



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

NÁVRH ZALOŽENÍ VYSOKÉHO NÁSYPU NA VYSOKORYCHLOSTNÍ TRATI

THE DESIGN OF THE HIGH EMBANKMENT FOR HIGH-SPEED RAILWAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Noémi Nagyová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Koudela

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geotechniky
Studentka: **Bc. Noémi Nagyová**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Koudela**
Akademický rok: 2025/26
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:

Návrh založení vysokého násypu na vysokorychlostní trati

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude skládat z těchto bodů:

- popis problematiky dané lokality
- popis geologických poměrů
- problematika vysokých násypů
- výpočetní model dané konstrukce, výsledky, analýza výsledků
- studium možných opatření pro zmírnění vlivu výstavby vysokého násypu
- zahrnutí opatření do výpočetního modelu a analýza výsledků
- zpracování projektu monitoringu v návaznosti na výpočetní model
- závěr

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je analýza vlivu výstavby vysokého násypu vysokorychlostní železniční trati na těleso násypu dálnice v místě jejich křížení. Tato analýza se bude skládat ze studie navrhovaného řešení a stanovení vlivu násypu VRT. Dále návrhu a analýzy opatření pro zmírnění vlivu plánované výstavby vysokého tělesa násypu na stávající dálniční těleso. A v poslední řadě návrhu monitoringu tohoto násypu.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Atkinson, J. (2007). The Mechanics of Soils and Foundations (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315273549>

Budhu, M. (2011) Soil Mechanics and Foundation. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Moseley, M.P., & Kirsch, K. (Eds.). (2004). Ground Improvement (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9780203489611>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 25. 3. 2025

L. S.

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

Ing. Pavel Koudela
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce byla komplexní analýza geotechnických interakcí vznikajících při výstavbě vysokého násypu vysokorychlostní železniční trati (VRT) v bezprostřední blízkosti stávajícího dálničního tělesa. Hlavním cílem práce bylo stanovení vlivů dodatečného zatížení na podloží a dálniční násyp, návrh a posouzení zmírňujících opatření a koncepce monitorovacího systému.

V teoretické části byla popsána specifika dané lokality, včetně inženýrskogeologických poměrů s dominancí jemnozrnných zemin neogenního stáří, vyznačujících se vysokou plasticitou a stlačitelností. Dále byla provedena rešerše a klasifikace dostupných geotechnických řešení pro založení a stabilizaci vysokých násypů. Praktická část se soustředila na numerické modelování interakce násypů pomocí softwaru Plaxis 2D a metody konečných prvků. Pro podloží byl aplikován konstitutivní model Hardening Soil (HSM), zatímco pro konstrukční prvky byl použit model Mohr-Coulomb (MCM).

Z analýzy výchozího stavu bez jakýchkoliv opatření bylo zjištěno kumulované sedání pod osou násypu VRT a pod dálničním násypem. Dosažení 95% primární konsolidace podloží bylo predikováno za přibližně 124 let. Tato zjištění jednoznačně zdůraznila nutnost implementace geotechnických opatření. Následně byla provedena analýza dvou variant řešení: aplikace vibrovaných štěrkových pilířů a injektážní clony. Vibrované štěrkové pilíře vedly k výraznému zkrácení doby 95% konsolidace na přibližně 50 let. Variantní řešení s injektážní clonou prokázalo snížení sedání dálničního násypu, avšak za cenu prodloužení doby konsolidace na přibližně 133 let.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysoký násyp, vysokorychlostní trať (VRT), dálniční násyp, geotechnika, konsolidace, numerické modelování, Hardening Soil Model, štěrkové pilíře, injektážní clona, monitoring

ABSTRACT

The subject of this diploma thesis was a comprehensive analysis of geotechnical interactions arising during the construction of a high-speed rail (HSR) embankment in the immediate vicinity of an existing highway embankment. The main objective of the work was to determine the effects of additional loading on the subsoil and the highway embankment, to design and assess mitigating measures, and to propose a monitoring system concept.

