

Počas výstavby železničnej dráhy, kde preprava prebiehala konským záprahom došlo k niekoľkým komplikáciám. Pôvodný návrh obsahoval okrem veľkého počtu mostov a priepustov aj množstvo zárezov a násypov enormných rozmerov. Pre predstavu by výstavbou zárezov bolo nutné odťažiť až 727 000 m³ zeminy a naopak, pri výstavbe násypov doviezť neskutočných 880 000 m³ vhodného násypového materiálu. Preprava takéhoto objemu zeminy bola v tej dobe značne problematická. F. J. Gerstner však nemal dostatočné skúsenosti s výstavbou železničných tratí a dopustil sa tak hneď niekoľkých omylov.

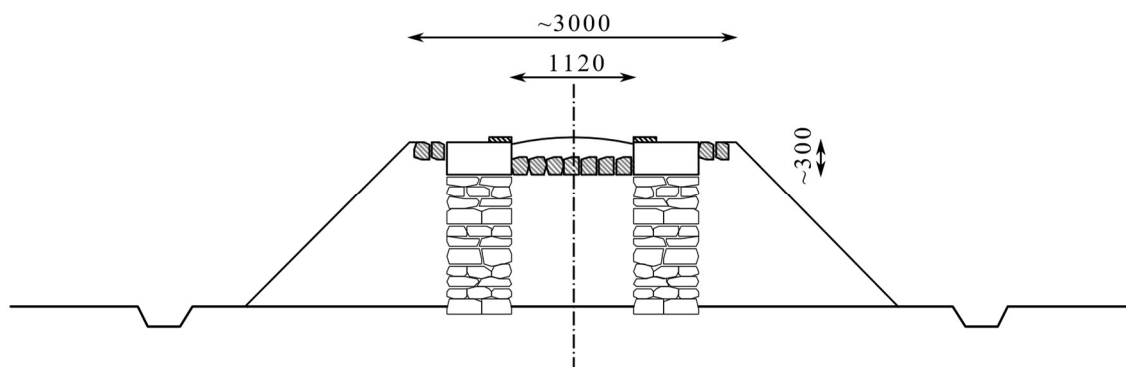
Svahy násypov a zárezov mali jednotný sklon 1:1 bez ohľadu na druh použitého materiálu. Už počas samotnej výstavby sa dospelo k rozhodnutiu, že svahy násypov je nutné sploštiť a dodatočne sa dosypávali na sklon 1:1,25. Zárezy bolo nutné odkopať, a to na sklon 1:1,25 až 1:1,5. Nevhodné sklony mali aj odvodňovacie priekopy hlboké len 0,5 m, čo sa taktiež ukázalo ako nevyhovujúce. Zosilňovanie telesa dráhy bolo prevádzané kamennými stenami budovanými pod koľajnicovými pásmi (pozri Obrázok 3.1). Tieto kamenné steny mali plniť nosnú funkciu, zatiaľ čo hlavnou úlohou zemných telies bolo zaistiť stabilitu. Jediná forma hutnenia násypov bola prevádzaná pojazdom fúrikmi a vozíkmi. Vystuženie zemných telies kamennými stenami sa neukázalo ako vhodný spôsob zosilňovania konštrukcií, i keď sadnutie nevystužených násypov bolo trojnásobné až štvornásobné. Kamenné steny boli murované nasucho a v konečnom dôsledku pôsobili vo vnútri telies ako pozdĺžne trativody, ktoré odvádzali zrážkovú vodu k päte zemného telesa. To spôsobilo nárast vlhkosti zeminy v miestach založenia kamenných stien, čo viedlo k ich sadaniu a súvereniu stien, následne k deformáciám koľajového roštu [3].



Obrázok 3.1: Priečný rez násypom budějovicko-lineckej konskej železnice zo stien z nasucho položeného lomového kameňa [3].

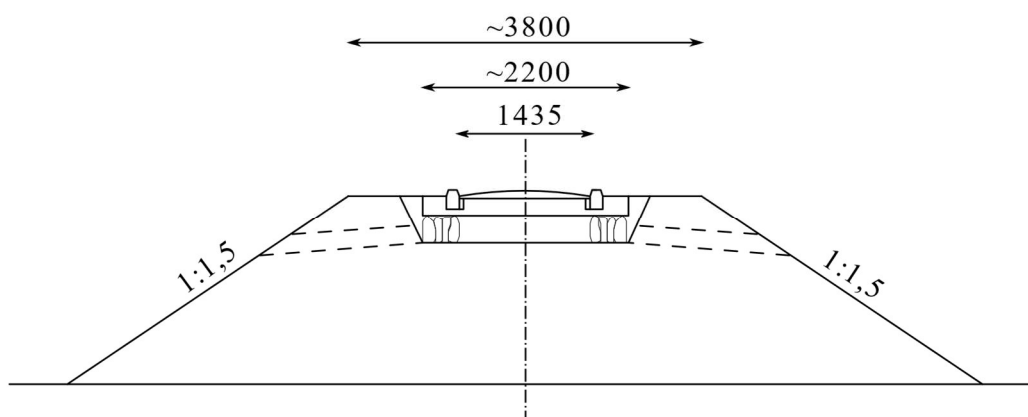
Ďalším významným inžinierom podieľajúcim sa na výstavbe tohto projektu bol Mathias Schönerer, ktorý prišiel s nápadom využiť na vystuženie podložia – štetovanie. Jednalo sa o ihlancové kamene výšky 30 – 40 cm, ukladané základňou na pláň a ďalej vyklinované menšími úlomkami kameňov. Bol to relatívne prácny, no účinný spôsob ako zabezpečiť potrebnú únosnosť. Zaviedol zaistenie drenážnych a protimrazových vlastností stavebných objektov. Neskôr sa ukázalo, že uloženie koľaje priamo na štrkové lôžko je taktiež vhodným riešením [3].

Pražsko-lánská železnica sa od budějovicko-lineckej líšila trasovaním a stavbou železničného zvršku. Trasa sa vinula v miestach, kde bol lánaný kvalitný stavebný kameň – pieskovce, ktorý nakoniec tvoril základ liatinových koľajnic. Pieskovcové kvádre boli v násypoch aj v zárezoch podmurované lomovým kameňom ukladaným nasucho, aby sa zamedzilo sadnutiu koľají (pozri Obrázok 3.2). Kamenná dlažba medzi koľajnicami bola navyše zasypaná štrkom a mala zamedziť bočným posunom kvádrov [3].



Obrázok 3.2: Priečný rez násypom pražsko-lánskej konskej železnice [3].

Tretou verejnou dráhou konskej železnice na tomto území bola časť budovaná medzi Bratislavou a Trnavou na území dnešného Slovenska, na ktorej začala prevádzka v roku 1846. Bola vystavaná najmä kvôli preprave dreva, no bola poznačená nečakane dlhou výstavbou. Tá sa natiahla kvôli nedostatočne prevedenému geologickému prieskumu či nepriaznivým klimatickým pomerom – krutým mrazom a prudkému jarnému topeniu snehu. Výstavba bola náročná aj z hľadiska presunu obrovských objemov zemin v okolí Pezinka či Cífera. Keďže sa už počas stavby uvažovalo s neskorším zavedením parnej trakcie bol tomu prispôsobený aj železničný spodok (pozri Obrázok 3.3). Prične podvaly boli ukladané do koľajového lôžka zo štrku, pričom pod koľajnicovými pásmi sa nachádzal štetovnicový podklad výšky 300 mm [3].

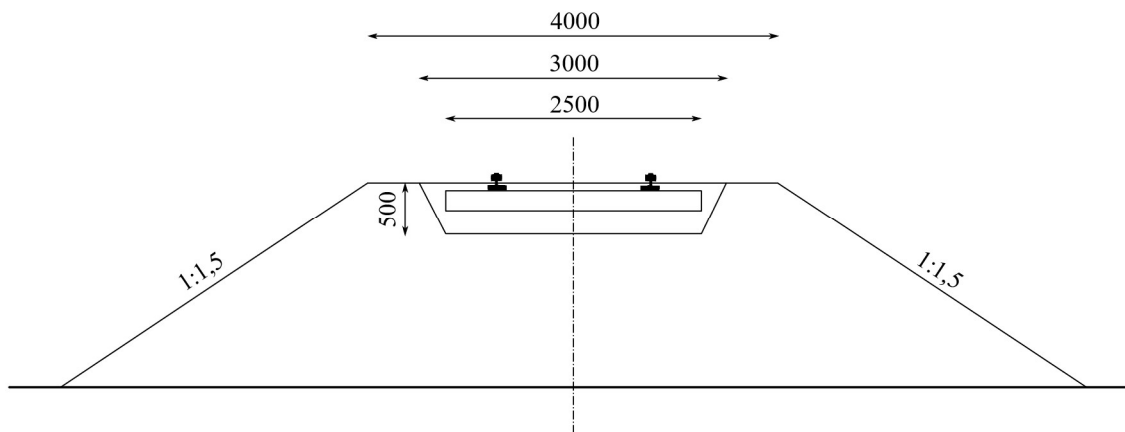


Obrázok 3.3: Priečny rez násypom bratislavsko-trnavskej konskej železnice [3].

3.2 Počiatky parostrojových dráh (1837 - 1841)

Objav parostroja okolo roku 1804 prispel k ďalšiemu vývoju v železničnej doprave. Vynálezom parnej lokomotívy sa zistilo, že okrem problémov spojených s jej jazdnou dráhou je dôležitá aj samotná konštrukcia koľaje. Prelom nastal objavom nového spôsobu valcovania koľajnic z kujného železa s hríbovitým prierezom. V roku 1825 sa uskutočnila prvá jazda parnej lokomotívy s cestujúcimi [3].

Počas výstavby Ferdinandovej dráhy sa použili vzorové profily, kde kamenné steny či štetovnice nahradila vrstva zo štrkopiesku o mocnosti 0,5 m, ktorá bola zapustená medzi bankety v šírke asi 0,5 m (pozri Obrázok 3.4). To bolo odvodňované za pomoci pričných štrkových tratívodov. Udáva sa, že násypy boli dostatočne konsolidované asi po 1 roku. Poklesy koľaj spôsobené sadaním násypov sa museli vyrovnávať, a to dodaním ďalšieho štrku do koľajového lôžka [3].



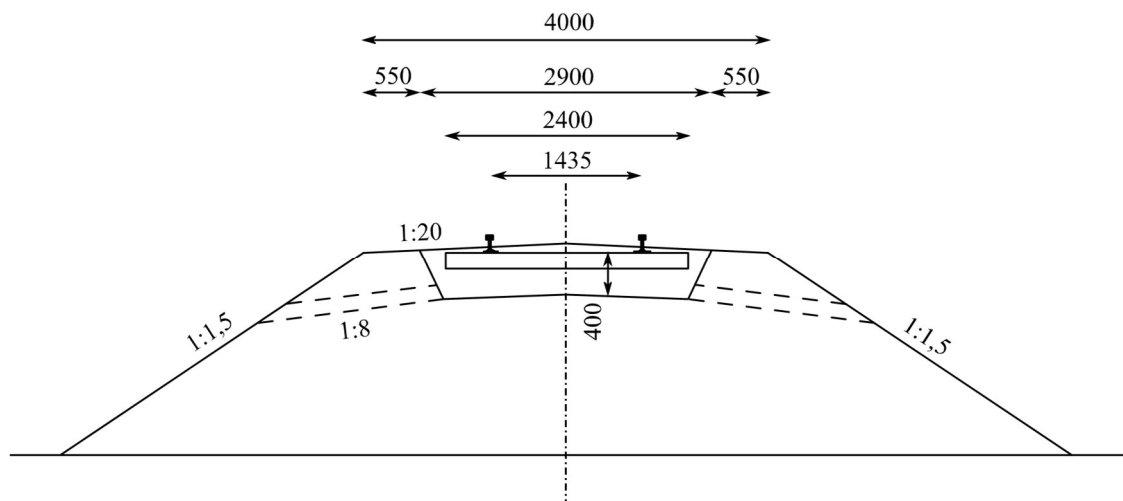
Obrázok 3.4: Priečný rez násypom trate Severnej dráhy cisára Ferdinanda z roku 1838 [3].

3.3 Obdobie rokov 1845 – 1880

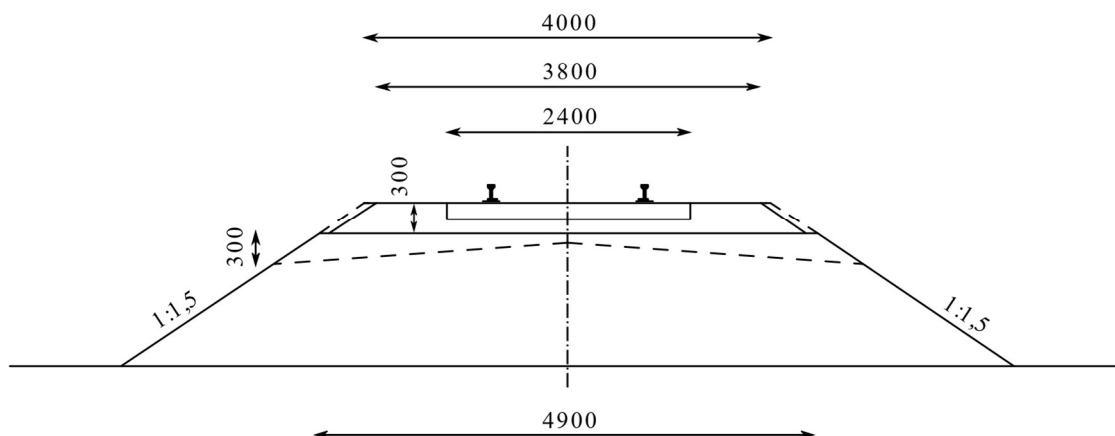
V tomto období dochádzalo k mnohým zmenám v jednotlivých stavebných častiach železničných tratí. Bolo nutné upraviť koľajový zvršok tak, aby nedochádzalo k jeho opotrebovaniu. Kvôli častým lomom koľajníc a stoličiek bola ohrozená bezpečnosť a plynulá prevádzka. Zavedené boli širokopátné koľajnice ukladané na liatinové podkladnice upevnené priamo na priečne podvaly. Obdobie je taktiež spojené s vyčerpaním únosnosti železa používaného na výrobu koľajníc. Postupne došlo k výrobe koľajníc len z ocele, k čomu výrazne prispel vynález plávkovej ocele vyrábanej v tekutom stave [3].

Výstavba železničnej trate bola pomerne nákladná, a tak sa začalo s výraznejšími šetriacimi opatreniami. Mocnosť koľajového lôžka niekedy dosahovala len 0,15 m. Do tejto vrstvy bol používaný ťažený alebo kopaný štrk či štrkopiesok bez obsahu hlinitých prímiesí, zároveň nesmeli byť maximálne zrno väčšie ako 53 mm. Až do konca 60. rokov 19. storočia sa koľajové lôžko zriaďovalo ako zapustené, čo je zobrazené vo vzorových listoch z roku 1848 (pozri Obrázok 3.5). Otvorené štrkové lôžko, ako ho poznáme dnes, je možné dohľadať vo vzorových listoch spracovaných v roku 1869 (pozri Obrázok 3.6). Hutnenie koľajového lôžka sa prevádzalo ubíjaním. Znižovanie nákladov sa týkalo aj samotných drevených podvalov. Snaha bola predĺžiť ich životnosť, čo sa nakoniec prevádzalo impregnáciou dechtovým olejom. Používanie železných podvalov sa v týchto končinách neuchytilo. Zároveň je vidieť, že oproti predchádzajúcemu obdobiu sa zvýšila šírka pláne z 3,0 m na 4,0 m [3].

Podrobné predpisy popisujúce železničný spodok tzv. normálie sa zaviedli od 50. rokov 19. storočia. Udávali napríklad rozmery zemných telies v zárezoch ale aj násypoch, sklony svahov, profily zariadení určených na odvodnenie, konštrukcie ochranných i regulačných stavieb. Podložie násypu sa kyprilo za pomoci pluhu pre lepšie spojenie navážky s nerozrušenou zeminou, pri odrezoch sa zasa zriaďovali stupne. Teleso násypu bolo budované po vrstvách, ktorých hrúbka mala byť maximálne 0,15 m, čo malo zamedziť nadmernému sadnutiu [3].



Obrázok 3.5: Priečný rez násypom jednokoľajnej trate podľa vzorových listov Moravskoslezskej severnej dráhy z roku 1867 (zachovávajú rozmery a tvary vzorových listov z rokov 1838-1850) [3].



Obrázok 3.6: Priečný rez násypom jednokoľajnej trate v priamej podľa vzorových listov Rakúskej severozápadnej dráhy z roku 1869, s otvoreným štrkovým lôžkom [3].

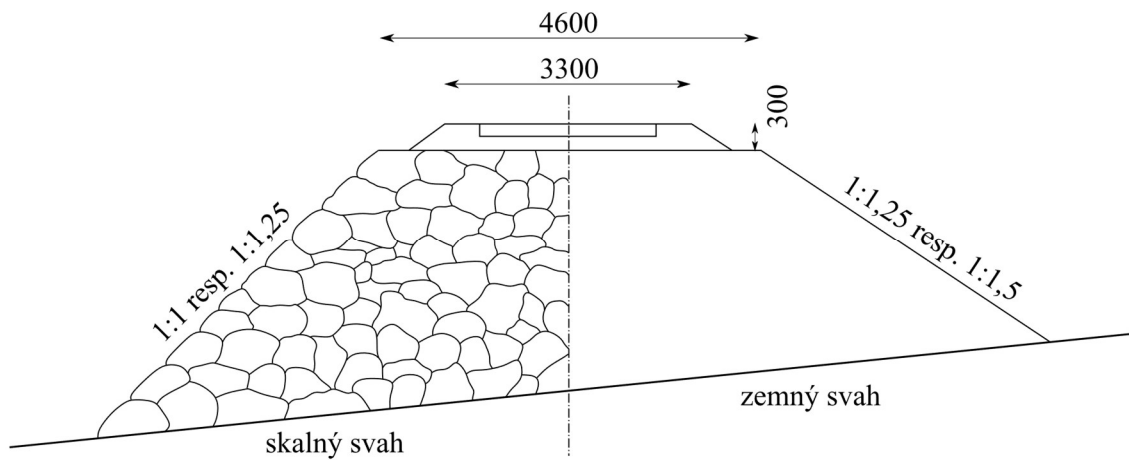
Takisto sa v tomto období zaviedlo vyrovnávanie nivelety, aby sa znížil jazdný odpor vozidiel pri prejazde oblúkom či tunelom a zároveň bola použitá parabolická prechodnica zabezpečujúca plynulejší prejazd oblúkmi. Väčšina týchto charakteristík platila až do prepuknutia 1. svetovej vojny [3].

3.4 Obdobie od roku 1885

Normálne plány popisovali v minulosti (najmä v období Rakúsko-Uhorska) základné špecifikácie ako mali vyzerat' priepusty, mosty, prvky železničného spodku ale aj zvršku.

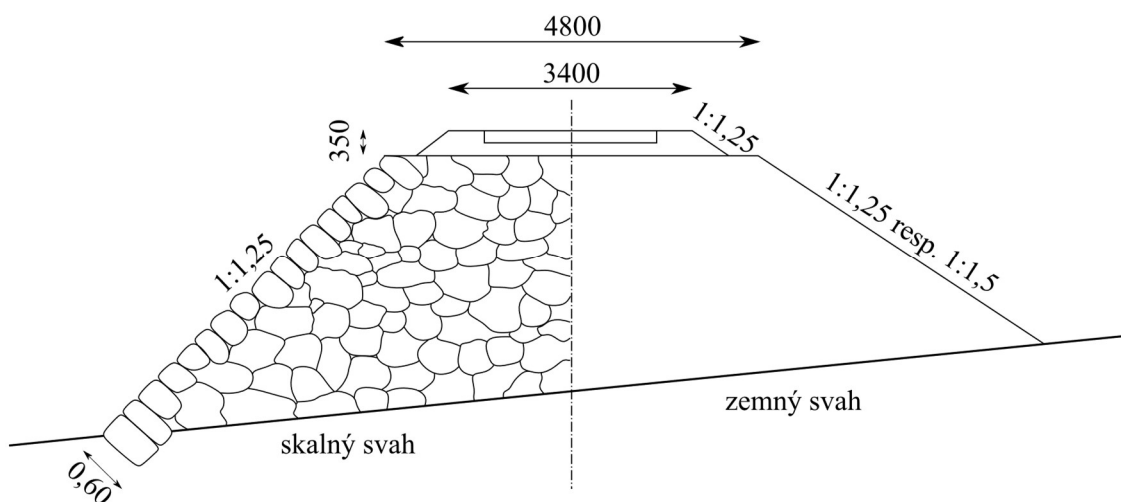
Obrázok 3.7 popisuje rozmery násypového telesa na tratiach Českomoravskej transverzálnej dráhy (nemecky Böhmisches-Mährische Transversalbahn), tá vznikla koncom 19. storočia a predstavovala súbor dráh lokálneho charakteru. Jej cieľom bolo prepojiť existujúce štátne dráhy s vtedy typickou severojužnou viedenskou orientáciou. Výška koľajového lôžka dosahovala 300 mm, sklon svahu bol daný použitým materiálom a líšil

sa pri výstavbe násypu zo skál alebo zo zemín. Šírka pláne bola 4,6 m a šírka koľajového lôžka 3,3 m [4].