The theoretical part described the specifics of the given locality, including engineering geological conditions with a dominance of fine-grained Neogene soils characterized by high plasticity and compressibility. Furthermore, a literature review and classification of available geotechnical solutions for the foundation and stabilization of high embankments were carried out. The practical part focused on numerical modeling of embankment interaction using Plaxis 2D software and the finite element method. For the subsoil, the Hardening Soil Model (HSM) was applied, while for structural elements, the Mohr-Coulomb Model (MCM) was used.

The analysis of the initial state without any measures revealed cumulative settlement under the HSR embankment axis and under the highway embankment. The achievement of 95% primary subsoil consolidation was predicted to take approximately 124 years. These findings unequivocally emphasized the necessity of implementing geotechnical measures. Subsequently, an analysis of two alternative solutions was performed: the application of vibro-stone columns and a grouted curtain. Vibro-stone columns led to a significant reduction in the 95% consolidation time to approximately 50 years. The alternative solution with a grouted curtain demonstrated a reduction in the highway embankment's settlement, albeit at the cost of extending the consolidation time to approximately 133 years.

KEYWORDS

High embankment, High-speed rail (HSR), Highway embankment, Geotechnics, Consolidation, Numerical modeling, Hardening Soil Model, Vibro-stone columns, Grouted curtain, Monitoring

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAGYOVÁ, Noémi. *Návrh založení vysokého násypu na vysokorychlostní trati*. Brno, 2025. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí Ing. Pavel Koudela.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Návrh založení vysokého násypu na vysokorychlostní trati* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 01. 2026

Bc. Noémi Nagyová

autor

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Pavlu Koudelovi za odborné vedení, cenné rady a metodickou pomoc při zpracování této práce. Poděkování patří rovněž mé rodině, přátelům a kolegům za jejich neutuchající podporu po celou dobu mého studia.

OBSAH

1 ÚVOD.....	8
2 POPIS PROBLEMATIKY DANÉ LOKALITY.....	10
2.1 IDENTIFIKACE A MÍSTO KŘÍŽENÍ.....	10
2.2 MORFOLOGIE A SOUČASNÝ STAV TERÉNU	12
2.3 DEFINICE HLAVNÍHO TECHNICKÉHO PROBLÉMU	12
2.4 SPECIFICKÉ GEOTECHNICKÉ VÝZVY LOKALITY	13
3 POPIS GEOLOGICKÝCH POMĚRŮ.....	15
4 TECHNICKÉ OPATŘENÍ	17
4.1 OPATŘENÍ V ZÁKLADOVÉ SPÁŘE.....	17
4.1.1 Plošné vyztužení.....	17
4.1.2 Štěrkové pilíře.....	18
4.1.3 Stabilizace (zlepšení) podloží pojivem	22
4.2 ÚPRAVA KONSTRUKCE TĚLESA NÁSYPY.....	22
4.2.1 Vrstevnaté vyztužování	23
4.2.2 Lehčené násypy.....	23
4.3 ODVODŇOVACÍ A SANAČNÍ SYSTÉMY.....	24
4.3.1 Plošný patní drén.....	24
4.3.2 Vertikální drény.....	25
4.4 GEOTECHNICKÝ MONITORING.....	26
4.4.1 Povrchové značky	27
4.4.2 Inklinometrické vrty.....	27
4.4.3 Piezometry.....	28
5 METODOLOGIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ A INTERPRETACE GEOTECHNICKÝCH DAT.....	29
5.1 VOLBA A APLIKACE KONSTITUTIVNÍCH MODELŮ ZEMIN	29
5.2 MODEL Y VE SOFTWARE PLAXIS 2D	29
5.2.1 Mohr-Coulomb Model.....	30
5.2.2 Hardening Soil Model.....	30
5.3 ZDŮVODNĚNÍ VOLBY MODELU	31
5.4 STANOVENÍ A INTERPRETACE PARAMETRŮ HSM Z CPT DAT	31
5.4.1 Charakteristické parametry konstitutivního modelu HS.....	31
5.4.2 Interpretace geotechnických vlastností z dat CPT	32

5.4.3	<i>Stanovení předkonsolidačního napětí a poměru překonsolidace</i> ...	33
5.4.4	<i>Odvození referenčních modulů tuhosti z CPT dat</i>	34
5.5	VÝPOČETNÍ POSTUP.....	35
6	ZÁKLADNÍ VSTUPNÍ GEOTECHNICKÉ PARAMETRY PRO NUMERICKOU ANALÝZU	38
7	VÝPOČETNÍ MODEL KONSOLIDAČNÍHO NÁSYPU	41
7.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY 2D MODELU	41
7.2	FÁZE VÝPOČTU	41
7.3	ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	43
8	ZAHRNUTÍ OPATŘENÍ DO VÝPOČETNÍHO MODELU	45
8.1	VIBROVANÉ ŠTĚRKOVÉ PILÍŘE	45
8.1.1	<i>Metodika výpočtu</i>	45
8.1.2	<i>Základní charakteristiky 2D modelu</i>	46
8.1.3	<i>Fáze výpočtu</i>	47
8.2	INJEKTÁŽNÍ CLONA.....	47
8.2.1	<i>Metodika výpočtu</i>	47
8.2.2	<i>Základní charakteristiky 2D modelu</i>	48
8.2.3	<i>Fáze výpočtu</i>	49
8.3	ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	49
8.3.1	<i>Vibrované štěrkové pilíře</i>	49
8.3.2	<i>Injektážní clona</i>	50
9	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	52
10	ZÁVĚR	54
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
13	SEZNAM TABULEK	60

1 ÚVOD

Vysokorychlostní železniční doprava (VRT) představuje dynamicky se rozvíjející segment globální dopravní infrastruktury, jejíž expanze je spojena s výstavbou rozsáhlých a technicky náročných zemních konstrukcí. Realizace těchto projektů, zejména výstavba vysokých násypů, klade zvýšené nároky na geotechnické inženýrství a vyžaduje komplexní přístup k posouzení interakce s okolním prostředím a stávající infrastrukturou (Atkinson, 2007). V kontextu plánovaného rozvoje VRT v České republice se objevuje specifická problematika křížení nových vysokých násypů s již existujícími dopravními tělesy, jako jsou dálnice.

Kritická situace vzniká v místech, kde je nutné založit vysoký železniční násyp v bezprostřední blízkosti stávajícího dálničního tělesa. V takových lokalitách dochází k významné interakci mezi novou a stávající konstrukcí, jejímž důsledkem mohou být nežádoucí deformace, poklesy či snížení stability dálničního násypu, a to vlivem přetížení a změny napjatosti v podloží (Moseley a Kirsch, 2004). Pochopení a predikce těchto vlivů, stejně jako návrh účinných opatření k jejich minimalizaci, jsou klíčové pro zajištění dlouhodobé stability a bezpečné provozuschopnosti obou infrastrukturních staveb. Specifické inženýrskogeologické poměry lokality, včetně charakteristik hornin, zrnitosti podloží a stratigrafie, hrají zásadní roli při vyhodnocování rizik a definování optimálního řešení (Buzgóová, 2023).

Zajištění stability dopravní infrastruktury je prioritní pro bezpečnost cestujících, kontinuitu provozu a minimalizaci ekonomických ztrát vyplývajících z potenciálních poruch. Komplexní geotechnická analýza, návrh a ověření účinných sanačních a monitorovacích opatření jsou proto nezbytné pro úspěšnou a bezpečnou realizaci takto náročných stavebních záměrů.

Cílem této diplomové práce je provést podrobnou analýzu vlivu výstavby vysokého násypu vysokorychlostní železniční trati na stávající těleso dálničního násypu v místě jejich křížení. V rámci tohoto cíle bude provedena studie navrhovaného řešení a následné stanovení velikosti a rozsahu vlivu násypu VRT na stávající infrastrukturu. Dále bude navržena a analyzována