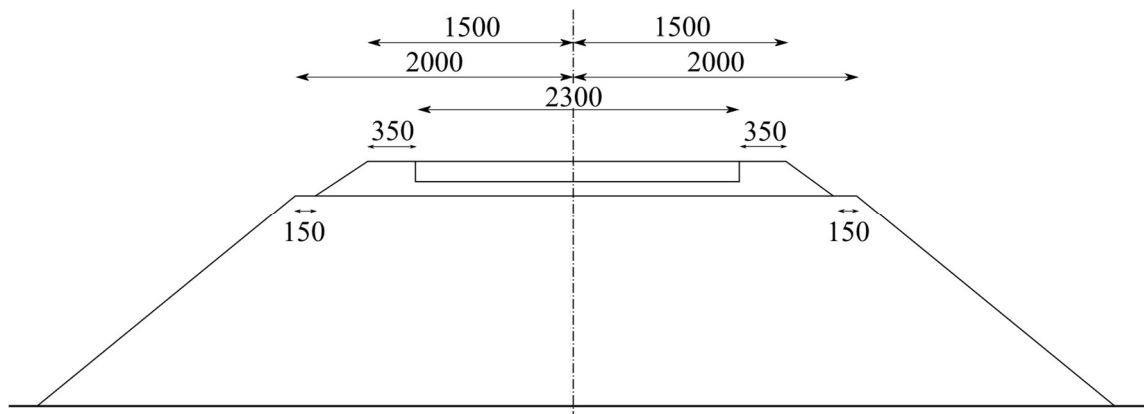
Obrázok 3.7: Priečný profil jednokoľajnej trate Českomoravskej „transverzálky“ z konca 19. storočia, pre skalný svah násypu (vľavo) alebo pre násyp zo zemín (vpravo) [4].

Obrázok 3.8 popisuje priečný profil jednokoľajnej trate hlavnej dráhy. Pri násypoch tvorených zeminou vyšších ako 5 m sa predpokladal sklon svahu minimálne 1:1,5. Výška koľajového lôžka na hlavných tratiach bola 0,35 m a šírka pláne sa zväčšila na 4,8 m. Oproti lokálnej trati „transverzálky“ sa menila aj šírka koľajového lôžka na 3,4 m [4].



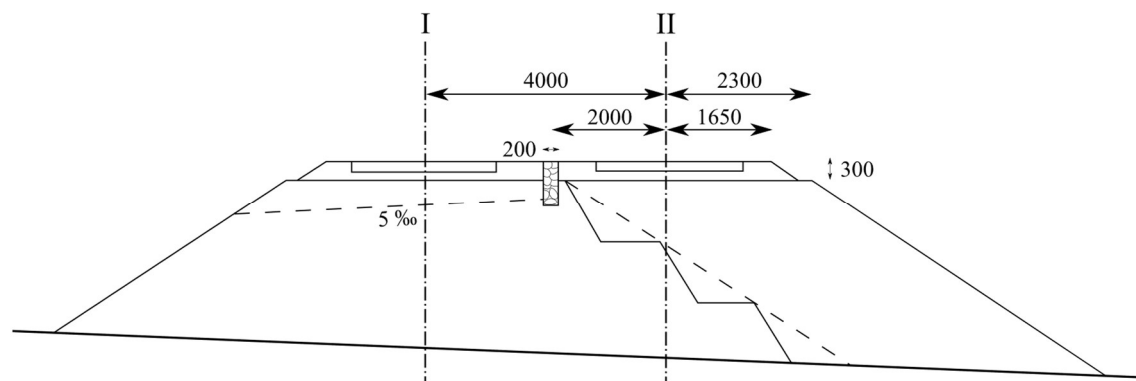
Obrázok 3.8: Priečný profil hlavnej jednokoľajnej trate z konca 19. storočia, pre skalný svah násypu (vľavo) alebo pre násyp zo zemín (vpravo) [4].

V roku 1888 bol schválený priečný profil lokálnych dráh zobrazený na Obrázku 3.9. Výstavba týchto lokálnych dráh alebo tzv. sekundárnych dráh bola veľmi častá koncom 19. storočia. Z obrázka je vidieť, že šírko sa jednalo o pomerne skromnú trať, kde pláň bola široká len 4,0 m a koľajové lôžko bolo široké 3,0 m. Na pláni musel byť ponechaný priestor pre bankety v šírke len 15 cm [4].



Obrázok 3.9: Priečný profil sekundárnej jednokoľajnej trate na konci 19. storočia [4].

V roku 1869 vznikla spoločnosť Duchcovsko-podmokelská dráha, ktorá prevádzala železničnú dopravu v Rakúsko-Uhorsku medzi mestami Děčín, Duchcov a Chomutov. V roku 1884 prebrala úseky dráhy spoločnosť Cisársko-kráľovské štátne dráhy (nemecky kaiserlich-königliche Staatsbahnen), ktorá postupne zoštátnila väčšinu železničných dráh. Po prvej svetovej vojne vlastnila táto spoločnosť takmer 19 000 km železničných tratí. Obrázok 3.10 predstavuje pomery dvojkolejnej trate vedúcej medzi mestami Duchcov a Děčín (nemecky známe ako Dux a Bodenbach). Sklon svahov závisel od typu materiálu použitého na výstavbu násypového telesa. Celková šírka pláne dvojkolejnej trate tak predstavovala 8,6 m. Je vidieť, že pri rozširovaní trate (II predstavuje os novej koľaje) bolo nutné previesť zazubenie svahu [4].



Obrázok 3.10: Priečný profil dvojkolejnej trate Duchcovsko-podmokelskej dráhy (koniec 19. storočia), kde I predstavuje os primárnej koľaje a II je os novej koľaje [4].

3.5 Medzivojnové obdobie (1919 - 1945)

Okrem výstavby nových úsekov železničných tratí došlo aj k početným rekonštrukciám. Jednalo sa o rekonštrukcie tunelov, mostov alebo klenieb a používanie nových stavebných postupov či technológií. Napríklad pri rekonštrukcii klenby u Krasíkova bol prvýkrát použitý striekaný betón, v roku 1926 došlo na trati Handlová – Horná Štubňa k prvým pokusom o zváranie koľajnicových pásov. Na tejto trati boli zároveň vybudované sanačné podkladové vrstvy z lokomotívneho popola či drvenej trosky o hrúbke 0,15 m, ktoré boli

ukladané na pláň do zavlhlých zárezov a násypov zo silne hlinitých zemín, zhutnenie bolo prevádzané valcovaním [3].

Vo veľkej miere je možné dedukovať, že po vzniku ČSR bolo mnoho chýbajúcich spojení medzi českou časťou krajiny a Slovenskom. Jediné spojenie so Slovenskom vytvárala časť bývalej Českomoravskej transverzálnej dráhy z Brna do Trenčianskej Teplej. Markantný význam mala však „stredoslovenská transverzála“ spájajúca Brno – Zvolen – Košice vedúca v náročných horských podmienkach. Zemné práce na úsekoch tejto trate predstavovali presuny materiálu v objeme až 3,3 milióna m³. Úsek zahŕňal zárez vedúci v dĺžke až 1 km či násyp vysoký 22 m. Taktiež sa potvrdilo užívanie rýpadiel ako problematické, keďže svojou ohromnou hmotnosťou spôsobovali kolapsy svahov [3].

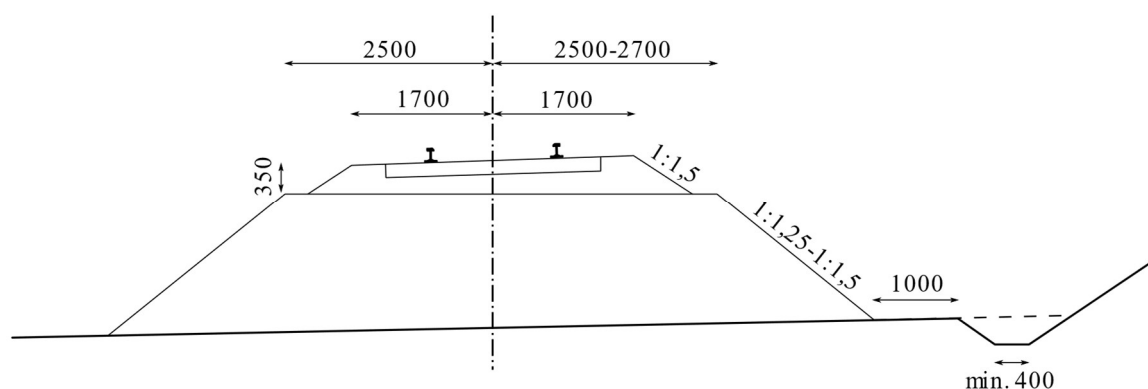
V roku 1928 došlo k zlepšeniu metód pri budovaní násypov, keď Ústredná stavebná správa vydala podmienky pre výstavbu železničného spodku u nových dráh. Nové podmienky nahradili tie rakúske, vydané v roku 1910. Podmienkou bolo, že nové násypy už nesmú byť len prosto a ľubovoľným spôsobom sypané ale musia byť vystavané odborným spôsobom. Násyp mal byť sypaný po jednotlivých vrstvách o hrúbke 1,0 m a každá vrstva musela byť zhutnená pojazdom vozidiel i chôdzou, čo malo zmierniť sadanie zemných telies po započatí dopravy. V ideálnom prípade boli násypy zhutňované po vrstvách alebo aspoň v korune pomocou okovaných dubových valcov presne navrhutej hmotnosti, ktoré boli ťahané konským záprahom. Najväčší násyp vybudovaný touto technológiou dosahoval výšku až 25 m, navezená bola zemina o objeme 90 000 m³, a to pomocou dvoch zväžnic [3].

Výstavba železnice a ďalších stavebných objektov s ňou súvisiacich bola vždy technologicky, mechanicky i fyzicky náročná. Ani táto stavebná činnosť sa nezaobišla bez obetí na životoch, ba čo viac aj obetí početných protestov súvisiacich s mzdovou nespokojnosťou a nesúhlasom s vtedajšími pracovnými podmienkami. Toto obdobie bolo pomerne náročné aj kvôli meniacej sa politickej situácii v tejto časti Európy. Udalosti ako Mníchovská dohoda a Viedenská arbitráž prispeli k faktu, že územie bolo ukrátené o niektoré úseky tratí, najmä za Košicami a o tzv. Sudety (české územia obývané prevažne nemeckým obyvateľstvom) [3].

Ďalším dôležitým budovaným spojením bola trať Horní Lideč – Púchov vystavaná ako dvojkolajová okolo roku 1935 či trať Zlaté Moravce – Zbehy, kde sa vyskytovali územia náchylné k zosuvom, problémy vytvárala aj spodná voda v blízkosti povrchu a rozpadavosť zemín. V roku 1937 bola nepriaznivá povaha zemín zvýšená zrážkami. Záplavy spôsobené riekou Nitrou podporili nepriaznivé geologické podmienky, čo malo za následok zmenu sklonov zárezov a násypov. Násypové telesá mali lomené sklony 1:1,5 či 1:2 resp. 1:2,5 v pásoch po 6 metroch. Spomínaná trať Zlaté Moravce – Zbehy bola charakteristická veľkým objemom zemných prác. V tom období boli v platnosti nové predpisy Ústrednej stavebnej správy, podľa ktorých sa všetky nové násypy valcovali a sanácia pláne prebiehala pomocou škvary. Enormný presun hmôt, dovtedy najväčší zaznamenaný, nastal počas výstavby trate Banská Bystrica – Dolná Štubňa – Vrútky.

Priemerná hodnota presunutého materiálu na 1 km bola viac ako 77 000 m³ a veľký dôraz bol kladený na správne založenie násypových telies a zabezpečenie svahov [3].

Ako je možné vidieť na Obrázku 3.11, všetky trate boli stavané podľa zásad pre hlavné dráhy so šírkou pláne 5 m (trať v priamej), s hrúbkou koľajového lôžka 0,35 m a šírkou v korune 3,40 m. Pláň železničného spodku sa rozširovala v oblúkoch vždy na vonkajšiu stranu podľa prevýšenia koľaje. Pláň zostala nerozšírená pre prevýšenie koľaje do 30 mm. Pri prebytku násypového materiálu sa odporúčalo zväčšenie rozšírenia ako to, ktoré udávali Normálne plány. Sklon svahov násypu závisel od materiálu, z ktorého bolo zemné teleso prevedené, pri zemných násypoch vyšších ako 5,0 m museli byť svahy zriadené v minimálnom sklone 1:1,5. Kvôli sadaniu nasypaného materiálu sa železničné násypy prevádzali vyššie a širšie, pričom Δv udávala prevýšenie a Δs rozšírenie zemného telesa. Tieto hodnoty pre priblíženie udáva Tabuľka 3.1, hodnoty Δv a Δs záviseli od druhu násypového materiálu [5].



Obrázok 3.11: Priečny rez násypom (v oblúku) jednotkoľajnej trate hlavnej dráhy podľa vzorových listov ČSD z roku 1932 [3].

Tabuľka 3.1: Hodnoty prevýšenia násypu podľa Normálnych plánov z roku 1929 [5].

Druh materiálu	Δv	Δs
Kameň	$\frac{1}{40}V$	$\frac{1}{40}V$
Piesok	$\frac{1}{23}V$	$\frac{1}{15}V$
Piesčitá hlina	$\frac{1}{14}V$	$\frac{1}{9}V$
Hlina a íl	$\frac{1}{12}V$	$\frac{1}{8}V$

3.6 Povoľné obdobie (od roku 1945)

So vznikom Československa po 1. svetovej vojne bolo náročné obmedziť vývoj železničných stavieb len na české územie, preto je uvedený celoplošný vývoj.

Veľkú zmenu zapríčinil komunistický prevrat v roku 1968, ktorý spôsobil postupné zoštátnenie všetkých súkromných železničných spoločností. Preťažený železničný úsek Čierna nad Tisou – Košice – Žilina – Bohumín si vyžiadala zdvojkolaženie a súčasnú

elektrifikáciu trate. V 60-tych rokoch došlo k úplnému vyradeniu parných rušňov, tie boli nahradené rušňami elektrickej a motorovej trakcie [6].

Problémy pri trasovaní železničnej siete vznikali v minulosti najmä kvôli chýbajúcim mapovým podkladom. Trasovanie sa prevádzalo súčasne s výstavbou železničnej siete, čo často viedlo k neekonomickým a stavebne náročným riešeniam. Rozmach nastal okolo roku 1956, keď sa pri tvorbe železničných máp začala používať letecká fotogrametria [6].

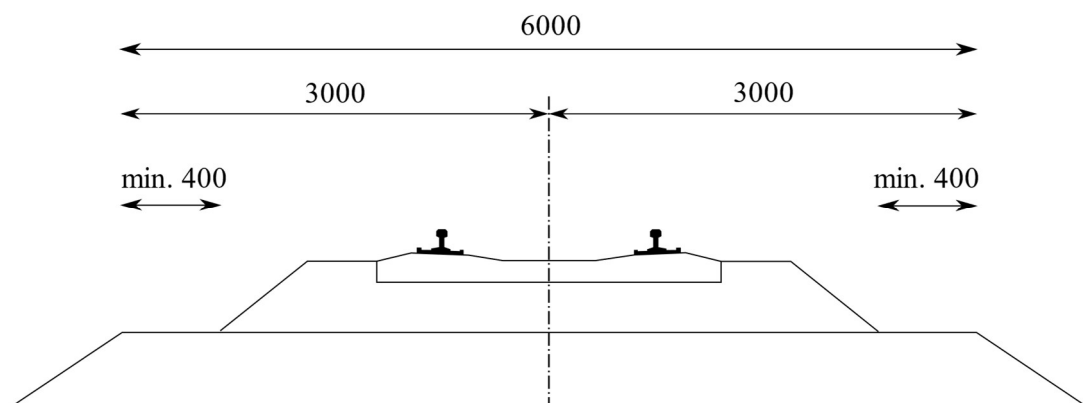
Po skončení 2. svetovej vojny nastala veľká zmena v budovaní železničného spodku a od roku 1950 bola väčšina zemných prác zmechanizovaná. Budovanie násypov pomocou bárov, ktoré boli natrvalo ponechávané v konštrukciách násypov sa pomaly vytrácalo a nahradilo ich sypanie násypov (bližšie popísané v kapitole 2). Zmenil sa aj prístup k úprave svahov zemných telies – odstupňovanie svahu pomocou lavíc na každých 4 – 6 m bolo nahradené postupnou zmenou sklonu svahu zhora nadol. Zemná pláň bola spevňovaná pomocou vápna, cementu alebo chemických zlúčenín, neskôr aj pomocou geotextílií alebo plastových fólií. Čistenie koľajového lôžka si vyžadovalo zmenu šírky pláne na 6,0 m, zatiaľ čo podľa predchádzajúceho Obrázku 3.11 bola šírka 5 – 5,2 m. Významnou zmenou boli počiatky používania betónových prefabrikovaných prvkov na odvodňovanie, ktoré nahradili, dovtedy často používanú, kamennú rovnaninu [6].

Je vidieť, že povojnové obdobie bolo významnou érou pre výstavbu železničných tratí. Historický vplyv politickej situácie, povojnových revitalizácií a rozmach v oblasti stavebníctva i strojárskoho priemyslu priniesol mnoho zmien.

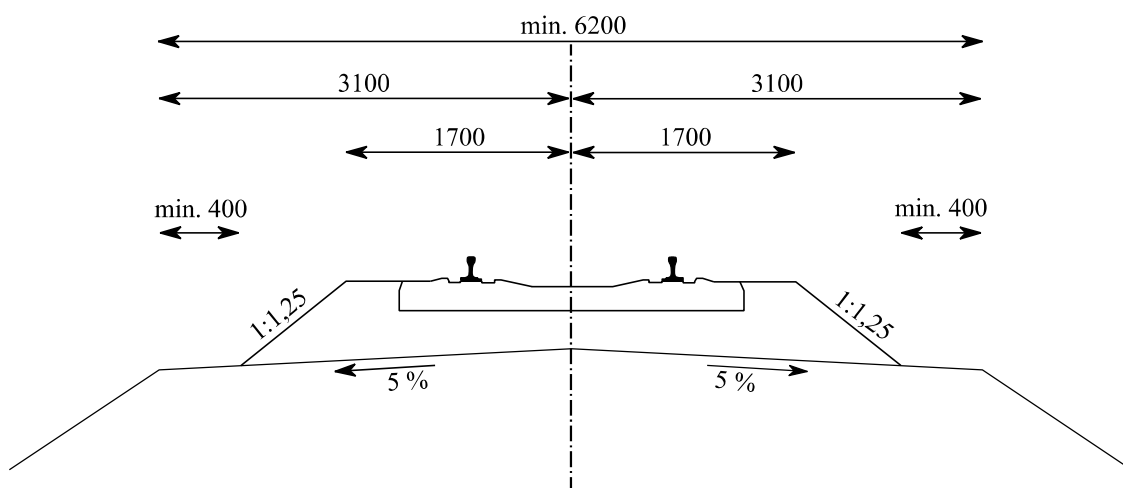
3.7 Súčasnosť

Starší predpis Správy železniční dopravní cesty (SŽDC), ktorý bol účinný od roku 2008 udáva minimálnu šírku pláne telesa železničného spodku novo budovaných jednokoľajných tratí normálneho rozchodu 6,0 m. Dodržaná musela byť šírka banketu 40 cm. Samozrejme, trate vedené v oblúku je nutné rozšíriť na vonkajšej strane oblúku podľa daného prevýšenia. Pláň telesa železničného spodku môže byť vodorovná alebo sklonená [7].

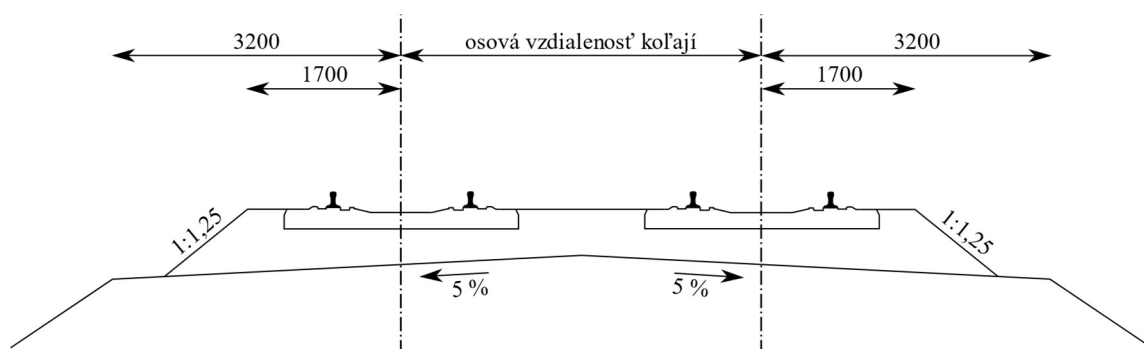
Najnovší predpis Správy železníc (SŽ) S4 účinný od roku 2021 udáva základnú šírku vodorovnej pláne telesa železničného spodku jednokoľajných tratí normálneho rozchodu 6,0 m (pozri Obrázok 3.12), pričom musí byť dodržaná hodnota šírky dráhového chodníka aspoň 40 cm. Pri sklonenej pláni je to šírka 6,2 m (pozri Obrázok 3.13). Šírkové pomery dvojkolajnej trate popisuje Obrázok 3.14, osová vzdialenosť koľají býva spravidla 4,0 m [1].