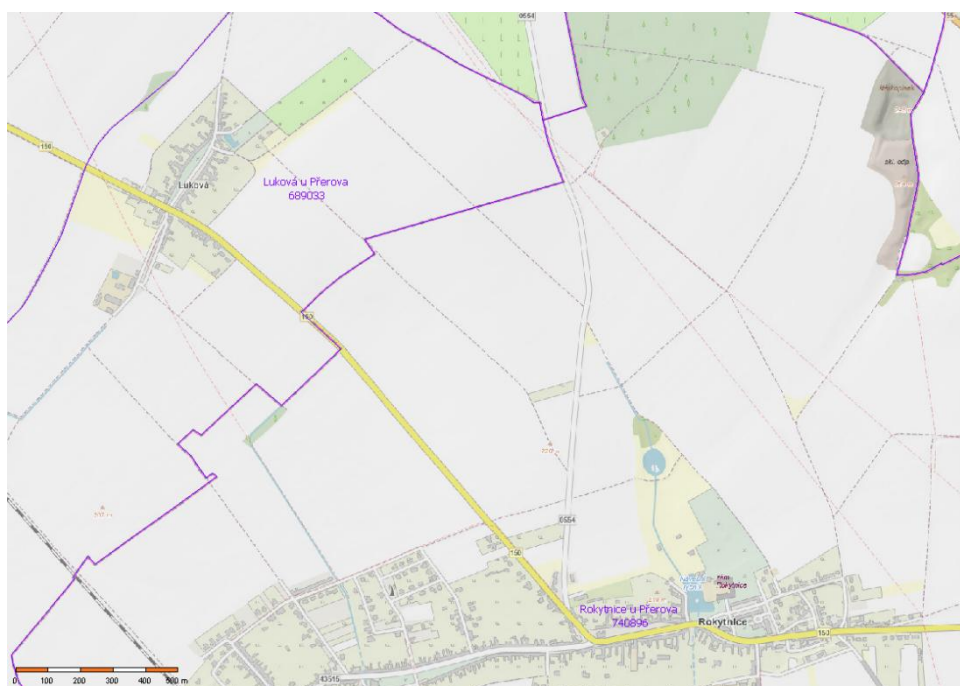
sada opatření, která mají za úkol zmírnit negativní vlivy plánované výstavby vysokého tělesa násypu na stávající dálniční těleso. Nedílnou součástí práce je rovněž návrh systému monitoringu studovaného násypu, který bude navázán na výsledky výpočetního modelu a poslouží k ověření stability konstrukce v průběhu času.

Pro dosažení stanovených cílů je využita kombinace kvalitativního a kvantitativního výzkumu. Kvalitativní přístup zahrnuje studium teoretických aspektů problematiky, analýzu inženýrskogeologických poměrů lokality a rešerši dostupných opatření. Kvantitativní část je zaměřena na vytvoření výpočetního modelu, provedení numerických analýz a kvantifikaci vlivů a účinnosti navržených opatření.

Teoretická část práce se zaměřuje na představení obecné problematiky vysokých železničních násypů, charakteristiku lokality křížení a detailní popis inženýrskogeologických poměrů z dostupných průzkumů a geologických podkladů. Dále se věnuje obecným problémům spojeným s návrhem a výstavbou násypů v dopravní infrastruktuře a možnostem zmírnění jejich negativních vlivů prostřednictvím různých konstrukcí a technologií výstavby. Praktická část se soustředí na tvorbu výpočetního modelu pro simulaci interakce násypů, interpretaci jeho výsledků a analýzu účinnosti navržených opatření.

2 POPIS PROBLEMATIKY DANÉ LOKALITY

Zájmové území se nachází v katastrálním území Luková u Přerova, v Olomouckém kraji, ve východní části České republiky, viz Obr.1. Řešená lokalita leží v prostoru významného severojižního dopravního tahu Moravy, kde dochází ke koncentraci liniových staveb dopravní infrastruktury.

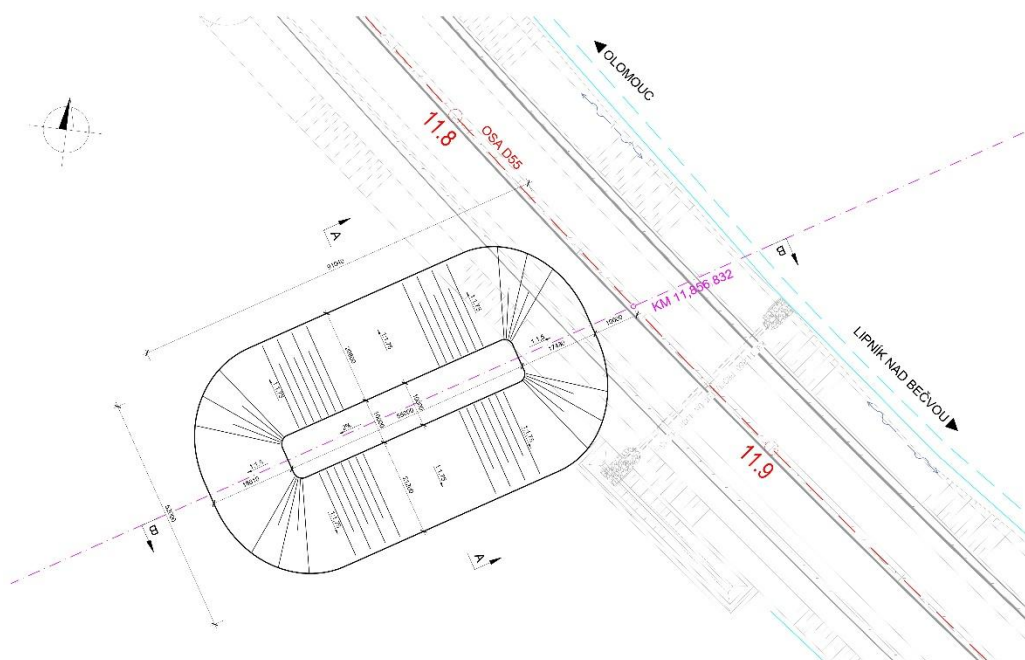


Obr. 1 Katastrální mapa k. ú. Rokytnice u Přerova a Luková u Přerova – výřez
M1:10 000 (ČÚZK, c2026)

2.1 Identifikace a místo křížení

Místo křížení je lokalizováno v úseku dálnice D55, stavby 5502 Kokory – Přerov, s plánovanou vysokorychlostní tratí (VRT). Konkrétně je křížení situováno v přibližném staničení dálnice D55 na kilometru 11,856. Přesná kilometráž VRT v daném místě není explicitně uvedena, avšak celá problematika se soustředí na vzájemnou interakci obou staveb.

Definice geometrie budoucího násypu VRT vychází z projektu konsolidačního opatření, který byl vypracován s cílem zmírnit vlivy výstavby na okolní infrastrukturu. Navrhovaný konsolidační násyp dosahuje výšky 12 m, přičemž jeho šířka v patě činí 52 m a v koruně 10 m. Sklony svahů násypu jsou navrženy v poměru 1:1,75. Pata tohoto násypu je umístěna 10 m vpravo od osy plánované dálnice D55 (DIPONT s.r.o., 2024). Šířkové uspořádání dálnice D55 v daném úseku není detailně specifikováno, nicméně předpokládá se standardní profil pro dálniční komunikaci. Půdorys rozmístění stavby je graficky znázorněno na Obr. 2.

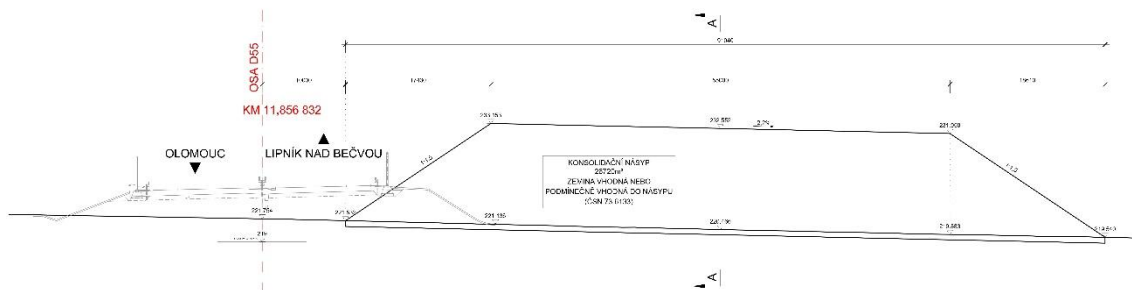


Obr. 2 Půdorys dálnice D55 v místě křížení násypu VRT (DIPONT s.r.o., 2024)

Tento předstihový konsolidační násyp je klíčovým prvkem navrženého řešení, jehož cílem je vypořádat se s účinky sedání vysokého násypu VRT na těleso dálnice D55 ještě před zahájením výstavby dálnice. Tato diplomová práce navazuje na zmíněný projekt a rozšiřuje analýzu navržených opatření pro minimalizaci negativních vlivů na stávající či nově budované dálniční těleso.