Obrázok 3.12: Nové a rekonštruované jednokoľajné trate normálneho rozchodu (1435 mm) s vodorovnou pláňou telesa železničného spodku [1].



Obrázok 3.13: Nové a rekonštruované jednokoľajné trate normálneho rozchodu (1435 mm) so sklonenou pláňou telesa železničného spodku [1].



Obrázok 3.14: Dvojkoľajná trať so sklonenou pláňou telesa železničného spodku [1].

V predchádzajúcej kapitole bolo možné odpozorovať, že po 2. svetovej vojne sa zmenili šírkové pomery pláne markantne. Jednalo sa o zmenu z 5 – 5,2 m na 6,0 m. Je nutné zmieniť, že za posledných viac ako 70 rokov nastala len malá zmena v tejto šírke. Dnes je to u jednokoľajných tratí s vodorovnou pláňou minimálne 6,0 m (6,2 m pri pláni sklonenej),

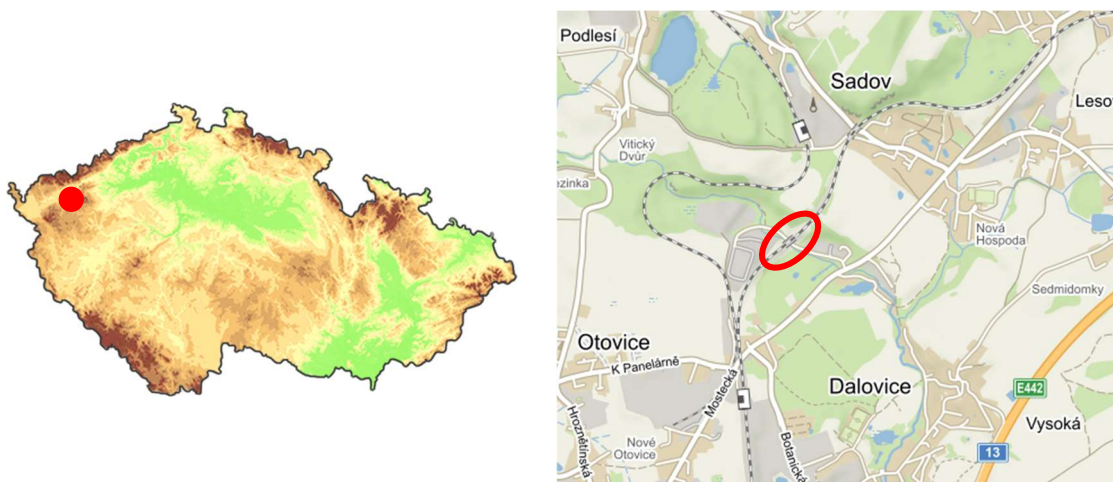
pričom ale nastal razantný vývoj šírky dráhového chodníka. Banket sa rozšíril postupne z 15 cm (koniec 19. storočia) na 40 cm resp. 55 cm pri zriaďovaní bezстыkovej koľaje [1].

4 Príklady porúch násypových telies v Českej republike

Väčšina železničných tratí na území Českej republiky bola vybudovaná za éry Rakúsko-Uhorska. V minulosti nebol známy pojem geotechnický monitoring a veľká časť stavebných postupov sa vyvíjala spoločne so samotnou výstavbou, čo viedlo k rozsiahlym nedostatkom a problémom v rámci železničného spodku. V tejto kapitole sú uvedené konkrétne oblasti, kde došlo k rozličným poruchám násypov na železničných tratiach v Českej republike spôsobeným historickým vývinom koľajovej dopravy a stavebnou činnosťou s ním spojenou.

4.1 Hájek – Dalovice

Prvým popisovaným miestom je dvojkolejová trať medzi obcami Hájek a Dalovice v okrese Karlovy Vary (pozri Obrázok 4.1), ktorá bola kompletne dobudovaná už v roku 1889. Táto trať predstavuje jeden z významných uzlov najmä pre nákladnú dopravu v Českej republike, no v neposlednom rade aj jeden z úsekov, kde došlo k masívnemu zosuvu násypového telesa. Jedná sa o železničnú trať TU 0112 Chomutov – Cheb, traťový úsek DU 20 Hájek – Dalovice.



Obrázok 4.1: Miesto zosuvu v úseku Hájek – Dalovice v okrese Karlovy Vary [8].

Z historického hľadiska je oblasť poznačená výraznou antropogénnou činnosťou. Tento kraj je známy rôznymi druhmi priemyslu, a to nie len historicky. Konkrétne sa jedná o banícky, energetický, chemický, porcelánový, sklársky či strojársky priemysel. Navyše kvôli náročným geomorfologickým vlastnostiam a zvlnenému charakteru terénu bolo nutné v úseku vystavať väčšie množstvo násypov, zárezov a mostných objektov [9].

K zosuvu pôdy došlo presne 14.4.2018. Samotnej katastrofe predchádzali poruchy geometrickej polohy koľaje (ďalej označované ako GPK), ktoré si všimol traťmajster, následkom čoho bola postupne zastavená prevádzka v oboch smeroch a nedošlo k závažnejším škodám na životoch. Traťový úsek však nevykazoval žiadne iné signály vyžadujúce zvýšenú údržbu. K poškodeniu telesa násypu došlo v km 181,7 – 181,8 pod koľajou číslo 2, okrem neho bol poškodený železničný zvršok aj existujúce trakčné vedenie

(pozri Obrázok 4.2 a 4.3) [10]. Násyp, u ktorého došlo k poškodeniu, bol vysoký 11 m. Rozvinul sa rotačný zosuv, pričom výška odtrhovej hrany bola asi 4 m na šírke 60 m a dĺžke asi 35 m. Odhadovaný objem zeminy prekročil hranicu 6 000 m³ [9].



Obrázok 4.2: Poruchy spôsobené zosuvom v úseku Hájek – Dalovice v roku 2018 [11].



Obrázok 4.3: Poruchy spôsobené zosuvom v úseku Hájek – Dalovice v roku 2018 [12].

Po demontáži koľajového roštu bol prevedený geofyzikálny prieskum a jadrové vrty, ktoré potvrdili, že okamžité prerušenie prevádzky na trati bolo správnym rozhodnutím. Počas ťažby zosunutých hmôt prebiehala kolektívizácia dát o území. V útrobách násypu boli nájdené drevené lešenia z roku 1873 (pozri Obrázok 4.4) slúžiace k vodorovnej doprave materiálu a taktiež k výstavbe násypu. Zároveň sa tam nachádzali odvodňovacie systémy z roku 1889 (kedy došlo k zdvojkolajneniu trate), šmyková plocha ale aj odvodňovací systém podložia [9].



Obrázok 4.4: Drevené lešenia (tzv. bárkové konštrukcie) z roku 1873 [9].

Prieskum preukázal, že problémy zapríčiňujúce zosuv je možné datovať už do obdobia výstavby telesa násypu. Jedná sa konkrétne o obdobie 19. storočia, kedy bola trať rozšírená z jednokoľajovej na dvojkolejovú a teleso bolo dosypané bez zazubenia svahu, ktorý mal prípadnému zosuvu zabrániť. Lokalita sa taktiež nachádza v zložitých geotechnických pomeroch, do násypu bol použitý nevhodný materiál, ktorý navyše nebol dostatočne zhutnený. Tento materiál do seba natiahol vlhkosť vznikajúcu v podloží, čo v spojení s veľkým zaťažením viedlo k celkovému kolapsu [13]. Zeminy podložia popisuje Obrázok 4.5, podľa neho je násyp tvorený piesčitým ílom (F4 CS) pričom sa pod ním nachádza íl s vysokou plasticitou (F8 CH) [9].

Na základe inžiniersko-geologického prieskumu je známe, že spomínaný úsek bol vystavaný na území bývalej bane, kde sa hlbinne ťažilo prevažne hnedé uhlie, no aj kaolinit, tehliarska hlina či bentonit. Nachádzal sa tak na území postihnutom banskou činnosťou, ktoré bolo tvorené vysoko plastickými silne zvetranými ílovcami. Dodnes je možné v tejto časti pozorovať zamokrené miesta ako prejav banskej činnosti. Oblasť navyše rozdeľuje koryto a údolná niva Vitického potoka, čo spôsobovalo rozsiahle prietoky [10].

Geofyzikálny prieskum potvrdil, že na styku jadra pôvodného násypu a prísypu sa nachádzajú plne nasýtené zeminy. Zároveň boli pod vrstvou škvary odhalené priťažovacie lavice v päte svahu (pozri Obrázok 4.6) pravdepodobne vybudované v medzivojnovom období [9].



Obrázok 4.5: Priečný rez telesom pôvodného násypu a prísypu [9].



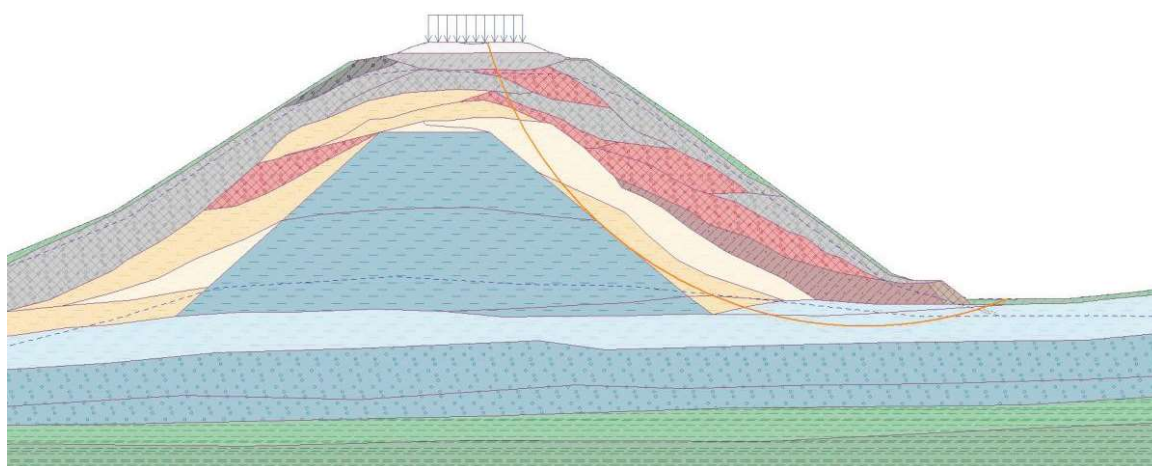
Obrázok 4.6: Príťažovacie lavice v päte svahu, objavené pri prevádzaní zemných prác, zakryté vrstvou škvary [9].

Po vypustení statických zásob odvodňovacích systémov objavených v telese násypu došlo k uvoľneniu napätia, postupne bolo možné badať šmykové porušenia, ktoré sa vytvárali už v minulosti. Počas prebiehajúcich prác bola odhalená aj šmyková plocha vinúca sa jadrom prísypu (pozri Obrázok 4.7), ten bol zhotovený okolo roku 1889 kvôli zdvojkolaženiu trate [9].



Obrázok 4.7: Šmyková plocha v jadre prísypu [9].

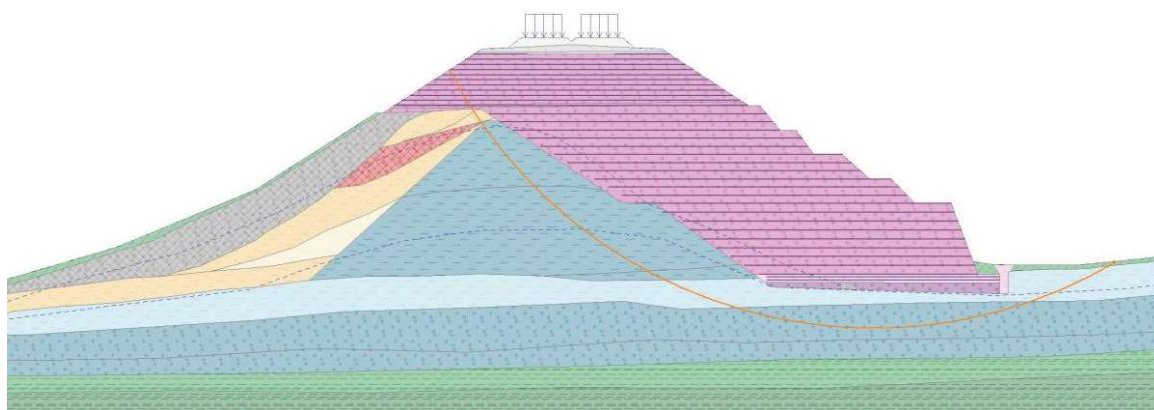
Obrázok 4.8 zobrazuje profil telesa násypu v km 181,625 (v smere do Chebu), kde je možné badať zložité geologické pomery. Pôvodný násyp je približne z roku 1873, kedy bola trať vystavaná ako jednokoľajná a bol tvorený plastickými ílmi. Vrstvy nad ním predstavujú rozličné materiály, ktorými sa teleso dosypávalo v období, keď sa menili požiadavky na šírku násypového telesa dráhy, konkrétne sa jednalo o ílovité vápnité štrky z okolitých kamenných lomov. Ďalšie materiály, ktorými sa teleso rozširovalo boli rôzne škvary, výzisk, ílovité hliny, prípadne popol. Prisypaný materiál pravdepodobne zamedzil funkčnosti pôvodného systému odvodnenia, došlo k vytvoreniu nepriepustných vrstiev ílovitých zemín, pričom miera saturácie dosahovala v niektorých miestach až 100% [10].



Obrázok 4.8: Profil násypového telesa v km 181,625 (smer Cheb) s veľmi premenlivou geológiou a pôvodným ílovitým telesom násypu z roku 1873 [10].

V rámci sanácie bolo potrebné odťažiť nestabilnú časť telesa násypu, táto bola nahradená úplne novým násypom s výstužným prvkom. Zároveň bolo nutné spevniť podložie násypu, zabezpečiť dostatočné odvodnenie oblasti, zriadiť nový priepust a

samozrejme vystavať nový železničný zvršok a trakčné vedenie [12]. Okrem skolabovaného úseku trate bolo nutné preskúmať celé teleso násypu a to, v akom stave sa nachádzajú okolité časti trate. Sanácia telesa bola realizovaná formou výstužnej konštrukcie s lícovými prvkami typu Green Terramesh (pozri Obrázok 4.9), pričom ich sklon sa pohyboval v rozmedzí od 45° do 70°. Takýto systém poskytuje okrem výstužnej funkcie aj zaistenie stability čela svahu [10]. Obrázok 4.10 vykresľuje finálny stav sanácie daného úseku.



Obrázok 4.9: Finálny profil násypového telesa v km 181,625 (smer Cheb) s využitím výstužných prvkov [10].

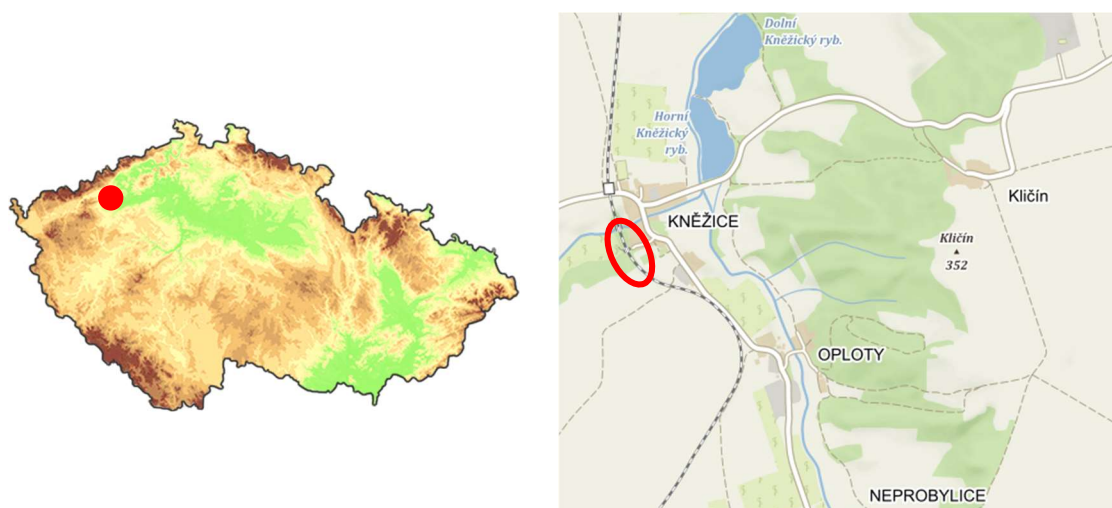


Obrázok 4.10: Finálne prevedenie sanácie úseku Hájek – Dalovice [10].

Na základe zhromaždených informácií je možné prehlásiť, že vývoj deformácií bol dlhodobý a započal pravdepodobne už počas výstavby samotnej trate pred asi 150 rokmi. Územie postihnuté banskou činnosťou, navyše ťažko odvodniteľné, kde už v prvotnej fáze konsolidácie dochádzalo k nerovnomernému sadaniu telesa násypu a nakláňaniu drevenej konštrukcie v jej jadre. Kvôli pokračujúcim deformáciám bolo jadro vystavané aj v prísypce, čo aj tak nezamedzilo ďalším deformáciám zemného telesa. Navyše bola päta násypu nevhodne stabilizovaná pomocou priťažovacej lavice. S nárastom dopravného zaťaženia, výstavby v okolí trate, údržbou zameranou len na železničný zvršok a neudržiavaným systémom odvodnenia došlo k skráteniu životnosti telesa dráhy [9].

4.2 Kněžice

Ďalší problematický úsek sa nachádza v blízkosti obce Kněžice na trati Mladotice – Žatec v okrese Louny (pozri Obrázok 4.11), konkrétne v km 190,150 – 190,300. Prvotný násyp bol vybudovaný pri výstavbe trate, okolo roku 1870, pričom železničná trať v tomto úseku bola spojzdnená až okolo roku 1873. O násype však neexistujú žiadne historické záznamy, z ktorých by bolo možné dohľadať ďalšie údaje [14].



Obrázok 4.11: Problématický úsek pri obci Kněžice v okrese Louny [15].

Násyp mal výšku do 10 m a na úseku boli zaznamenané poruchy GPK na dĺžke asi 50 m (pozri Obrázok 4.12). Viditeľne bolo poškodené aj ľavé krídlo mostu v km 190,286 (pozri Obrázok 4.13). Podľa inklinometrických meraní z roku 2002 (t.j. pred rekonštrukciou) bol zistený náklon násypu východným až juhovýchodným smerom, ten bol badateľný pri povrchu terénu a prenikal až do hĺbky cca 3,5 m. Hodnota vodorovnej deformácie dosahovala 23 mm [16].



Obrázok 4.12: Viditeľné poruchy GPK v prechodovej oblasti mostu, konkrétne v km 190,286 [16].



Obrázok 4.13: Poškodenie ľavého krídla mostu v km 190,286 [16].

V rámci geologického prieskumu boli prevedené 2 zarážané sondy, 5 penetračných sond (dynamická penetrácia) a 4 sondy kované strojovo, ďalej boli prevedené potrebné laboratórne skúšky. Podľa dynamickej penetrácie tvorí násyp hlavne: štrk koľajového lôžka frakcie 32/63, vrstva popola (lokálne so štrkovými polohami), hlinitý štrk a jemnozrnné jadro násypu tvoria zas sprasované hliny pevnej konzistencie [14].

Z morfológického hľadiska sa násyp nachádza v plytkej panvovej štruktúre s nadmorskou výškou asi 245 – 252 m n. m., ktorá bola modifikovaná eróznou činnosťou

zaniknutého potoka Leska. Na základe historických máp je možné povedať, že potok pretekal pod železničným mostom v km 190,152, následne sa vinul pozdĺž násypu a nakoniec ústil do potoka Leska približne po 200 m. Predkvartérne podložie je tvorené slabo spevnenými ílovcami resp. ílmi so zhlukmi piesčitých ílov, ílovitých pieskov a pieskov, lokálne s polohami ílovitého uhlia až menšími časťami hnedého uhlia. Údolné sedimenty sú zastúpené aluviálnymi sedimentami (naplaveninami) Leskovského potoka a historického vodného toku prúdiaceho skrz násypové teleso v km 190,152. Jedná sa konkrétne o sedimenty typu zvodneného hlinitého štrkopiesku až hrubozrnného piesku. Najvrchnejšie sedimenty sú tvorené holocénnymi naplaveninami jemnozrnného charakteru s prímiesami piesčitej príp. štrkovitej frakcie s obsahom organického materiálu. Násyp je tvorený navážkami, tie boli postupne spracované do formy konštrukčných vrstiev násypu. V jadre sú to najmä sprašové hliny, ďalej popol a škvara (lokomotívny popol) použité v korune násypu a bočných prísypoch. Prechod koruny násypu do jadra pravdepodobne pozostáva z drenážnej vrstvy štrku hrúbky asi 0,5 m, prípadne sa tam mohli nachádzať drevené podvaly plniace funkciu roznesenia zaťaženia [14].