Prostorový vztah obou staveb je charakterizován křížením, přičemž úhel křížení je z výkresových podkladů vizuálně patrný jako přibližně kolmý. Výškový rozdíl nivelet vyplývá z výšky násypu VRT a z kót nivelet dálnice D55,

keré je graficky znázorněno na Obr. 3. Rozdíl výšek se v daném úseku pohybují v rozmezí 220–230 m n. m. (DIPONT s.r.o., 2024).



Obr. 3 Podélný řez osou násypu VRT (DIPONT s.r.o., 2024)

2.2 Morfologie a současný stav terénu

Oblast Středomoravské nivy má charakter roviny s velmi plochým reliéfem a malou vertikální členitostí. Trasa dálnice v blízkosti křížení s násypem VRT prochází mírně zvlněným územím, kde nadmořská výška v km 8,000 klesá z 225 m n. m. do údolí říčky Olešnice na 212 m n. m. v km 9,400 a následně stoupá na nejvyšší bod trasy 236 m n. m. v km 10,870. Poté opět klesá na 220 m n. m.

Stávající dálniční těleso D55 je v kontextu výstavby VRT považováno za nově budovanou nebo plánovanou konstrukci, neboť konsolidační opatření pro zmírnění vlivu násypu VRT byla navržena a prováděna před stavbou samotného tělesa dálnice (DIPONT s.r.o., 2024). V důsledku tohoto předstihového budování se na dálnici nepředpokládají stávající poruchy či projevy sedání, které by byly způsobeny jejím stářím. Primárním zájmem je ochrana této nově budované konstrukce před vlivy sekundární výstavby.

2.3 Definice hlavního technického problému

Hlavní technický problém spočívá v analýze vlivu dodatečného přitížení, které představuje vysoký násyp VRT, na podloží a těleso stávající dálnice D55. Plánovaná výstavba násypu VRT může způsobit významné

změny v napjatosti v podloží dálnice, což se projeví vodorovným posunem a zdvihem dálničního tělesa (DIPONT s.r.o., 2024). Tato interakce je kritická, jelikož deformace v podloží násypů mohou dosahovat značných hodnot, stovky milimetrů.

Identifikace deformační zóny je klíčová pro pochopení rozsahu ovlivnění dálničního tělesa. Lze očekávat vznik poklesové kotliny vlivem konsolidace pod násypem VRT a potenciální vytlačování zeminy v patě nového násypu, což může vést k horizontálním deformacím a zdvihu sousední konstrukce. Tyto deformace jsou dále akcentovány vysokými přírůstky pórových tlaků v nepropustných vrstvách podloží, jejichž rozptýlení je velmi pomalé a významně přispívá k dlouhodobému sedání.

Vliv na bezpečnost provozu na dálnici D55 je prioritní. Nerovnoměrné sedání vozovky dálnice nebo horizontální posuny by mohly způsobit trhliny, nerovnosti a snížení jízdního komfortu, čímž by byla ohrožena bezpečnost provozu. Je nezbytné, aby byly dodrženy limitní průhyby a deformace povrchu vozovky v souladu s platnými normami a předpisy pro dopravní stavby.

2.4 Specifické geotechnické výzvy lokality

Lokalita se potýká s několika specifickými geotechnickými výzvami vyplývajícími z kombinace vysokého násypu VRT a charakteristického podloží. Pod humózním horizontem se vyskytují eolické sedimenty, jíly a hlíny s proměnlivým obsahem písčité frakce, pod nimi fluviální sedimenty, jíly, hlinité písky, hlinité štěrky. Neogenní terciární souvrství, tvořené jíly s vysokou až velmi vysokou plasticitou, se nachází v předkvartérním podkladu (DIPONT s.r.o., 2024). Tato skladba podloží naznačuje nízkou únosnost a vysokou stlačitelnost, což je potvrzeno očekávanými vysokými přírůstky pórových tlaků v nepropustných vrstvách a pomalým rozptylem těchto tlaků, vedoucím k dlouhodobé konsolidaci. Ustálená hladina podzemní vody okolo 216 m n. m. dále komplikuje situaci, neboť vysoké pórové tlaky a jejich pomalá disipace mají přímý vliv na rychlost a míru sedání.