Na základe geotechnického prieskumu bola detegovaná pomerne vysoká hladina podzemnej vody, ktorá má vplyv na stabilitu násypu pri zvyšujúcom sa zaťažení od dopravy na železničnej trati. Pravdepodobne dochádzalo k prenikaniu zrážkových vôd cez koľajové lôžko a vrstvy popola až k jemnozrnnému jadrú násypového telesa. Prisypávaním rôznych priepustných materiálov mohlo dochádzať k zhoršeniu odtoku týchto zrážkových vôd a mohli vzniknúť tzv. bezodtokové kapsy. Pomalší odtok vody mohol mať za následok neblahý účinok na jemnozrnné násypové teleso. Dané skutočnosti boli badateľné v zarážaných aj penetračných sondách. Pod vrstvami štrku a popola bolo možné registrovať nižší stupeň konzistencie jemnozrnných zemín, v niektorých penetračných sondách sa ukázalo aj priame zvodnenie. Zadržiavanie zrážkovej vody spôsobilo sekundárnu degradáciu zemnej pláne. Prieskum taktiež poukazuje na polohu humózneho horizontu (ílovito-piesčitej hliny) z čoho vyplýva, že násyp bol budovaný na neupravenom podloží bez sanácie. Navyše sklony svahov násypu boli pomerne veľké, čo spôsobovalo ich nestabilitu. Neustálym dopĺňovaním materiálu do štrkového lôžka dochádzalo k expanzií koruny násypu do strán [14].

Z hľadiska vhodnosti použitia týchto zemín do konštrukcie násypu a ČSN 73 6133 sú tieto zeminy vhodné iba podmienene. Na základe získaných poznatkov bolo v rámci sanácie navrhnuté vybudovanie opornej lavice a zároveň navrhnutý monitoring oblasti. K sanácií tohto úseku došlo v roku 2003. Keďže bol násyp vystavaný na neupravenom podloží z ílovitých a hlinitých zemín tried F7 a F8, navyše objemovo nestálych, nový návrh pozostával z kompletného odťaženia násypu až po úroveň základovej škáry (pozri Obrázok 4.14). Násyp bol následne vybudovaný nanovo po vrstvách z pôvodných zemín zlepšených vápnom. Nasýtenie zemín násypu vodou spôsobilo degradáciu šmykových a deformačných parametrov zemín. Čelo násypu bolo vystužené pomocou geotextílie z polypropylénu. Kvôli poškodenému krídlu mostu (pozri obrázok 4.15) bolo cieľom obmedziť zemný tlak na neho pôsobiaci, to sa previedlo vytvorením vyľahčenej zóny (asi 2,0 m) pri krídlu mostu,

do ktorej bolo použité ľahké keramické kamenivo (Liapor). Rekonštrukcia samotného mostného krídla (Obrázok 4.18) bola prevedená až po vystavaní nového násypu (pozri Obrázok 4.16 a Obrázok 4.17) [16].



Obrázok 4.14: Postupné odťazovanie telesa násypu [16].



Obrázok 4.15: Poškodenie mostného krídla viditeľné po odťazení násypu [16].



Obrázok 4.16: Pohľad na železničný zvršok a násyp po dokončení [16].

Pri kontrolnom meraní inklinometrom v roku 2006 bola hodnota vodorovnej deformácie 5 mm, a to od posledného merania po dokončení sanácie v decembri roku 2003. V hlbších častiach násypu (3,5 až 10,5 m) namerané hodnoty deformácií nepresiahli odchýlku, ktorá udáva presnosť tejto metódy [16].



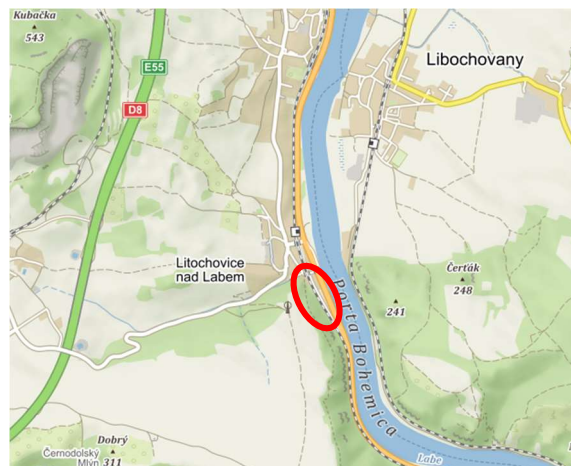
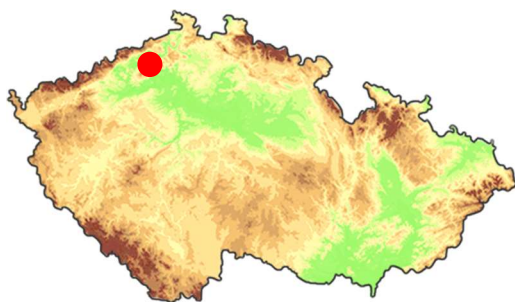
Obrázok 4.17: Nové násypové teleso [16].



Obrázok 4.18: Odbúrané krídlo mostu pred finálnym dokončením [16].

4.3 Litochovice nad Labem

Litochovice nad Labem sú miestnou časťou obce Prackovice nad Labem v okrese Litoměřice v Ústeckom kraji (pozri Obrázok 4.19). V roku 2014 tu bola prevedená oprava svahov telesa násypu v km 501,400 – 501,650 na trati Praha – Děčín. Sanačný úsek bol dlhý približne 227,5 m.



Obrázok 4.19: Zobrazenie geografickej polohy riešeného úseku v miestnej časti Litochovice nad Labem [17].

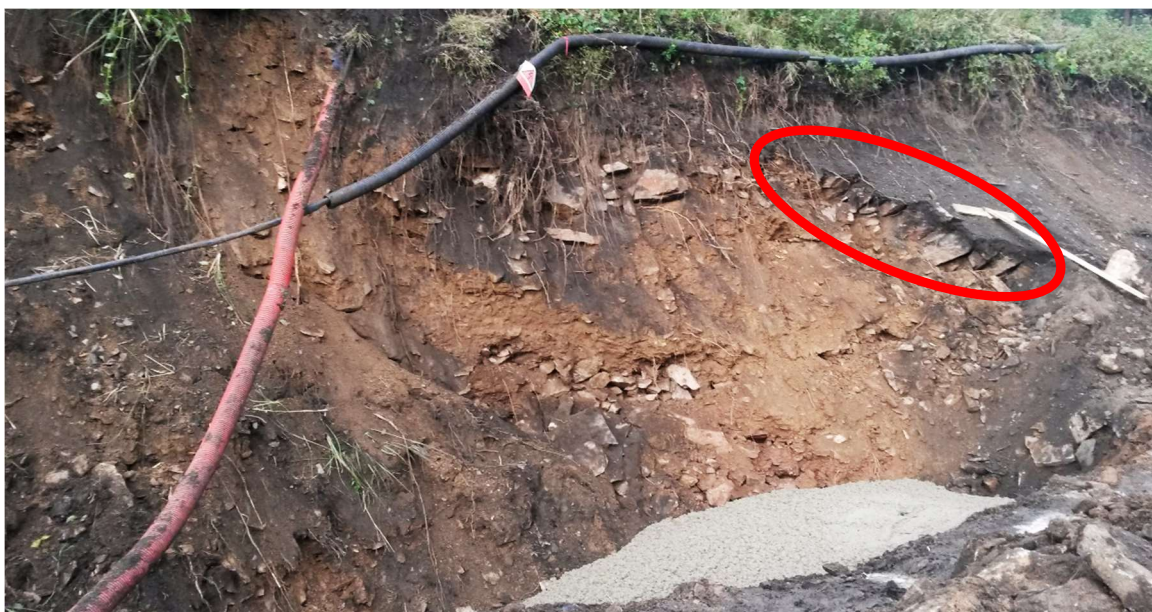
Po povodniach v roku 2013 došlo k lokálnemu zosuvu svahu násypového telesa. Po dobu prevádzky sa na pôvodných svahoch násypu, aj kvôli čisteniu koľajového lôžka, nahromadili presypy nevhodných materiálov, na ktorých bol osadený gabionový múr. Ten mal slúžiť na podchytenie štrkového materiálu, no vykazoval známky nestability a zosúval sa po svahu pôvodného násypu poškodeného povodňami. Na pôvodný svah bola kedysi

uložená kamenná rovnanina, ktorá vytvorila dokonalú šmykovú plochu a umožnila tak zosuv prisypaných materiálov. Koruna násypu už ďalej nespĺňala normové parametre šírky pláne telesa železničného spodku [18].

Inžiniersko-geotechnický prieskum bol prevedený formou 7 prieskumných rýh a preukázal výskyt kamennej rovnaniny (pozri Obrázok 4.20 a Obrázok 4.21). Toto kamenné opevnenie bolo overené v hĺbke približne 40 až 80 cm na celom skúmanom úseku. Ďalej popisoval podložie, ktoré je tvorené prevažne zvetranými pararulami pripomínajúcimi hrubší štrk s kameňmi a prímiesou jemnozrnnej zeminy (G3 G-F). Aktívnu zónu, o mocnosti asi 2 m, tvoria opäť pararuly silno zvetrané až rozložené charakteru silno hlinitého až ílovitého piesku s úlomkami celistvej horniny (S4 SM). Balast, odpadná zemina po čistení koľajového lôžka, pokrýva svahy telesa a je tvorená hlinitým štrkom [18]. Uloženie vrstiev je zobrazené aj na Obrázku 4.22.

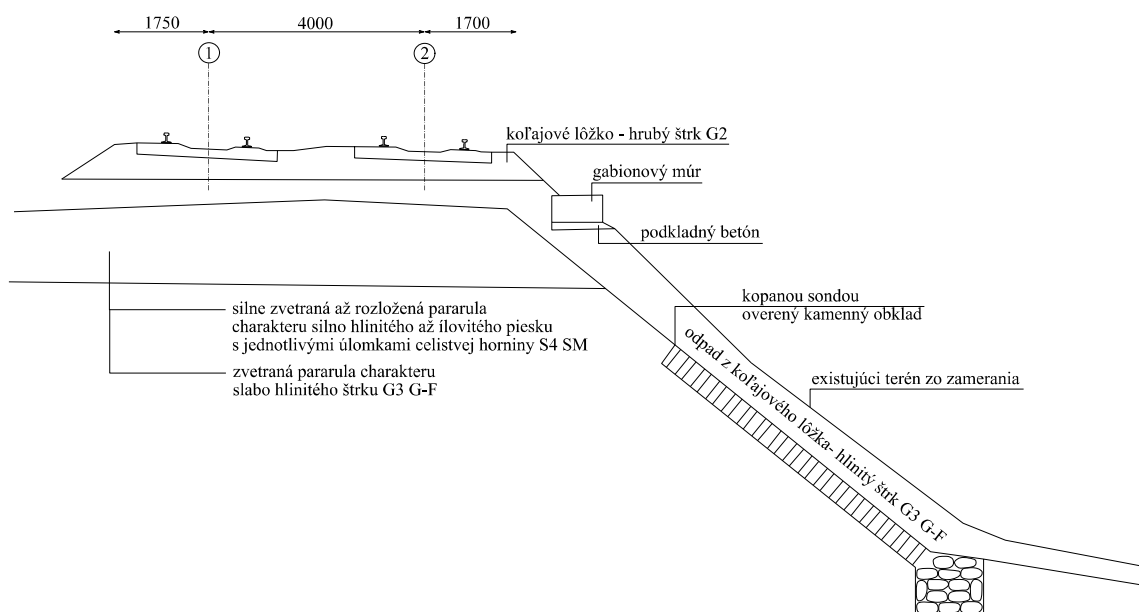


Obrázok 4.20: . Viditeľné opevnenie pôvodného telesa dráhy [18].



Obrázok 4.21: Odkopaný pravý svah s viditeľným kamenným obkladom.

Nevhodné založenie gabionovej steny (plytké založenie) spôsobilo jej deformácie v úrovni dráhového chodníka (banketu) až v hodnotách 25 cm. Taktiež bolo možné badať hrubú vrstvu voľne prisypaného a nezhutneného materiálu pochádzajúceho z pravidelného čistenia koľajového zvršku, ktorý však nebol ďalej spracovaný. Vzniklo tam nezhutnené zemné prostredie kyprého charakteru, ktoré bolo stlačiteľné. Existujúce odvodnenie pláne železničného zvršku nezabránilo zatekaniu zrážkovej vody do základovej škáry a do podložia, čo ešte viac zhoršilo plytké založenie pätného múru. Vykonané penetračné skúšky preukázali, že podložie je stlačiteľné a nie je dostatočne únosné [18].



Obrázok 4.22: Priečný rez – kopaná sonda v km 502,070 – skladba zemín v telese dráhy [18].

V rámci sanácie došlo k vybudovaniu betónového pätného múru v päte násypu za účelom zaistenia nového presypu (pozri Obrázok 4.23). Základová škára musela byť zvolená dostatočne hlboko, až pod úroveň kritickej šmykovej plochy. Kamenná rovnánina bola rozobraná a spätne použitá ako materiál pre obloženie nového svahu, bola skladaná na sucho. Kvôli prepojeniu pôvodného a novobudovaného svahu bolo prevedené zazubenie svahov výkopu. Gabionový múr, vykazujúci nestabilitu bol kompletne odstránený. Pláň železničného spodku bola rozšírená na 3,3 m a sklon nového telesa násypu bol upravený v sklone 1:1,3. Pri realizácii sa preukázala neexistencia betónového základu pre osadenie múru, a tak boli dodatočne navrhnuté mikropilóty [18].

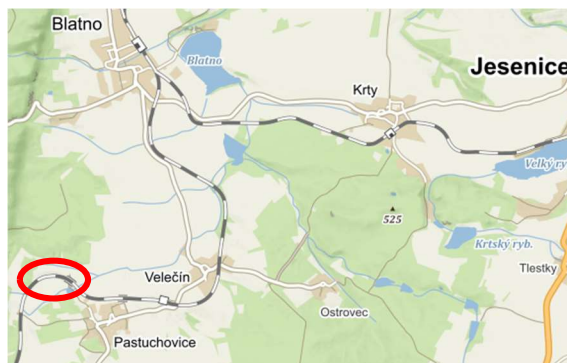
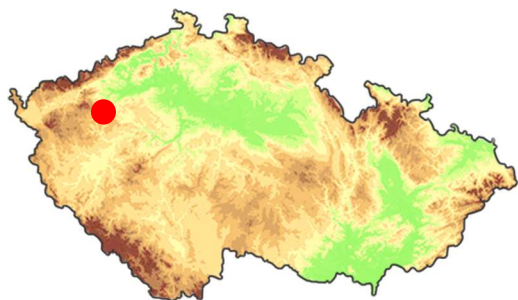


Obrázok 4.23: Pohľad na pravý svah (v smere staničenia) násypu po prevedenej sanácii [19].

4.4 Pastuchovice

Ďalší násyp v havarijnom stave sa nachádza v Plzenskom kraji, v obci Pastuchovice na jednokolejnej trati Plzeň – Žatec, konkrétne v km 150,700 – 151,435 (pozri Obrázok 4.24 a Obrázok 4.25). Ten bol vystavaný už pred viac než 150 rokmi, a to okolo rokov 1871 – 1872. Z historického hľadiska neexistujú komplexné záznamy o tomto telese. Jediným záznamom je ten z roku 1981, keby bol na tomto úseku detegovaný zosuv svahu za železničným mostom v staničení km 151,133 [20].

S novými požiadavkami na trať v minulosti sa tento násyp stal postupne nevyhovujúcim a bolo nutné zabezpečiť jeho opravu. Sanácia bola prevedená škvarovými prísypmi (zeminy triedy S3 a G3 G-F) alebo vystavaním priťažovacích lavíc z lomového kameňa (materiál triedy G4 s kamenitou prímiesou), čo pravdepodobne spôsobilo súčasnú nepriaznivú situáciu v danej oblasti a nevyhovujúci stav násypového telesa. V tomto úseku tiež dochádzalo k opakujúcim sa poklesom telesa násypu, ktoré spôsobili rozpad GPK v km 150,700 – 151,435 [21].



Obrázok 4.24: Zobrazenie geografickej polohy riešeného úseku v obci Pastuchovice, Plzenský kraj [22].



Obrázok 4.25: Letecká 3D snímka problematického úseku v obci Pastuchovice [22].

Historický násyp, vysoký asi 10 m, je tvorený súdržnými zeminami – piesčitými ílmi a ílmi so strednou plasticitou (triedy F6, F4 a S5) prevažne pevnej konzistencie, ktoré zobrazuje Obrázok 4.26. Teleso násypu leží na podloží z kvartérnych deluviálnych a fluvio-deluviálnych sedimentov (triedy F4, F6, F7 a F8). Skalné podložie tvoria zvetrané prachovce a ílovce (triedy F6/R6, hlbšie R5 až lokálne R4/R3) z obdobia mladších prvohôr (permokarbónu) [23].



Obrázok 4.26: Materiál pôvodného násypu z rokov 1871 – 1872 [24].

V minulosti dosahoval pozdĺžny sklon železničnej trate pri obci Pastuchovice až 2,5 %, čo viedlo k ďalším prísypom materiálu škvarového charakteru kvôli zmene polohy nivelety a k zmierneniu tohto sklonu. Koruna násypu trate sa tak v roku 2009 nachádzala oveľa vyššie ako v minulosti. Prevedený doplnkový prieskum preukázal kyprý charakter prísypávaných materiálov, ktoré boli pravdepodobne sypané voľne zo železničnej techniky. Zatiaľ čo, priťažovacie lavice z lomového kameňa dokázali zabezpečiť stabilitu násypového telesa, výrazne zhoršili GPK. Na tomto úseku boli definované dva problémy: rozpad GPK a strata stability násypového telesa. Nerovnomerné sadnutie prísypov zo škvary v korune násypu a ich postupné roztláčanie do strán spôsobilo rozpad geometrických parametrov koľaje. Strata stability telesa mala pôvod v príliš strmých svahoch násypu, ktoré boli navyše tvorené nezhutneným materiálom škvarového charakteru [23].

V roku 2009 boli prevedené sondy dynamickej penetrácie v korune telesa násypu ako doplnenie geotechnického prieskumu, ktoré poukázali na nevhodný stav vrchnej časti tohto telesa. Zároveň boli svahy násypu vplyvom rôznych zmien uvážené ako príliš strmé [20]. Dynamická penetrácia bola prevedená znova v roku 2010. Jej úlohou bolo zistiť do akých hĺbok je nutné previesť sanačné opatrenia. Okrem škvarových prísypov ako sanačných vrstiev násypu bola škvara nájdená penetračnými sondami aj pod koľajovým lôžkom. Táto škvara bola saturovaná vodou, čo spôsobilo jej minimálny penetračný odpor a vykazovala minimálnu únosnosť. Vo vrchných častiach násypového telesa došlo k prepadom sútyčia dynamickej penetrácie, ktoré boli spôsobené tým, že približne do hĺbky 2,0 m bola časť koruny násypu značne nasýtená vodou. Po porovnaní penetračných skúšok z roku 2009 bol zistený pokles penetračného odporu [20].

V rámci sanácie bolo navrhnuté nové vedenie trasy, ktorého úlohou bola optimalizácia zaťaženia násypu a smerových pomerov. Bol odstránený existujúci železničný zvršok aj odťažované koľajové lôžko a prísypy z koruny násypu. Ďalej bola navrhnutá úprava sklonu zemnej pláne. Neúnosnosť podložia bola ošetrená výmenou materiálu podložia za vhodnejší s pridaním netkanej geotextílie v prvej časti úseku. V ostatných častiach úseku boli prevedené štrkové piliere D500 metódou replacement či navrhnutá realizácia priťažovacích lavíc [23].

5 Opatrenia prevedené Správou železníc České republiky

Po zosuve železničnej trate v úseku Hájek – Dalovice sa Správa železníc České republiky (ďalej iba SŽ ČR) rozhodla nastaviť systémové riešenia podobných problémov. V rámci celého územia České republiky boli vytipované úseky, kde by mohlo dôjsť k poruchám železničného spodku. Na území bolo evidovaných 10 úsekov, ktoré je nutné vyriešiť prioritne. SŽ ČR sa rozhodla pre vytvorenie databázy, kde sú zaevidované základné informácie o nestabilných úsekoch, ktoré vedú k ďalším krokom nutným k eliminácii príčin nestability. Základnými informáciami sa rozumie napríklad charakter trate, rýchlosť v koľaji, rád koľaje a podobne. Ďalej databáza obsahuje aj všeobecné informácie o charaktere terénu, podrobný popis zemného telesa, hlavne popis jeho vúd a ich príčiny [25].

Za nestabilný úsek je považovaná časť trate, kde vplyvom opakovaných porúch a deformácií (dočasných alebo dlhodobých) zemného telesa dochádza k obmedzeniu či ohrozeniu prevádzky dráhy a dráhovej dopravy. Podľa toho je možné klasifikovať nestabilné úseky do 5 kategórií:

- 0 – úseky po sanácií, ktoré sú stále uvedené v databáze a predpokladá sa ich kontrola, aby sa zamedzilo opätovnému porušeniu
- 1 – úseky, na ktorých vznikajú drobné vady v GPK a v zemnom telese
- 2 – úseky trate, kde sú vady v GPK a v zemnom telese závažnejšie a častejšie
- 3 – úseky, v ktorých nejakým spôsobom (pozdvoľným) dochádza k deštrukciám zemného telesa – musí byť upravená prevádzka dráhovej dopravy
- 4 – úseky, kde už došlo k deštrukciám zemného telesa, to znamená, že samotný zosuv už prebehol a nie je umožnená prevádzka dráhovej dopravy [25].

K dátumu 8.9.2022 bolo evidovaných 120 nestabilných úsekov, väčšina z nich spadá do kategórie 2, a to v počte 60 úsekov. Databáza je momentálne k dispozícii len pre interné použitie pre Odbor traťového hospodárstva generálneho riaditeľstva (GŘ O13) [25].

Snahou je, aby nedochádzalo k ohrozeniu na ľudských životoch a k znehodnoteniu majetku, preto je dôležitým príspevkom k včasnému odhaleniu porúch zemného telesa inžinierskogeologický monitoring. Tento môže mať 3 rôzne podoby:

1. Štandardný geotechnický monitoring – jedná sa o geodetické sledovanie pomocou štandardných prieskumných diel ako sú hydrotechnické vrty, hydrostatická nivelácia či inklinometrické vrty,
2. Kontinuálne meranie stavu zemného telesa – táto forma je momentálne testovaná a jedná sa o systém detekcie zosuvu pôdy pomocou čidiel náklonu,
3. Družicová radarová interferometria (InSar) – je aktívna metóda, pri ktorej je prevádzaný prieskum diaľkovo a sledujú sa zmeny polohy zemského povrchu vzhľadom k prelietajúcej družici [25].

6 Metódy sanácií zemných telies železničného spodku

Nasledujúca kapitola zobrazuje možné spôsoby sanácií násypov na železničných tratiach podľa predpisu SŽ S4.

V rámci sanácie zemného telesa je niekedy nutné jeho kompletne odťazenie a výstavba nového telesa. Teleso násypu môže byť budované zo zemín alebo hornín, musí spĺňať požadovaný tvar, vlastnosti materiálov a zohľadňovať ďalšie pomery okolia. Znalosť geologických pomerov a fyzikálno-mechanických vlastností zemín, príp. hornín, je nutná pri budovaní zemných telies. Celkový návrh by mal nadväzovať na ďalšie súčasti železničného spodku. Teleso musí zaistiť požadovanú únosnosť i stabilitu a odolávať zaťaženiu od železničnej dopravy bez nadmerných deformácií. Zároveň, musí konštrukcia odolávať pôsobeniu klimatických vplyvov. Projektovanie zemného telesa si vyžaduje riešenie nasledujúcich okolností:

- stratu celkovej stability a únosnosti,
- porušenie povrchovou alebo vnútornou eróziou, prípadne vymieľaním,
- porušenie vztlakom,
- vznik deformácií, ktoré spôsobia isté obmedzenia použiteľnosti zemného telesa.

Kvalitné teleso železničného spodku je dané splnením podmienok na mieru zhutnenia a únosnosti pláne telesa železničného spodku, zemnej pláne ale aj technologických vrstiev a podložia násypu. Netreba opomínať ani správne odvodnenie zemného telesa príslušným odvodňovacím prvkom [26].

Nutnosť prevádzať sanácie úseku spôsobujú atmosférické činitele, hydrogeologické alebo geologické vplyvy či namáhanie zemného telesa železničnou dopravou, ktoré môžu podmieniť vznik porúch zemného telesa. Podľa vplyvu poruchy na prevádzku železničnej dráhy sa poruchy delia na tie, ktoré:

- neohrozujú bezpečnosť prevádzky,
- ďalším vývojom môžu spôsobiť ohrozenie bezpečnosti,
- bezprostredne ohrozujú bezpečnosť prevádzky.

Pri poruchách neohrozujúcich bezpečnosť prevádzky je postačujúce upraviť geometrické parametre koľaje. Ostatné poruchy môžu poukazovať na vážnejšie problémy ohrozujúce stabilitu násypového telesa a je nutné ich preskúmať (pomocou inžinierskogeologického prieskumu), prípadne odstrániť (zvoliť vhodný typ sanácie) [1]. Predpis SŽ S4 uvádza komplexný prehľad metód a cieľov, ktoré je nutné dosiahnuť prevedením sanácie. Tento popis je uvedený v Tabuľke 6.1.

Tabuľka 6.1: Základné metódy sanácií zemných svahov [1].

Typ deformácie	Popis deformácie	Sanačná metóda	Cieľ sanácie
vymieľanie	zrážková voda vymieľa zeminu zo svahu	vegetačné spevnenie svahu	ochrana svahu pred erozívnymi účinkami dažďových vôd
		technické spevnenie svahu	ochrana svahu pred prúdom dažďovej vody
		vegetačné + technické spevnenie svahu (kombinované)	ochrana svahu pred účinkami dažďových vôd
vymieľanie a vyplavovanie	podzemná voda vyplavuje zeminu zo svahu	filtračná vrstva na svahu	zamedzenie vyplavovania jemných častíc zeminy
		rebrá z priepustného materiálu	ochrana svahu pred účinkami podzemných vôd
vymieľanie a vyplavovanie vlnobitím	podmieľanie svahu prúdiacou vodou alebo vymieľanie vlnobitím vo vodnej nádrži	umelé spevnenie päty a povrchu svahu	ochrana svahu pred podomletím a proti účinkom vlnobitia
zosuvy pozdĺž rovinnej šmykovej plochy	zosuv drnovej pokrývky a humusu v dôsledku dažďových zrážok	vegetačné (biologické) spevnenie svahu	účinné spojenie humusu so zeminou na svahu
		vegetačné + technické spevnenie svahu (kombinované)	účinné spojenie humusu so zeminou na svahu
	zosuv povrchovej vrstvy zeminy pri topení výmrazkov v svahu	vrstva nenamrzavého materiálu na svahu	zamedzenie vzniku výmrazkov v povrchovej vrstve svahu
	zosuv časti násypu prisypanej k staršiemu železničnému násypu	zriadenie stupňov na svahu starého násypu, prípadne zaťažovacie lavice v päte nového násypu	zvýšenie pasívnych síl
	podomletie päty svahu pôsobením tečúcej vody	umelé opevnenie päty násypu	ochrana svahu pred podomletím

zosuvy pozdĺž rotačnej šmykovej plochy	zosuv svahu násypu	zriadenie zaťažovacej lavice	zvýšenie pasívnych síl
		budovanie násypu po vrstvách	zvýšenie pasívnych síl
		rebrá z priepustného materiálu	zvýšenie pasívnych síl
		oporná stena, gabiony	zachytenie zemného tlaku
		stena zo štetovnic alebo pilót	zachytenie zemného tlaku
	zosuv svahu zárezu	budovanie po vrstvách	zvýšenie pasívnych síl
		rebrá z priepustného materiálu	zvýšenie pasívnych síl
		kotvenie svahu zárezu zemnými kotvami	zvýšenie pasívnych síl
		horizontálne odvodňovacie vrty	zmenšenie aktívnych síl, úprava vodného režimu
		zmenšenie sklonu svahu	zmenšenie aktívnych síl
		zárubná stena, gabiony	zachytenie zemného tlaku
		stena zo štetovnic alebo pilót	zachytenie zemného tlaku
	padanie kameňov a balvanov	zvetrávanie povrchu horniny	odstránenie uvoľnených kameňov a balvanov
podmurovanie balvanov			zaistenie labilných častí skalného svahu
kotvenie balvanov			zaistenie labilných častí skalného svahu
utesnenie trhlín a škár skalných svahov hĺbkovým škárovaním cementovou maltou			spomalenie zvetrávacieho procesu
plombovanie skalného svahu vymurovaním alebo vybetónovaním dutín			spevnenie skalného svahu
torkrétové omietky poprípade s oceľovými sieťami			ochrana horniny skalného svah pred zvetrávaním
plášť zo striekaného betónu vystužený oceľovými sieťami			ochrana horniny skalného svah pred zvetrávaním a spevnenie skalného svahu
obkladové steny			ochrana horniny skalného svahu pred zvetrávaním

		oceľové steny alebo geomriežky zakotvené na povrchu skalného svahu	ochrana trate pred padaním zvetranej horniny do koľaje
		dynamické bariéry	ochrana trate pred padaním zvetranej horniny do koľaje
		galérie	ochrana trate pred padaním zvetranej horniny do koľaje
ohrozenie trate rútením blokov a skalných stien pozdĺž odlučných plôch a trhlín	trhavý účinok mrznúcej vody, pokles trenia na odlučných plochách, vplyv železničnej prevádzky	odstránenie nestabilných blokov a skalných stien	ochrana trate pred zrútením blokov a skalných stien
		podmurovanie skalných blokov	zaistenie labilných blokov na svahu
		kotvenie skalných blokov	zaistenie labilných blokov na svahu
		kotvenie skalných stien	zvýšenie stability skalných stien
		podchytenie skalných stien vystuženými rebrami, piliermi alebo trámami	zaistenie stability skalných stien

6.1 Založenie násypu

Ak je podložie násypu nevhodné, je nutné materiál upraviť alebo nahradiť (čiastočne alebo kompletne). Najčastejšími problémami je nízka únosnosť, objemová nestálosť, obsah neprípustných častíc či nadmerná stlačiteľnosť podložia. Únosnosť je možné zabezpečiť nasledovne:

- zlepšením zeminy spojivami,
- zlepšením zeminy mechanickou stabilizáciou,
- úpravou vodného režimu a stavu zemín v podloží drenážnymi ryhami, drénmi (plošnými alebo vertikálnymi),
- znížením prítlačenia – použitím vyľahčených násypov.

Založenie telesa násypu na podloží z neúnosných zemín alebo na neúnosnom podloží si vyžaduje zriadenie konsolidačnej vrstvy, ktorá okrem rovnomerného prenosu zaťaženia zabezpečí drenáž pórovej vody v horizontálnom smere. Konsolidačná vrstva má byť vysoká minimálne 300 mm a má byť zriadená z materiálu daných charakteristík ako napríklad: nenamrzavosť, veľmi dobrá priepustnosť či objemová stálosť. Spravidla sa na tento účel využíva drvené kamenivo, nesúdržné zeminy hrubozrnného charakteru či druhotné materiály (sypaniny z vysokopečnej trosky). Konkrétne rozmery tejto vrstvy sa navrhujú podľa geotechnického prieskumu a na základe vypočítanej konsolidácie podložia. Nutné je dbať na riadne odvodnenie konsolidačnej vrstvy. Použitie geotextílie na oddelenie vrstvy od zeminy pláne podložia sa vyžaduje, ak nie je splnené filtračné kritérium. Do

konsolidačnej vrstvy sa ukladajú výstužné elementy (v jednej alebo viacerých vrstvách) za účelom zvýšenia tuhosti. Možné je aj prevedenie tejto vrstvy z viacerých materiálov, čím vzniká tzv. sendvičová doska. Ako konsolidačná vrstva môže slúžiť i matrac z geobuniek, ktorý sa vyplní štrkom či štrkopieskom. Geobunky najlepšie zaisťujú prenos zaťaženia od zemného telesa do podlažia a sú schopné obmedziť nerovnomerné sadnutie [26].

Problémom môže byť vytlačanie málo únosného podlažia po bokoch násypu, ktorému je možné predísť výstavbou zaťažovacej lavice alebo zmiernením sklonu svahu. Zaťažovacia lavica je daná minimálnou šírkou 3,0 m. Pri jestvujúcich násypoch môže byť budovaná aj ako prisyp, vtedy je vyžadované zriadenie svahových stupňov. S výskytom zvlášť náročných geotechnických pomerov je nutné zvážiť špeciálne založenie násypového telesa. Jedná sa najmä o vysoké násypy, prípadne, ak nie je postačujúce plošné založenie alebo je nutné splniť nároky na nulovú deformáciu podlažia či urýchlenie konsolidácie. Typom špeciálneho založenia je hlbinný základový prvok – pilóta. Podľa materiálu, z ktorého je prvok prevedený sa jedná o pilótu:

- tuhú – z vibrovaného betónu alebo zo železobetónu,
- poddajnú – z piesku alebo štrkopiesku.

Tuhé prvky prenášajú zaťaženie od zemného telesa do podlažia formou roznášacej platformy (konsolidačnej vrstvy), zatiaľ čo prvky poddajné prenášajú do podlažia len časť zvislého zaťaženia a zároveň plnia funkciu vertikálnych drénov pri konsolidácii podlažia.

Na základe spôsobu akým je pilóta inštalovaná sa rozlišuje pilóta:

- vrtaná,
- vhaňaná,
- baranená.

Urýchlenie konsolidácie sa prevádza aj inštalovaním vertikálnych drénov a konsolidačnej vrstvy, čo je charakteristické pri existencií súdržných zemín nasýtených vodou v podlaží vysokých násypových telies. Vzhľadom na vytlačovanie pórovej vody priťažením násypu, ktorá vzlína drénmi do konsolidačnej vrstvy, je nutné zabezpečiť správne odvodnenie konsolidačnej vrstvy [26].

Zvýšenie stability zaisťujú svahové stupne, ktoré sa prevádzajú najmä pri rozširovaní existujúcich násypov alebo pri strmom sklone svahov podlažia (viac než 1:6). Špecifikovaných je viacero typov svahových stupňov, a to podľa ich polohy, na stupne:

- v podlaží násypu,
- na svahu násypu,
- pri rozširovaní dráhového chodníka,
- umiestnené k násypu čelne.

Svahový stupeň by mal byť široký aspoň 1,0 m a je nutné dodržať jeho prevedenie v priečnom sklone 1% – 2%. Výška stupňa nemá presahovať hodnotu 0,75 m resp. výšku 1,50 m u čelne umiestnených stupňov. Netreba zabúdať na zhutnenie svahového stupňa. Svahové stupne je nutné založiť v konsolidovanej časti násypu, čo sa týka násypov, ktoré sú pokryté nekonsolidovanou vrstvou prisypaného materiálu, najčastejšie tvorenou materiálom z čistenia koľajového lôžka [26].

6.2 Teleso násypu

Je možné rozlíšiť násypy nízke (do 6,0 m) a vysoké (nad 6,0 m). Od výšky násypu sa odvíja sklon tvaru násypových svahov. Správne uloženie zeminy do násypu stanovuje príslušná norma. Teleso musí byť tvorené materiálom, ktorý zaistí stabilitu a trvalú únosnosť telesa. Sypanina kamenitého alebo balvanitého charakteru je najlepším materiálom pre výstavbu násypu, ďalej sú to zeminy nesúdržné a nenamrzavé. Súdržné zeminy predstavujú skupinu materiálov podmienčne vhodných. Špecifickú kategóriu predstavujú vrstevnaté násypy, násypy zo spraší a sprašových hĺn, hlušinovej sypaniny alebo násypy z mechanicky zlepšených zemín, prípadne zemín zlepšených spojivami.

6.2.1 Násyp zo súdržných zemín

Ak sa jedná o násyp zo súdržných zemín tak to znamená, že zo súdržných zemín je budované jadro násypu, pričom ochranné vrstvy sú tvorené nesúdržnými zeminami. V niektorých prípadoch je možné jadro budovať striedaním vrstiev zemín súdržných a nesúdržných. Pri takomto zemnom telese je nutné zriadiť konsolidačnú vrstvu. Násyp je vrstvený po jednotlivých častiach, jadro a ochranné vrstvy sú tak kladené naraz v jednej úrovni. Podmienkou je zabezpečiť ochranu svahov násypu, k čomu sú vhodné priepustné a nenamrzavé materiály. Hrúbka ochrannej vrstvy je minimálne 0,6 m, pri zriadení vegetačnej vrstvy až 0,75 m. Sklony svahov násypov zo súdržných zemín udáva Tabuľka 6.2, no zároveň musia byť tieto hodnoty podľa danej geotechnickej kategórie stavby overené výpočtom stability [26].

Tabuľka 6.2: Sklony svahov násypov zo súdržných zemín [26].

Výška násypu	
do 6,0 m	nad 6,0 m
1:2 až 1:2,5 (v závislosti od druhu materiálu)	lomené sklony (lom sklonu sa navrhuje po výške na každých 4,0 až 6,0 metrov)

6.2.2 Násyp z nesúdržných zemín

Naopak, ak sa jedná o násyp z nesúdržných materiálov (štrk, štrkopiesok, hlinitý piesok a podobne), tak je nimi budovaný násyp v celom svojom profile. Na tento účel môže byť použitá aj sypanina (kamenitá alebo balvanitá), násyp sa zriaďuje na celú šírku, pričom [26] udáva maximálnu veľkosť zrna sypaniny. Na základe vhodných technických a ekologických vlastností je možné násyp vybudovať aj z druhotných materiálov priemyselnej výroby ako škvara, vysokopecná troska či stavebná sutina. Ak sú použité materiály, ktoré degradujú vplyvom vyššej vlhkosti alebo dochádza k ich objemovým zmenám, je nutné vytvoriť vrstvu z málo priepustných alebo nepriepustných materiálov. Takúto vrstvu je možné označiť ako uzatváraciu a zriaďovaná je v korune násypu. Ako postupovať pri nedostatočne únosnom podloží je popísané v časti 6.1, kde sú uvedené aj

spôsobu zvýšenia únosnosti podložia. Svahy musia byť opäť opatrené ochranou. Sklony svahov násypov zo súdržných zemín udáva Tabuľka 6.3, no zároveň musia byť tieto hodnoty podľa danej geotechnickej kategórie overené výpočtom stability [26].

Tabuľka 6.3: Sklony svahov násypov z nesúdržných zemín [26].

Výška násypu		Svahy zo skalnej sypaniny
do 6,0 m	nad 6,0 m	
1:1,25 až 1:1,75 (v závislosti od druhu materiálu)	lomené sklony (lom sklonu sa navrhuje po výške na každých 4,0 až 6,0 metrov)	1:1,25 1:1 (pri použití technickej ochrany svahu)

6.2.3 Násyp zo špeciálnych materiálov a konštrukcií

Špeciálnou konštrukciou sa rozumie napríklad násyp budovaný z vystužených zemných konštrukcií. V prípade nutnosti vyľahčenia násypového telesa je možné uchýliť sa k použitiu špeciálnych materiálov ako polystyrén či duté syntetické prvky. Vyľahčené násypy sú vhodné pri vysokých zemných telesách, zvodnených zeminách tvoriacich podložie násypu, u silno stlačiteľných zemín, na územiach postihnutých banskou činnosťou ale aj pri nutnom obmedzení sadnutia či dobe konsolidácie. U týchto materiálov môže dochádzať k degradácií spôsobenej vplyvom výskytu v rizikovitom prostredí, čomu zabráni izolačná ochrana. Je možné ich zriaďovať v odôvodnených prípadoch a radia sa do 3. geotechnickej kategórie. Takto prevedené telesá môžu nahradiť oporné konštrukcie alebo časť telesa násypu kvôli malým nárokom na trvalé zabratie pozemku [26].

Pravidelným striedaním vrstiev (razantne rozličných vlastností) je možné vytvoriť vrstevnatý násyp, ktorý umožní spracovanie aj nevhodných či málo vhodných materiálov. Toto sendvičové teleso je tvorené variáciou poddajnej a stužujúcej vrstvy, pričom charakteristiky vrstiev udáva Tabuľka 6.4. V prípade, že materiály jednotlivých vrstiev nespĺňajú filtračné kritérium, prevedie sa medzi nimi filtračná vrstva [26].

Tabuľka 6.4: Požadované vlastnosti poddajnej a stužujúcej vrstvy pri budovaní vrstevnatého násypu [26].

Vrstva	
Poddajná	Stužujúca
<ul style="list-style-type: none"> • stlačiteľná zemina • poddajná zemina • veľmi vlhká zemina 	<ul style="list-style-type: none"> • menej stlačiteľná zemina • vyššia šmyková pevnosť zeminy • zemina pôsobiaca ako drenážna vrstva

6.3 Ochrana svahov

Úlohou ochrany svahov je zaistiť nielen ich stabilitu, ale zároveň ich ochrániť pri pôsobení poveternostných vplyvov. Konkrétny typ ochrany svahu sa volí podľa geologických podmienok, typu svahu alebo klimatických či miestnych podmienok. Táto ochrana môže

byť prevedená ako vegetačná, technická prípadne kombinovaná. Je nutné rozlíšiť či sa jedná o ochranu svahu zemného alebo skalného charakteru. Úpravy skalných svahov sú najčastejšie pri zárezových svahoch, preto sa ďalší popis sústreďuje na úpravy svahov zo zemín.

6.3.1 Vegetačná ochrana

Najpoužívanejšou metódou ochrany svahov je vysadenie vegetácie, ktorá zabezpečí spevnenie svahu systémom vlastných koreňov. Zriaďuje sa od úrovne pôvodného terénu po úroveň zemnej pláne, pričom sa zriaďuje aj na zaťažovacích laviciach, ale nie na dráhových chodníkoch. Biologická ochrana svahu môže byť prevedená v niekoľkých variantoch:

- rozloženie ornice a osiatie či výsadba drevín,
- zmes jalovej zeminy a ornice s následným osevom,
- hydroosev,
- drnovanie,
- pleteniny a plôtiky [26].

Metóda je volená podľa materiálu násypu a prevádza sa v zadanom sklone. Vrstva ornice sa rozprestiera v hrúbke 100 až 150 mm, následne sa oseje trávny semenom. Vysadenie drevín je charakteristické pre prípady veľmi vlhkých, ale aj vysychavých svahov. Vhodné typy vegetácie sú určené na základe pôdneho prieskumu. Pri prevádzaní zmesi ornice s jalovou zeminou sa tá najprv rozruší a následne zmieša s rovnakým množstvom ornice, pričom hrúbka vrstvy je opäť 100 až 150 mm. Mulčovanie, opatrenie zeminy materiálom organického pôvodu, dokáže zabezpečiť kvalitnejšie podmienky pre uchytenie semena. Hydroosev spája mulčovanie s osiatím a najčastejšie sa prevádza u svahov z jalovej zeminy, pričom je možné skombinovať ho s geotextíliou. U menších svahov sa často používa drnovanie, kedy je svah obložený pomocou drnov. Drny sa ukladajú na vrstvu ornice, plochu je nutné najprv zhutniť. Drnovanie sa delí na celoplošné alebo úsporné (drny sú ukladané v pásoch a medzipriestor je vyplnený ornice). Pleteniny sú vhodné pre ochranu menších svahov vlhkého charakteru, zabraňujú odplaveniu ornice a sú vhodným prostriedkom likvidácie erózných rýh [26].

6.3.2 Technická ochrana

V tomto prípade sa jedná o spevnenie svahu násypu za pomoci technického prvku ako napríklad:

- dlažby,
- záhozy,
- štrkové koberce,
- rovnaniny,
- obklady,
- matrace z kameňa alebo geotextílií,

- drôtenokamenné konštrukcie (gabiony),
- geotextílie,
- geomriežky,
- siete,
- rohože [26].

Prvým spevňujúcim prvkom je dlažba. Môže byť kamenná (lomový i dlažobný kameň) alebo betónová (tvárnice prípadne vybetónovaná na mieste). Dlažbu je možné ukladať na sucho, zaliat' ju do škár, ukladať na cementovú maltu alebo do betónového lôžka. Zához je tvorený kameňom alebo iným materiálom, ktorý sa rozloží na upravený svah a plní funkciu spevnenia svahu. Najčastejšie je tvorený lomovým kameňom a svah by mal byť maximálne v sklone 1:2,5. Kvôli zvýšeniu odolnosti svahu sa prevádza štrkový koberec. Ide o zhutnený štrkový zához, ktorého sklon nemá presahovať 1:2 a maximálna hrúbka zhutňovanej vrstvy je 200 mm. Rovnanina je navrstvenie lomového kameňa resp. betónových prvkov na seba bez použitia spojiva, za predpokladu, že škáry sú vyplnené štrkom. Sklon takéhoto svahu by nemal byť väčší ako 1:1. Gabiony predstavujú priestorové prvky tvaru kocky či kvádra, presnejšiu konštrukciu popisuje Tabuľka 6.5. Navyiac rozlišujeme gabionové koše a matrace. U matracu je výška najmenším rozmerom a jej maximálna hodnota je 500 mm. Každý prvok sa skladá z dna, bočných stien, viečka a prekážok. Gabion je nutné posúdiť na únosnosť základovej pôdy a celkovú stabilitu, keďže plní statickú funkciu [26]. Gabiony môžu byť uložené a tvoriť gabionovú stenu (pozri Obrázok 6.1).

Tabuľka 6.5: Typy gabionových konštrukcií [26].

Gabion	Viazaný	Obal	viazaný zo šesťbokého ocelového pletiva	Výplň	prírodný kameň lomový kameň recyklát
	Zváraný		zváraný z ocelových sietí		prírodný kameň lomový kameň recyklát
	Plastový		z vysokopevnostnej geomriežky z PE alebo PP		prírodný kameň lomový kameň recyklát



Obrázok 6.1: Gabionová stena [27].

6.3.3 Kombinovaná ochrana

Kombinovaná ochrana vzniká spojením ochrany vegetačnej a technickej alebo sú to nasledujúce prvky:

- trávne rohože,
- vegetačné tvárnice,
- spojenie geotextílie a hydroosevu,
- bio degradačné rohože,
- protierózne sieťoviny (geosiete),
- celulárne systémy (geobunky),
- a podobne [26].

7 Návrh a posúdenie sanácie konkrétneho železničného násypu

Nasledujúca kapitola zobrazuje problematiku svahových pohybov v konkrétnej lokalite. Okrem kompletného popisu územia, geomorfologických aj geotechnických parametrov je opísaný postup prevedených sanačných opatrení. Zároveň bol vytvorený 2D model v km 25,915 v programe Plaxis 2D, ktorým je prevedená napätostne-deformačná analýza ako aj analýza stability. Podklady pre spracovanie poskytl spoločnosť DIPONT s.r.o.

7.1 Lokalita a identifikačné údaje

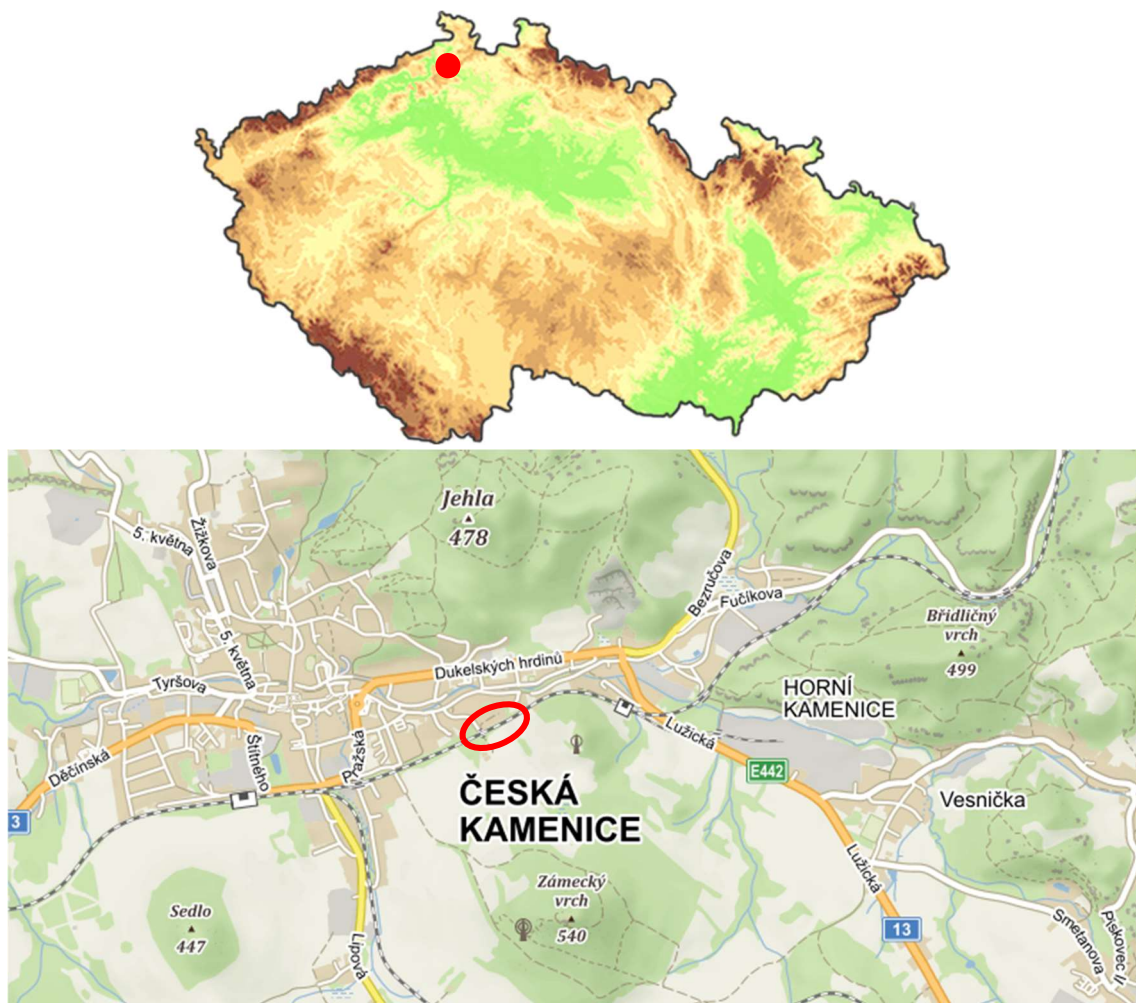
Pre posúdenie konkrétneho úseku bola zvolená lokalita medzi železničnou stanicou Česká Kamenice a Mlýny v okrese Děčín. Všetky identifikačné údaje stavby sú obsiahnuté v Tabuľke 7.1.

V roku 2010 bol v danom úseku prevedený inžinierskogeologický prieskum kvôli deformáciám zemného telesa a ich poškodeniu eróznymi procesmi. Problémy v oblasti nastali po výdatných dažďoch v lete toho istého roku a sprievodnou povodňou na rieke Kamenice [28]. K ďalším pohybom došlo v roku 2017, jednalo sa o svahový pohyb blízko ulice Havlíčkova v obci Česká Kamenice (pozri Obrázok 7.1). Problematický je úsek v staničení km 25,908 – 25,925, k zosunu došlo na ľavej strane násypu (v smere staničenia) vysokého asi 6 metrov.

V rámci online aplikácie Geohazardy – Svahové nestability na www.geology.cz Českej geologickej služby bolo overené, že v okolí dotknutého územia sa nenachádzajú žiadne zosuvné oblasti, no aj napriek tomu dochádza na zvolenom úseku k pohybu svahu.

Tabuľka 7.1: Identifikačné údaje stavby a trate.

Názov stavby	Sanácia telesa železničného spodku na trati Děčín – Jedlová v km 25,880 – 25,980
Kraj	Ústecký
Katastrálne územie	Horní Kamenice
Obec	Česká Kamenice
Traťový úsek	0861
Definičný úsek	12
Kategória dráhy podľa zák. č. 266/1994 Sb.	regionálna
Kategória dráhy podľa TSI INF	P6/F4
Súčasť siete TEN-T	nie
Traťová trieda zaťaženia	C3
Maximálna traťová rýchlosť	80 km/h
Trakčná sústava	žiadna
Počet traťových koľají	jednokoľajná trať



Obrázok 7.1: Riešená lokalita v obci Česká Kamenice [29].

7.2 Geomorfologické a geologické pomery

Z hľadiska regionálneho členenia reliéfu Českej republiky je možné zaradiť záujmovú oblasť k okrsku Benešovské stredohoří, ktoré podľa ďalšieho členenia patrí do [30]:

Sústava:	Krušnohorská soustava
Podsústava:	Podkrušnohorská oblasť
Celok:	České středohoří
Podcelok:	Vemeřické středohoří

Zvolený úsek sa nachádza v údolí rieky Kamenice. Z pohľadu regionálne geologického členenia českého masívu železničná trať prechádza lužickou oblasťou Českej kriedovej tabule, ktorá je tvorená kvádrovými kremennými pieskovecami s podriadenými vložkami vápnených ílovcov obdobia koniak – santon. Okrem pieskovcov sa v danej oblasti z predkvartérnych hornín nachádzajú aj slieňovce vrchnokriedového obdobia. Kriedová tabuľa je miestami prepletená neogénnymi vulkanickými telesami bazaltoidného, trachytového a znelcového zloženia. V údolných partiách sú kvartérne sedimenty tvorené nivnými naplaveninami riečky Kamenice a na úbočiach hlinito-kamenitými a balvanitými sutinami. V údolnej terase sú nivné sedimenty zastúpené vo vrchnej časti povodňovým horizontom ílovitých pieskov a piesčitých ílov a konečne v spodnej časti bazálnymi štrkami.

Hladina podzemnej vody bola v záujmovom území zastihnutá v puklinách silno zvetraných slieňovcov [28].

Samotné teleso násypu je tvorené prevažne piesčitými ílmi triedy F4 CS tuhej konzistencie. Podložie násypu tvoria plastické íly triedy F8 CH tuhej až pevnej konzistencie s prímiesou štrkov a kameňov. Pod kvartérnym pokryvom sa nachádzajú zvetrané slieňovce, ktoré sa podľa odhadov správajú ako íly s vysokou plasticitou triedy F8 CH tvrdej konzistencie [28].

7.3 Popis vzniknutých problémov

Prvý známy inžinierskogeologický prieskum bol prevedený v roku 2010 a podľa neho bola zachytená poloha oslabenej vrstvy vo vrchných častiach násypového telesa. Problémom bolo pôsobenie atmosférických vplyvov, ktoré prevlhčovali materiál násypu. Dochádzalo k stláčaniu vlhkých zemín a svahovým pohybom smerom k obytnej časti (v údolí) [28].

V rámci topenia snehovej pokrývky na jar 2017 došlo k vzniku zosuvu. Po prevedení dokumentácie bolo zistené dlhodobé sýtenie materiálov násypového telesa vodou. Materiál tvoriaci násypové teleso je prevažne zložený z plastických ílov, ktoré pôsobením vody môžu degradovať. K vlhnutiu zemín dochádza pravdepodobne skrz štrkové piliere, ktoré sa neukázali ako vhodné sanačné opatrenie. Sýteniu nešťastne napomáha aj nefunkčné odvodnenie, pretože voda bola odvádzaná pomocou žľabov do nefunkčného priepustu v km 25,897. Pôsobenie povrchovej aj podzemnej vody zvyšuje vlhkosť v zeminách a zároveň znižuje jej deformačné charakteristiky. V problematickom úseku dochádza k deformáciám GPK, ktoré (podľa meraní) vznikajú ako kombinácia stlačovania prevlhčených zemín a pohybov v podloží násypu. Aj keď najnovší prieskum lokality neoveril polohu šmykovej plochy, nie je možné vylúčiť, že nenastanú ďalšie svahové pohyby väčších pomerov [30]. Obrázky 7.2, 7.3 a 7.4 dokumentujú súčasný stav v okolí železničnej trate po zosuve. Pre názornosť je obrázková dokumentácia prevedená z rôznych uhlov. Obrázok 7.5 približuje poškodenie vzniknuté svahovými pohybmi. Mieru poškodenia dostatočne naznačuje pozostatok pôvodného kamenného obloženia svahu, ktoré bolo prevedené po sanácií štrkovými piliermi, kedy prebehla sanácia úseku spojená s výmenou železničného zvršku. Celkovým problémom územia je pravdepodobne voda, ktorá zmáča aj rozsiahle výbehy poľnohospodárskej zveri po pravej strane trate (v smere staničenia), ktoré je vidieť na Obrázku 7.6.

V rámci sanácie je nutné zachytiť podzemnú vodu zo svahu nad násypom. Prvá vrstva násypu by mala byť z kameniva, aby umožnila konsolidáciu podložia, teda zabezpečila odtok podzemnej vody mimo teleso násypu. Najvhodnejším spôsobom sanácie, podľa inžinierskogeologického prieskumu, sa javí kompletné odťazenie násypového telesa a jeho opätovná výstavba. Samozrejme je nutné zabezpečiť správne odvodnenie záujmovej oblasti [30].



Obrázok 7.2: Pohľad na zosunutú masu štrku v smere proti staničeniu (smer stanica Česká Kamenice).



Obrázok 7.3: Pohľad po zosuve na ľavú stranu trate v smere staničenia (smer stanica Mlýny).



Obrázok 7.4: Pohľad na zosuv z päty svahu.



Obrázok 7.5: Bližší pohľad na zosuv – jednotlivé detaily sú popísané v samotnom obrázku.



Obrázok 7.6: Územie ležiace na pravej strane železničnej trate v smere staničenia (smer stanica Mlýny), ktoré býva nasiaknuté vodou.

7.4 Sanácie úseku

V minulosti (rok 2010) došlo na spomínanom úseku k prvej sanácii. V súčasnosti (po zosuve svahu) si úsek vyžaduje ďalšie sanačné opatrenia. Globálne je tak možné rozdeliť samotný model do 3 štádií:

- pôvodné násypové teleso,
- sanácia úseku vibrovanými štrkovými piliermi,
- návrh novej sanácie úseku.

Zlepšenie telesa násypu vibrovanými štrkovými piliermi bolo prevedené v roku 2010 v km 25,905 – 25,955. Bolo prevedených 93 pilierov s priemernou dĺžkou 5,0 m, priemerom od 600 do 800 mm, v trojuholníkovom rastru so vzájomnou osovou vzdialenosťou 1,5 m. Pilieri boli budované z nesúdržného materiálu – kamenivo frakcie 8/32 – 16/32. V roku 2016 došlo k výstavbe nového priepustu v km 25,908, ktorý však podľa najnovších prieskumov nespĺňa svoju funkciu. Voda bola odklonená na pravú stranu a zvedená do priepustu v km 25,950. Pravá strana je však výrazne podmáčaná aj napriek podpriemernému množstvu zrážok [30].

V rámci nového návrhu bude existujúce násypové teleso kompletne odťažené. Nový násyp bude založený na plastických íloch. Zhutnená základová škára posluží ako miesto odkiaľ budú prevedené železobetónové pilóty dĺžky 8,0 m s priemerom 600 mm, ktoré budú v hlave rozšírené na priemer 900 mm v dĺžke 0,9 m. Pilóty budú prevedené z betónu triedy C30/37 – XC2, XA2 a vystužené oceľou B500B. Rozmiestnenie pilót pod násypom

bude v ortogonálnej sústave s osovou vzdialenosťou 4,0 m resp. 3,0 m. Sanácia pilótami bola zvolená kvôli zachyteniu možných svahových pohybov a obmedzeniu sadnutia nového násypu. Roznášacia konsolidačná vrstva výšky 1,0 m zo štrkodrvy frakcie 0/63 bude umiestnená nad pilótami a budú v nej uložené 3 vrstvy výstužnej dvojosej geomriežky ťahovej pevnosti 40/40 kN/m vo vzájomnej vzdialenosti 300 mm. Konsolidačná vrstva musí byť tiež dostatočne zhutnená. Od podlažia bude konsolidačná vrstva odseparovaná geotextíliou. Svah konsolidačnej vrstvy musí byť chránený kamenným záhozom. Teleso násypu bude z kvalitného materiálu vhodného do násypových telies a bude vrstvené postupne po jednotlivých vrstvách, ktorých hrúbka by mala byť do 300 mm. V rámci výpočtu bol zvolený štrk s prímiesou jemnozrnnej zeminy, G3 G-F. Svahy násypu budú opatrené protieróznou sieťovinou a ozelenené v sklone 1:1,5. Aktívna zóna bude z rovnakého materiálu ako teleso násypu v minimálnej hrúbke 500 mm. Konštrukčná vrstva bude prevedená zo štrkodrvy frakcie 0/32 v hrúbke minimálne 300 mm. Odvodnenie dráhy bude prevedené po oboch stranách trate vo forme spevnených priekop z tvárnic TZZ3. Svahy budú odvodnené pomocou trativodných rebier.

7.5 Metodika a parametre výpočtu

V tejto podkapitole sú opísané teoretické princípy použité pri tvorbe numerického modelu ako aj použité vstupné údaje pre program Plaxis 2D.

7.5.1 Základné charakteristiky 2D modelu

Vytvorený bol rovinný model v programe Plaxis 2D, ktorý využíva na analýzu metódu konečných prvkov (MKP), pričom bol zvolený 15-uzlový konečný prvok. Tabuľka 7.2 popisuje ďalšie špecifikácie vytvoreného modelu.

Tabuľka 7.2: Charakteristiky 2D modelu.

Šírka modelu	Výška modelu	Počet konečných prvkov	Počet uzlov
[m]	[m]	[-]	[-]
55	25	4 159	35 899

7.5.2 Vibrované štrkové piliere

Násyp bol v roku 2010 zlepšený pomocou vibrovaných štrkových pilierov, ktoré boli bližšie špecifikované v časti 7.4.

Do numerického modelu bolo uvažované zlepšenie zeminy metódou podľa Priebeho, ktorá vychádza z konceptu elementárnej bunky. Tento koncept je možné aplikovať, ak sa jedná o skupinu pilierov umiestnenú v pravidelnom rastru (štvorcovom alebo trojuholníkovom). Pričom je možné predpokladať, že ak je tento raster dodržaný na celom úseku, potom je oblasť tvorená elementárnymi bunkami. Okraje týchto buniek medzi sebou nevykazujú žiadne trenie. Predpokladá sa správanie danej bunky ako celku. Keďže

je elementárna bunka vedená ako teleso valcového tvaru, je nutné skutočnú plochu bunky nahradiť kruhovou plochou na základe rastru. Ak sa jedná o trojuholníkový raster, je nutné plochu šesťuholníka prepočítať, a to podľa nasledujúceho vzťahu 7.1:

$$a_c = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^2 \quad (7.1)$$

kde

A_c	plocha kruhového prierezu vibrovaného štrkového piliera
A	plocha šesťuholníka elementárnej bunky
a_c	faktor plochy nahradenia
D	priemer vibrovaného štrkového piliera
s	osová vzdialenosť pilierov v rastru

Pričom plochy A a A_c vstupujú do výpočtu nepriamo. Aká časť plochy je suplovaná plochou piliera udáva faktor plochy nahradenia. Výstupnou hodnotou je faktor zlepšenia, ten dáva do pomeru sadnutie nezlepšeného a zlepšeného materiálu (štrkovými piliermi) [31].

Platia predpoklady interakcie skupiny štrkových pilierov so zlepšenou zeminou:

- platí koncept elementárnej bunky,
- štrkový pilier je ukončený v únosnej, nestlačiteľnej vrstve zeminy,
- materiál samotného štrkového piliera nemení svoj objem (je nestlačiteľný),
- objemová tiaž okolitej zeminy aj piliera je zanedbaná,
- materiál piliera je šmýkaný od počiatkov priťažovania, okolitá zemina reaguje pružne,
- počas inštalácie piliera je okolitá zemina narušená natoľko, že jej odozva počas interakcie odpovedá hydrostatickým podmienkam ($K_0 =$ pokojový zemný tlak = 1),
- sadnutie okolitej zeminy a piliera je zhodné,
- sadnutie oblasti zlepšenej piliermi spôsobí vydúvanie piliera, ktoré je rovnomerné po celej výške prvku, radiálne napätie odpovedá napätiu v zemine,
- pri vyčerpaní únosnosti piliera sa pilier neporuší a platí predchádzajúci bod [31].

Potom je možné stanoviť základný súčiniteľ zlepšenia n_0 rovnicou 7.2 ako:

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \cdot \left[\frac{0,5 + f\left(v_s, \frac{A_c}{A}\right)}{K_{ac} \cdot f\left(v_s, \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (7.2)$$

kde

$$K_{ac} = tg^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (7.3)$$

v_s Poissonovo číslo zeminy

φ_c uhol vnútorného trenia materiálu štrkových pilierov
 n_0 základný parameter zlepšenia

a

$$f\left(v_s, \frac{A_c}{A}\right) = \frac{1 - v_s^2}{1 - v_s - 2v_s^2} \cdot \frac{(1 - 2v_s) \times \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)}{1 - 2v_s + \frac{A_c}{A}} \quad (7.4)$$

Jedná sa o nesaturovanú analýzu s využitím efektívnych parametrov, uvažované je elementárne zlepšenie, čo znamená, že sa jedná o základnú metódu podľa Priebeho založenú na zjednodušených predpokladoch [31]. Vypočítaný parameter zlepšenia n je rovný hodnote 1,833. Tabuľky 7.4, 7.5 a 7.6 postupne opisujú jednotlivé vstupné hodnoty výpočtu, ktoré boli ďalej spracované za pomoci tabuľkového procesora. Materiál štrkových pilierov zachytil inžinierskogeologický prieskum podľa [30], tieto parametre boli zvolené aj pre výpočet. Piliermi bolo uvažované zlepšenie vrstvy ílu, konkrétne typu F8 CH, jeho charakteristiky boli použité v tejto časti výpočtu.

Tabuľka 7.3: Geometria rozmiestnenia štrkových pilierov.

Raster	trojuholníkový		
Osová vzdialenosť rastru	s	[m]	1,5
Napätie v základovej škáre	p	[kPa]	0,1
Parameter rastru	A_c/A	[-]	0,145

Tabuľka 7.4: Parametre štrkových pilierov.

Priemer piliera	D	[m]	0,6
Dĺžka piliera	L	[m]	3,0
Objemová tiaž	γ_c	[kN/m ³]	19,0
Uhol vnútorného trenia	ϕ_c	[°]	42,0
Deformačný modul	$E_{def,c}$	[MPa]	28,0
Poissonovo číslo	ν_c	[-]	0,25

Tabuľka 7.5: Parametre zeminy násypu.

Objemová tiaž	γ_s	[kN/m ³]	20,5
Efektívny uhol vnútorného trenia	$\phi_{s,ef}$	[°]	15,0
Efektívna súdržnosť	$c_{s,ef}$	[kPa]	8,0
Totálna súdržnosť	$c_{s,u}$	[kPa]	40
Deformačný modul	$E_{def,s}$	[MPa]	4,0
Poissonovo číslo	ν_s	[-]	0,4

Nasledujúca Tabuľka 7.6 udáva parametre zlepšenia podložia metódou podľa Priebeho.

Tabuľka 7.6: Parametre zlepšenia podložia metódou podľa Priebeho.

A_c/A	[-]	0,145
K_{ac}	[-]	0,198
$f(v_s, A_c/A)$	[-]	1,486
n_0	[-]	1,833

V tomto prípade dôjde k dosiahnutiu únosnosti až za predpokladu dosiahnutia únosnosti všetkých štrkových pilierov a vytvorí sa šmyková plocha. Počas zaťažovania dochádza k opomenutiu vydúvania štrkových pilierov, ktoré súvisí s roztlačovaním zeminy v okolí [32]. Kvôli zamedzeniu nadhodnotenia pevnosti v šmyku zeminy je nutné upraviť vzťah pre koncentračný faktor do nasledujúcej podoby:

$$m' = \frac{n_i - 1}{n_i} \quad (7.5)$$

Potom náhradný uhol vnútorného trenia náhradného bloku zeminy udáva rovnica 7.6, podľa predpokladu prerozdelenia napätia do okolitej pôdy a štrkových pilierov:

$$\operatorname{tg} \varphi_n = m' \cdot \operatorname{tg} \varphi_c + (1 - m') \cdot \operatorname{tg} \varphi_s \quad (7.6)$$

Súdržnosť náhradného bloku zeminy stanovuje rovnica 7.7, pričom popisuje vplyv poklesu základnej hodnoty o účinok inštalácie pilierov:

$$c_n = (1 - m') \cdot c_s \quad (7.7)$$

kde

φ_n	uhol vnútorného trenia náhradného bloku zeminy
φ_c	uhol vnútorného trenia materiálu piliera
φ_s	uhol vnútorného trenia okolitej zeminy
c_n	súdržnosť náhradného bloku zeminy
c_s	súdržnosť okolitej zeminy

Faktor plochy nahradenia umožňuje stanoviť ekvivalentnú objemovú tiaž rovnicou 7.8, zatiaľ čo ekvivalentné deformačné parametre náhradného bloku zeminy je možné vyčísliť ako vážený priemer hodnôt podľa [33] rovnicami 7.9 a 7.10:

$$\gamma_n = \gamma_s \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) + \gamma_c \cdot \frac{A_c}{A} \quad (7.8)$$

$$E_n = \frac{E_c \cdot A_c + E_s \cdot (A - A_c)}{A} \quad (7.9)$$

$$v_n = v_s \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) + v_c \cdot \frac{A_c}{A} \quad (7.10)$$

Konečné hodnoty náhradného bloku zeminy použité do numerického modelu zobrazuje Tabuľka 7.7:

Tabuľka 7.7: Výsledné hodnoty náhradného bloku zeminy.

Objemová tiaž	γ_n	[kN/m ³]	20,3
Uhol vnútorného trenia	ϕ_n	[°]	29,0
Súdržnosť	c_n	[kPa]	4,4
Deformačný modul	$E_{def,n}$	[MPa]	7,5
Poissonovo číslo	v_n	[-]	0,38

7.5.3 Parametre materiálov

Zeminy boli v rámci inžinierskogeologického prieskumu roztriedené do geotechnických typov. Do počiatočných fáz výpočtu boli prevzaté hodnoty z [28], ďalšie potrebné parametre boli doplnené z [30]. Niektoré chýbajúce veličiny boli dopočítané na základe výsledkov IG prieskumu podľa [30].

Pre modelovanie bol použitý Mohr-Coulombov výpočtový model (MC) a Hardening Soil model (HS). MC model bol použitý pre všetky materiály v počiatočnej fáze výpočtu (pozri Tabuľka 7.8). HS model bol priradený len materiálom s označením GT4, GT5 a GT6 (pozri Tabuľka 7.9), pre ktoré bolo možné určiť E_{oed} , E_{50} a E_{ur} . Edometrický modul bol kalibrovaný v tabuľkovom procesore na základe údajov edometrickej skúšky podľa [30]. Hodnota E_{ur} bola uvažovaná podľa [34] ako $E_{ur} \approx 3E_{50}$. Materiál nového násypu a aktívnej zóny udáva Tabuľka 7.10.

Tabuľka 7.8: Geotechnické parametre zemín s výpočtovým modelom MC.

Geotechnický typ		GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7
Trieda podľa ČSN (736133)		G5 GCY	F4 CS	F8 CH	F8 CH	F6 CL	R6/F6 CL	R5
γ	[kN/m ³]	19,5	18,5	20,5	20,5	20,5	20,5	21,5
γ_{sat}	[kN/m ³]	19,5	18,5	20,5	20,5	20,5	20,5	21,5
E_{def}	[MPa]	30	10	1	4	8	15	70
v	[-]	0,3	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4	0,25
ϕ_{ef}	[°]	28	25	13	15	17	17	23
c_{ef}	[kPa]	2	18	2	8	14	22	40

Tabuľka 7.9: Geotechnické parametre zemín s výpočtovým modelom HS.

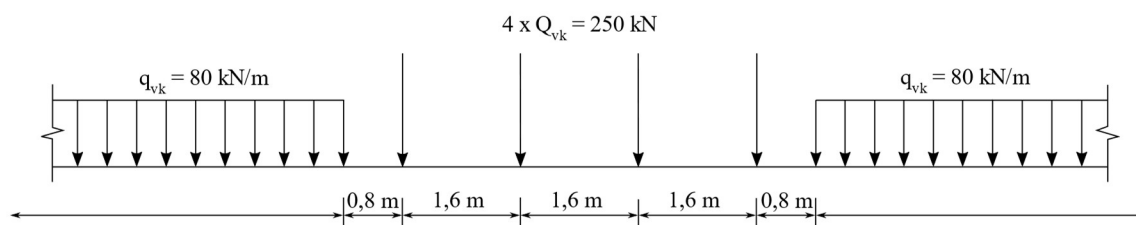
Geotechnický typ		GT4	GT5	GT6
Trieda podľa ČSN (736133)		F8 CH	F6 CL	R6/F6 CL
E_{oed}	[MPa]	3,6	10	10
E_{50}	[MPa]	3,6	10	10
E_{ur}	[MPa]	10,8	30	30
m	[-]	0,48	0,26	0,26

Tabuľka 7.10: Geotechnické parametre materiálov nového násypového telesa.

Typ		Aktívna zóna	Nový násyp
Trieda podľa ČSN (736133)		G3	G3
γ	[kN/m ³]	19	19
γ_{sat}	[kN/m ³]	19	19
E_{def}	[MPa]	95	95
ν	[-]	0,25	0,25
ϕ_{ef}	[°]	38	38
c_{ef}	[kPa]	5	5

7.5.4 Zaťaženie od koľajovej dopravy

Zaťaženie od železničnej dopravy je uvažované ako premenné a v tomto prípade bolo vypočítané podľa modelu zaťaženia 71 (LM 71), ktorý reprezentuje statický účinok zvislého zaťaženia hlavných železničných tratí od bežnej železničnej dopravy. Konkrétne usporiadanie je uvedené na Obrázku 7.7 [35].



Obrázok 7.7: Model zaťaženia 71 [35].

Zaťaženie od jednotlivých bremien bolo prepočítané na líniové zaťaženie $q_{vk,2}$ pôsobiace na dĺžke 6,4 m rovnicou 7.11:

$$q_{vk,2} = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_{vk,i}}{l_i} = \frac{4 \cdot 250}{4 \cdot 1,6} = 156,25 \text{ kN/m} \quad (7.11)$$

Líniové zaťaženie rozložené rovnomerne na dĺžku jedného betónového podvalu dĺžky 2,6 m bolo uvažované podľa rovnice 7.12:

$$q_{vk} = \frac{q_{vk,2}}{L_{podval}} = \frac{156,25}{2,6} = 60,096 \text{ kN/m/m} \quad (7.12)$$

Zaťaženie q_{vk} je ekvivalentné zvislé zaťaženie nutné pre stanovenie globálnych účinkov železničnej dopravy na teleso násypu, ktoré pôsobí v úrovni spodného líca betónového podvalu. Pre výpočtový model bola použitá hodnota s presnosťou na jedno desatinné miesto (60,1 kN/m/m).

7.5.5 Betónový podval

Bol uvažovaný betónový podval, ktorý by mal podľa [36] spĺňať minimálnu triedu betónu C45/55 ($E_{pod} = 36$ GPa). Parametre betónového podvalu a koľajového lôžka udáva Tabuľka 7.11.

Ekvivalentný modul pružnosti podvalu je nutné upraviť o vzdialenosť medzi jednotlivými podvalmi v pozdĺžnom smere nasledovne:

$$r_{pod} = \frac{A_{pod}}{A_T} = \frac{A_{pod}}{A_{pod} + A_{zem}} = \frac{0,24}{0,65} = 0,37 \quad (7.13)$$

$$E = E_{pod} \cdot r_{pod} = 36 \cdot 10^3 \cdot 0,37 = 13,32 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad (7.14)$$

Tabuľka 7.11: Vstupné parametre pre betónový podval a materiál koľajového lôžka.

Betónový podval			Koľajové lôžko		
γ	[kN/m ³]	24	γ	[kN/m ³]	20
	-		γ_{sat}	[kN/m ³]	22
	-		c'	[kPa]	1
	-		φ'	[°]	40
E	[MPa]	13 320	E'	[kPa]	135
ν	[-]	0,15	ν'	[-]	0,25

7.5.6 Konsolidačná vrstva vystužená geosyntetikom

V konsolidačnej vrstve boli uložené geomriežky v troch vrstvách, ťahovej pevnosti 40 kN/m. Bolo nutné spočítať osovú tuhosť geomriežky na 1 bm podľa [37], predpokladaná hrúbka geomriežky je 5 mm. Osová tuhosť EA zadávaná do programu Plaxis 2D bola $10,0 \cdot 10^3$ kN/m.

Kontakt medzi materiálom geosyntetika a materiálom konsolidačnej vrstvy bol modelovaný pomocou kontaktného prvku s hodnotou parametra $R_{inter} = 0,9$ podľa [38]. Materiál konsolidačnej vrstvy bol zadaný podľa Tabuľky 7.12:

Tabuľka 7.12: Vstupné hodnoty materiálu konsolidačnej vrstvy.

Konsolidačná vrstva		
γ	[kN/m ³]	21
γ_{sat}	[kN/m ³]	21
c'	[kPa]	2
ϕ'	[°]	41,50
E'	[MPa]	360
ν'	[-]	0,20
R_{inter}	[-]	0,9

7.5.7 Založenie na pilótach

Pilóta bude prevedená z betónu pevnostnej triedy C30/37 a vystužená oceľovými profilmi z ocele B500B, ďalšie parametre použité pre model udáva Tabuľka 7.13.

V programe Plaxis 2D bol tento prvok modelovaný ako „embedded beam row“, pri ktorom nie je potrebné na styku materiálu pilóty so zeminou modelovať kontaktný prvok. Návrh pilótového založenia bol prevedený pomocou programu GEO5 (2022), z ktorého bol prevzatý priebeh plášťového trenia.

Tabuľka 7.13: Parametre materiálu pilóty.

Pilóta		
E	[MPa]	33
γ	[kN/m ³]	23
D	[m]	0,6
L_{spacing}	[m]	4,0

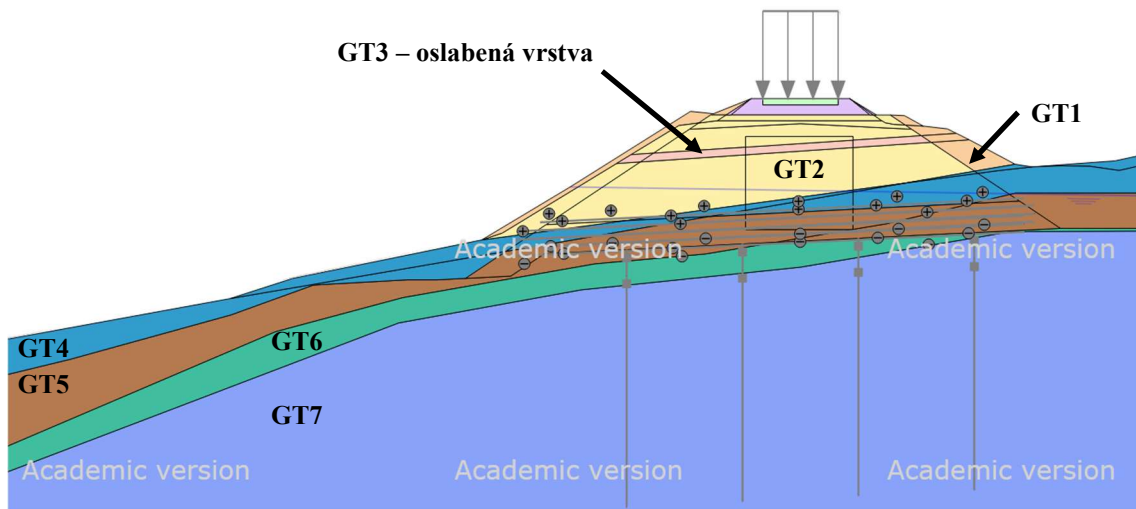
7.6 Fázy výpočtu

V tejto časti sú zobrazené všetky prevedené fázy výpočtu (pozri Tabuľka 7.14). Fázy predstavujú chronologický postup zmien pomerov v danom mieste úseku (konkrétne v km 25,915). Popis udáva, ktoré prvky a vrstvy vstupujú do jednotlivých fáz výpočtu. Typ výpočtu udáva typ analýzy zvolenej v danej fáze výpočtu.

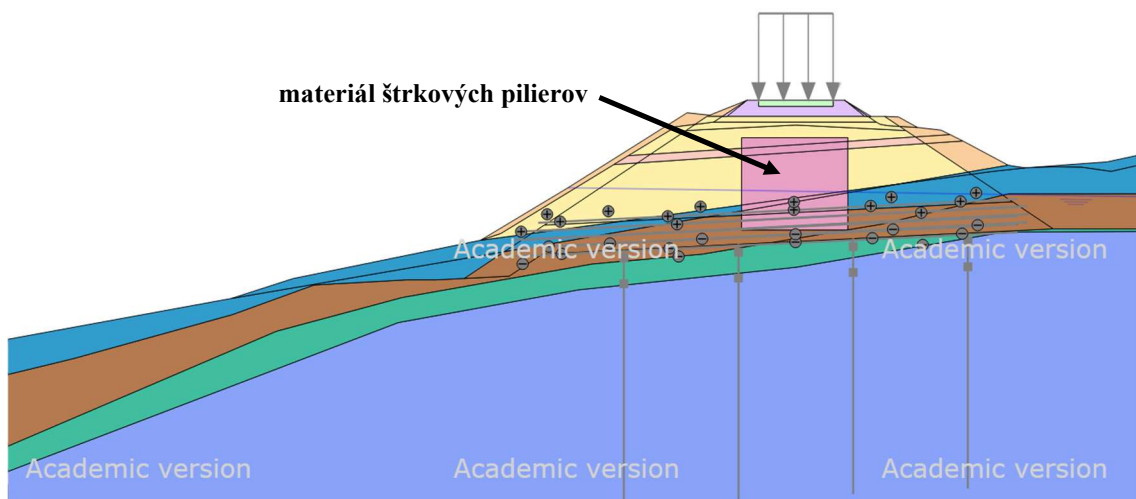
Obrázky 7.8, 7.9 a 7.10 približujú rozloženie vrstiev a jednotlivých prvkov pre teleso násypu v pôvodnom stave, pre násyp zlepšený štrkovými piliermi aj pre novo navrhnuté sanačné opatrenie.

Tabuľka 7.14: Chronologický prehľad fáz výpočtového modelu.

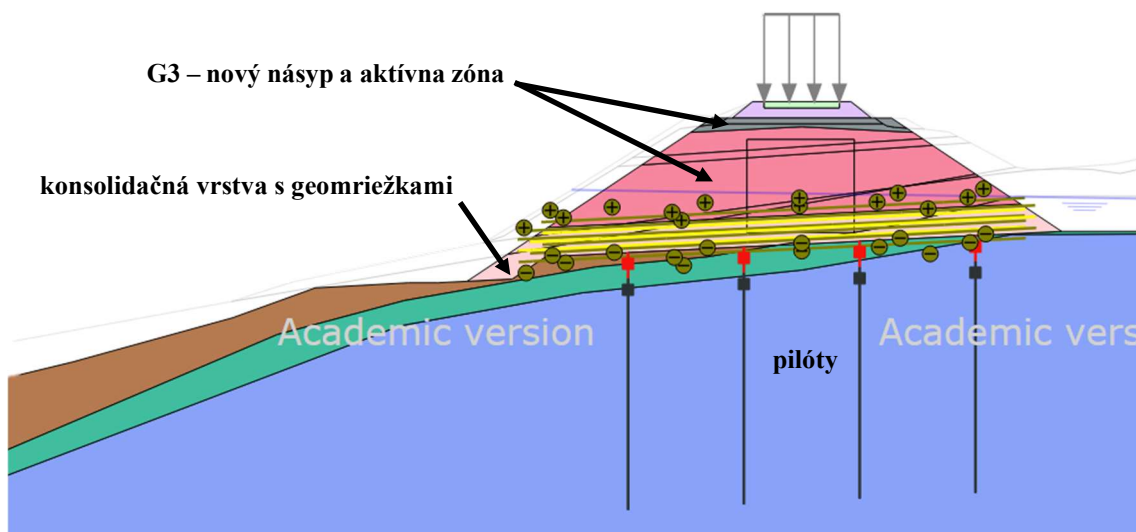
Fáza	Názov	Popis	Typ
0	Initial phase	výpočet pôvodnej napätosti pred výstavbou násypu	Initial gravity loading
1	Nultá fáza	výpočet napätostne-deformačného stavu pred výstavbou násypu	Plastic
2	Pôvodný násyp	výpočet napätostne-deformačného stavu po výstavbe násypu	Plastic
3	Pôvodný násyp ST	výpočet stability pôvodného nezaťaženého násypu	Safety
4	Pôvodný násyp + doprava	výpočet napätostne-deformačného stavu pôvodného násypu zaťaženého koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Plastic
5	Pôvodný násyp + doprava ST	výpočet stability pôvodného násypu zaťaženého koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Safety
6	Štrkové piliere	výpočet napätostne-deformačného stavu po prevedení zlepšenia štrkovými piliermi	Plastic
7	Štrkové piliere ST	výpočet stability po prevedení zlepšenia štrkovými piliermi	Safety
8	Štrkové piliere + doprava	výpočet napätostne-deformačného stavu po prevedení zlepšenia štrkovými piliermi v stave zaťaženom koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Plastic
9	Štrkové piliere + doprava ST	výpočet stability po prevedení zlepšenia štrkovými piliermi v stave zaťaženom koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Safety
10	Kompletné odťaženie	výpočet napätostne-deformačného stavu po odťažení násypu	Plastic
11	Nový stav	výpočet napätostne-deformačného stavu po výstavbe nového násypu	Plastic
12	Nový stav ST	výpočet stability po výstavbe nového násypu	Safety
13	Nový stav + doprava	výpočet napätostne-deformačného stavu po výstavbe nového násypu zaťaženého koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Plastic
14	Nový stav + doprava ST	výpočet stability po výstavbe nového násypu zaťaženého koľajovou dopravou hodnoty 60,1 kN/m	Safety



Obrázok 7.8: Rozloženie vrstiev pôvodného násypu.



Obrázok 7.9: Rozloženie vrstiev násypu zlepšeného štrkovými piliermi.



Obrázok 7.10: Rozloženie vrstiev novo navrhnutého násypu a jednotlivých sanačných prvkov.

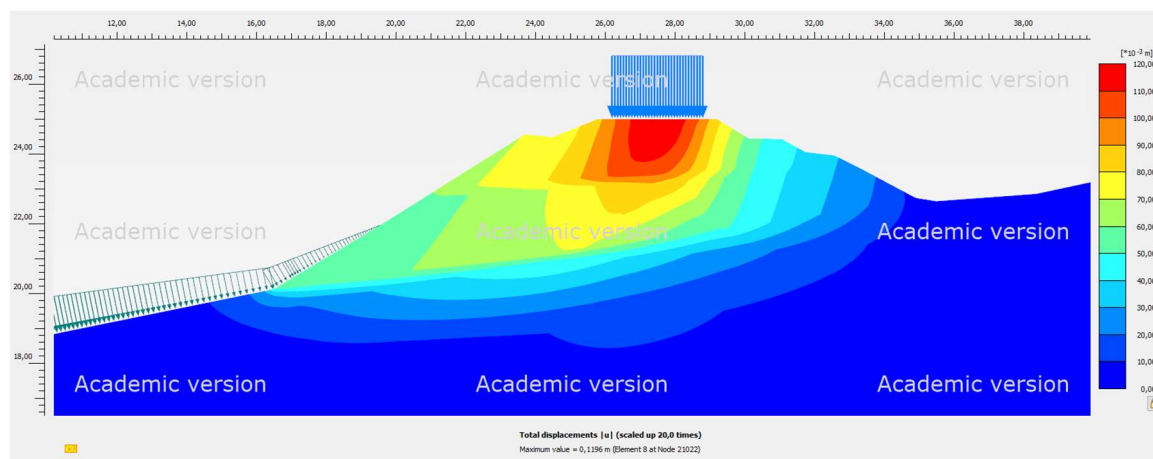
7.7 Posúdenie stability

Tabuľka 7.15 udáva prehľad vypočítaných stupňov stability (FS), ktoré boli odčítané po výpočte z programu Plaxis 2D. V prípade fázy 5 a 9 je vidieť, že stupne stability svahu sú nedostačujúce (indikujú porušenie).

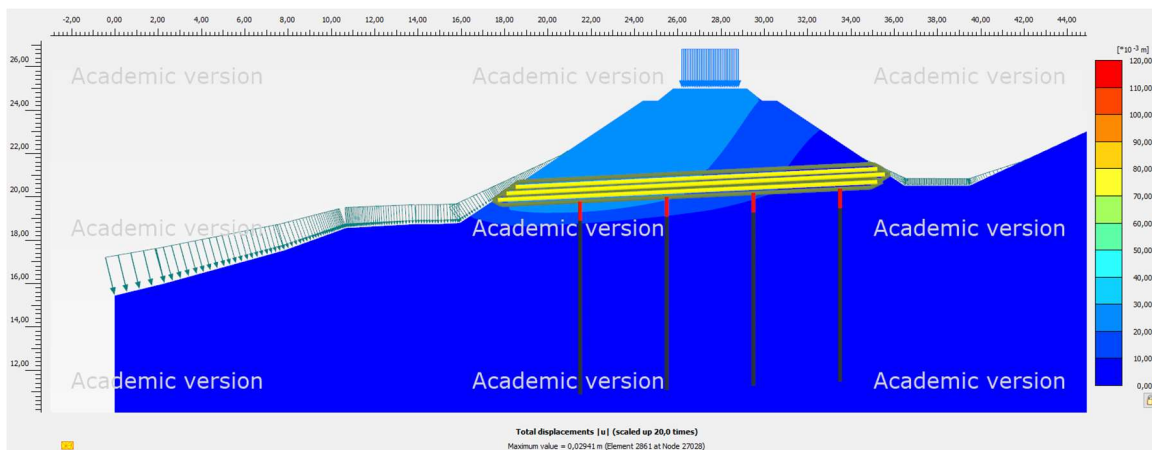
Tabuľka 7.15: Hodnoty stupňa stability (FS) vypočítané programom Plaxis 2D.

Fáza	Názov fázy	Stupeň stability
3	Pôvodný násyp ST	1,758
5	Pôvodný násyp + doprava ST	1,139
7	Štrkové piliere ST	1,611
9	Štrkové piliere + doprava ST	1,148
12	Nový stav ST	1,756
14	Nový stav + doprava ST	1,319

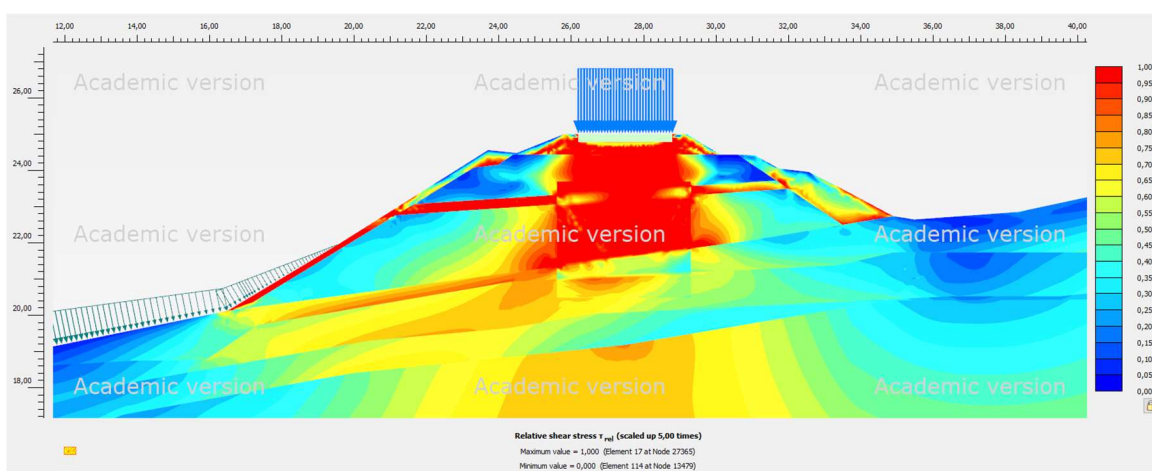
Nasledujúci Obrázok 7.11 zobrazuje celkové posuny v prípade násypu zlepšeného štrkovými piliermi, Obrázok 7.12 poukazuje na celkové posuny v prípade novej sanácie. Celková deformácia telesa násypu po prevedení sanácie by podľa výpočtu nemala prekročiť hodnotu 29,41 mm. Ďalej sú zobrazené izoplochy vyčerpaných šmykových pevností pre fázy 8 a 13 (pozri Obrázky 7.13 a 7.14) a poloha kritickej šmykovej plochy pre fázu 9 (pozri Obrázok 7.15).



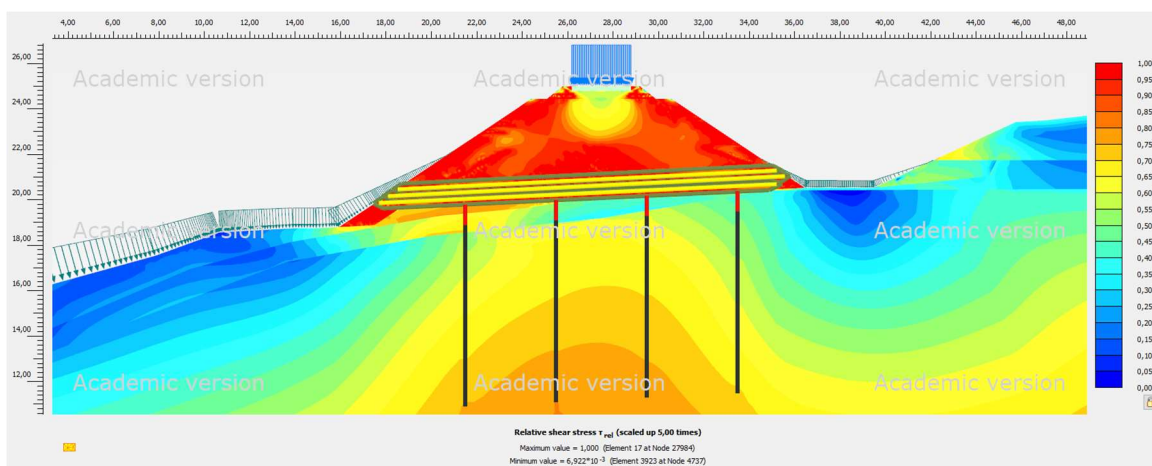
Obrázok 7.11: Celkové posuny $|u|$ pre fázu 8 (násyp zlepšený štrkovými piliermi zaťažený dopravou).



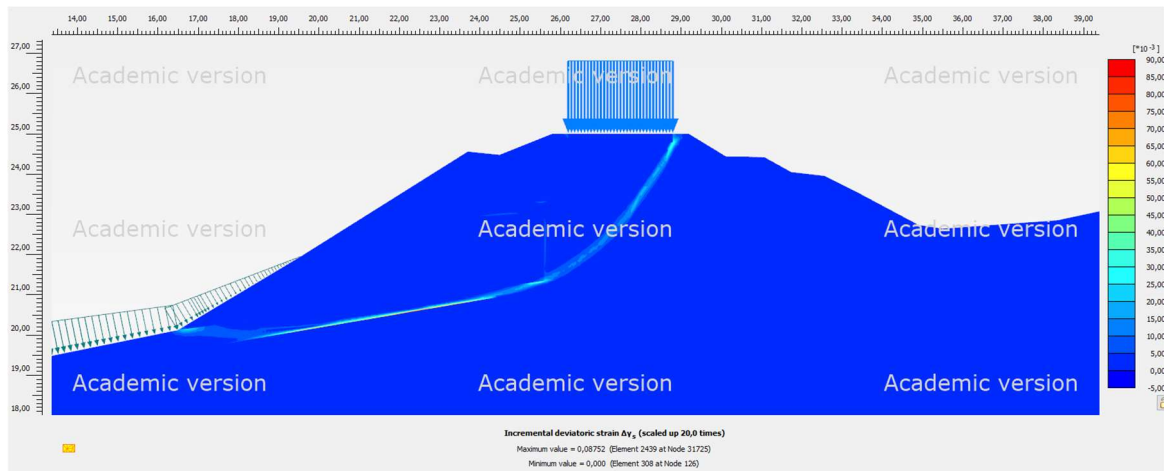
Obrázok 7.12: Celkové posuny $|u|$ pre fázu 13 (nový stav po zaťažení dopravou).



Obrázok 7.13: Izoplchy vyčerpania šmykových pevností (relatívne hodnoty) τ_{rel} pre fázu 8 (násyp zlepšený štrkovými piliermi zaťažený dopravou).



Obrázok 7.14: Izoplchy vyčerpania šmykových pevností (relatívne hodnoty) τ_{rel} pre fázu 13 (nový stav po zaťažení dopravou).



Obrázok 7.15: Poloha kritickej šmykovej plochy pre fázu 9 (stabilita násypu zlepšeného štrkovými piliérmi po zaťažení dopravou), identifikovaná zobrazením deviatorického pretvorenia $\Delta\gamma_s$.

8 ZÁVER

Diplomová práca poukazuje na skutočnosť, že vývoj výstavby železničného spodku prebiehal súbežne s vývinom výstavby železničných tratí. Pri projektovaní nie je na mieste opomíňať historické pomery lokality a je nutné vnímať riešenú oblasť ako spleť rôznych faktorov, ktoré môžu ovplyvňovať nepriaznivé správanie konštrukcií.

Vzhľadom na prevedenú rešerš v oblasti vývoja šírky železničnej pláne je možné dedukovať, že šírkové pomery boli naprieč obdobiami rôzne. Od počiatkov výstavby železničných tratí na tomto území sa rozmery priebežne menili. Etapy konskej železnice si pamätajú šírku železničnej pláne okolo 3,0 metra. Tento údaj sa podstatne líši od minimálnej hodnoty 6,0 m, ktorý je platný v súčasnosti pri jednokoľajných tratiach normálneho rozchodu v priamej trati s vodorovnou pláňou telesa železničného spodku.

Prehľad konkrétnych lokalít v Českej republike poukázal, že poruchy násypových telies železničných tratí sú aktuálnou problematikou. Procesy, ktoré prebiehajú v zeminách môžu byť podmienené rôznymi vplyvmi a často smerujú k vývinu kritických pomerov lokality. Nevhodné alebo nekvalitne prevedené sanačné procesy môžu byť značným prírastkom už tak nepriaznivej situácie daného zemného telesa. Inžiniersko-geologický prieskum by nemal byť opomínaný a mali by byť prevedené všetky nutné laboratórne skúšky.

V rámci navrhutej sanácie v obci Česká Kamenice je viditeľný pokles stupňa bezpečnosti (FS) pri zaťažení existujúceho násypového telesa železničnou dopravou. V prípade zaťaženia od dopravy sa jedná len o hodnotu premenného zaťaženia, ktorý nepôsobí na konštrukciu po celú dobu jej životnosti, na túto skutočnosť je potrebné upriamiť pozornosť. Výpočet preukázal, že existujúci stav je blízko hodnoty porušenia. Navrhnutá sanácia zaistí nárast stupňa bezpečnosti a zachytenie potrebných deformácií.

9 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] SŽ S4: *Železniční spodek. 1. vyd. Praha: Správa Železnic, státní organizace - Odbor traťového hospodářství, 2020.*
- [2] ŠEVČÍK, Klement. *Železniční spodek a zemní práce. 1. vyd. Praha: Dopravní nakladatelství, 1958.*
- [3] KREJČÍŘÍK, Mojmír. *Po stopách našich železnic. První. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1991. ISBN 80-703-0061-2.*
- [4] Normální plány státních drah. 1. vyd. Vídeň: Císařsko-královské státní dráhy, 1885.
- [5] Normální plány. 1. vyd. Praha: Ředitelství státních drah v Ústí n. L., 1929.
- [6] KUBÁČEK, Jiří. *Dejiny železnic na území Slovenska. 1. vyd. Bratislava: Železnice Slovenskej republiky, 1999. ISBN 9788096814046.*
- [7] SŽDC S4: *Železniční spodek. 1. vyd. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2008.*
- [8] Hájek - Dalovice. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-12-28]. *Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=12.8884189&y=50.2644667&z=14>*
- [9] DŮROVE, Jan. *Sanace nestabilních úseků Hájek - Dalovice. In: 21. konference "Železniční dopravní cesta 2022". Praha: Správa železnic, státní organizace, 2022, s. 94-105.*
- [10] ŠTÁBL, Stanislav a Jaroslav ADAMEC. *Stabilizace nestabilních násypů zemního tělesa v úseku Hájek - Dalovice. In: Silnice-železnice [online]. Ostrava - Zábřeh: Silnice-železnice, 2022 [cit. 2022-09-24]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/zeleznicni-infrastruktura/stabilizace-destabilnich-naspu-zemniho-telesa-v-useku-hajek-dalovice-657>*
- [11] *Železniční trať Hájek-Dalovice. In: STRIX CHOMUTOV [online]. Chomutov: STRIX CHOMUTOV, 2018 [cit. 2022-09-24]. Dostupné z: <https://www.strixchomutov.cz/stavebnictvi/dopravni-stavby/6-sanace-zemniho-telesa-v-km-181-7-181-8-useku-hajek-dalovice>*
- [12] *Trať u Dalovic je tři roky od sesuvu opravená, v sobotu se vrátí vlaky. In: IDNES.cz [online]. Praha: ČTK, 2021 [cit. 2022-09-23]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/karlovy-vary/zpravy/zeleznice-trat-dalovice-hajek-sesuv-vyluka-sanace-oprava.A210409_105223_vary-zpravy_ba*
- [13] *Dubnový sesuv trati u Dalovic způsobila sto let stará chyba, zjistili experti. In: Aktuálně.cz [online]. ČTK, 2018 [cit. 2022-09-24]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/regiony/karlovarsky/lednovy-sesuv-trati-u-dalovic-zpusobila-sto-let-stara-chyba/r~eb41cf389a7311e89f96ac1f6b220ee8/>*

-
- [14] KAČORA, Alexandr a Martin JECH. Kněžice - Geotechnický průzkum pro stavbu: "Rekonstrukce mostu v km 190.152 trati Plzeň - Žatec". Praha, 2013.
- [15] Kněžice. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=13.4287081&y=50.2825848&z=14>
- [16] NOVÁK, Milan. Kombinace vyztužení a vylehčení zemní konstrukce - lokalita Kněžice. Praha, 2003.
- [17] Litochovice nad Labem. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=14.0286715&y=50.5580901&z=14>
- [18] VESELÝ, Jiří. Gabionová zeď v km 501,400 - 501,650 železniční trati Praha-Děčín: Závěrečná zpráva. Teplice, 2014.
- [19] Litochovice nad Labem. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/letecka?pano=1&pid=79177963&newest=1&yaw=5.617&fov=1.257&pitch=0.060&x=14.0374521&y=50.5528765&z=19>
- [20] KRÁL, Jan. Sanace násypu "Pastuchovice" v úseku trati Žihle - Pastuchovice: Provedení sondování střední dynamickou penetrací. Praha, 2010.
- [21] DVOŘÁČEK, Tomáš. Násep "Pastuchovice" na trati Plzeň - Žatec: Průvodní zpráva. Hradec Králové, 2018.
- [22] Pastuchovice. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=13.3861032&y=50.0698545&z=13>
- [23] DVOŘÁČEK, Tomáš. Násep "Pastuchovice" na trati Plzeň - Žatec: Souhrnná technická zpráva. Hradec Králové, 2018.
- [24] KAČORA, Alexandr. Železniční násep na trati Plzeň - Žatec v Patuchovicích: Doplnkový geotechnický průzkum. Praha, 2017.
- [25] BŘEŠŤOVSKÝ, Petr. Systém řešení nestabilních úseků železničního spodku. In: 21. konference "Železniční dopravní cesta 2022". Praha: Správa železnic, státní organizace, 2022, s. 88-93.
- [26] Železniční spodek: Vzorový list železničního spodku. 1. vyd. Praha: České dráhy, 2001.
- [27] Opravený násep na trati Vimperk-Lipka. In: Chládek & Tintěra, a.s. [online]. Litoměřice: Chládek & Tintěra, a.s., 2019 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.cht.cz/aktuality/opraveny-nasep-na-trati-vimperk-lipka/>
- [28] GAJDOŠ, Pavel. Oprava železničního svršku a spodku 081 Česká Kamenice - Mlýny: Inženýrsko-geologický průzkum. Ústí nad Labem, 2010.
-

-
- [29] Česká Kamenice. In: Mapy.cz [online]. Praha: Seznam.cz, 2022 [cit. 2022-09-21]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=14.4236763&y=50.7986330&z=17&base=ophoto>
- [30] TOMÁŠEK, Jiří. Sanace tělesa žel. spodku na trati Děčín Jedlová v km 25,880 - 25,980: Podrobný inženýrskogeologický průzkum oblasti svahové deformace. Praha: 4G consite s.r.o., 2021.
- [31] ŠTEFAŇÁK, Jan, Antonín PASEKA a Lumír MIČA. Posouzení návrhu sanace v km 24,706 670 pro akci: "Sanace železničního spodku Křenovice h.n. - Holubice v km 24,566 - 25,161": *Výzkumná zpráva*. První. Brno, 2020.
- [32] MIČA, Lumír. Zemní konstrukce: se zaměřením na dopravní stavby. Ver. 2017. Brno: Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2004.
- [33] SVOBODA, Petr. Hloubkové zlepšování zemin v české praxi. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-663-8.
- [34] PLAXIS: CONNECT Edition V21.01 [online]. Ver. 4/2021. Netherlands: Bentley Systems, 2021 [cit. 2023-01-03]. ISBN 978-90-76016-27-6. Dostupné z: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>
- [35] ČSN EN 1991-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: zatížení mostů dopravou. Ed. 2. Praha: STNI, 2018.
- [36] Betonové pražce. In: ŽPSV s.r.o. [online]. Uherský Ostroh: ŽPSV, 2022 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://www.zpsv.cz/wp-content/uploads/2020/12/Betonove-prazce-ZPSV.pdf>
- [37] MIČA, Lumír a Ondřej HOLÝ. Stanovení osově tuhosti geosyntetika pro numerické modelování - část 2. Brno: Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.
- [38] KOERNER, Robert M. Designing with Geosynthetics. 5. edition. Drexel University: Pearson Prentice Hall, 1933. ISBN 0-13-145415-3.