Etapizace výstavby je klíčová pro minimalizaci negativních vlivů na dálnici D55. Vzhledem k tomu, že dálnice má být budována v předstihu, provádění konsolidačních opatření, jako je například zřízení konsolidačního

násypu před vlastní výstavbou dálnice a následné postupné odtěžování by bylo výhodné (DIPONT s.r.o., 2024). Cílem je umožnit primární konsolidaci podloží a eliminovat vlivy dodatečných deformací na těleso dálnice D55, čímž je zachován plynulý a bezpečný provoz na dálnici během celého procesu budování násypu VRT.

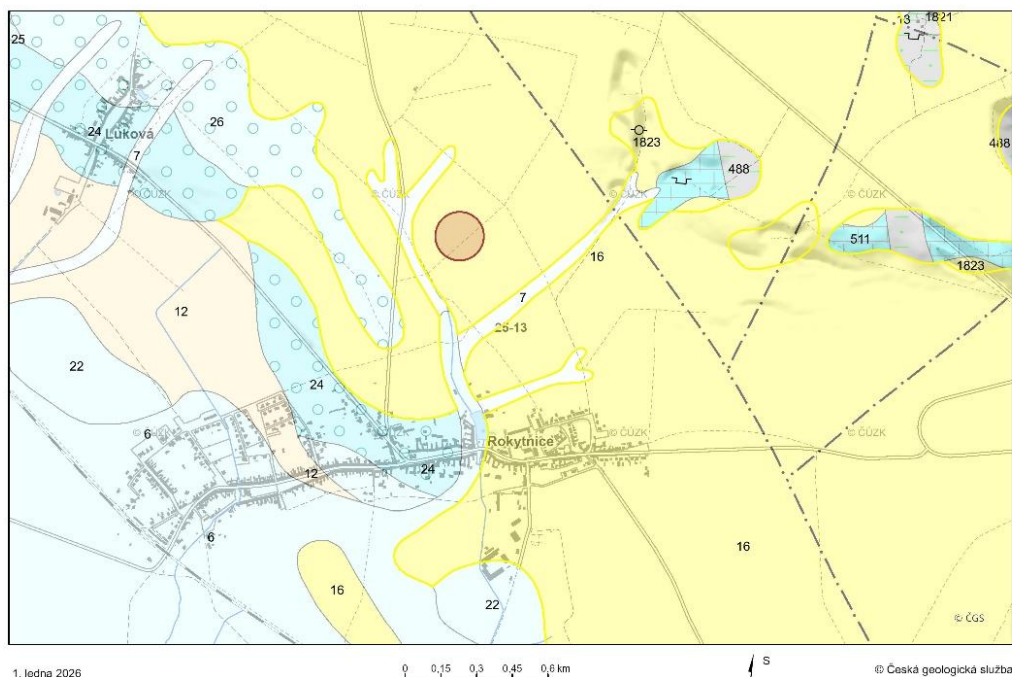
V rámci geotechnické analýzy návrhu založení jsou prostřednictvím numerických výpočtů detailně analyzovány a modelovány předpokládané hodnoty pórových tlaků a průběh konsolidace v zemním podloží. V případech, kdy tyto výpočty indikují výskyt vysokých pórových tlaků nebo nedostatečně rychlou konsolidaci, která by mohla vést k nepřijatelným deformacím či stabilitním problémům, je následně nezbytné navrhnout a posoudit specifické technologie pro urychlení konsolidace zeminy pod násypem (Moseley a Kirsch, 2004). Implementace takových opatření je klíčová pro dosažení požadované stability a minimalizaci post konstrukčních sedání a potenciálních negativních vlivů na stávající dálniční těleso.

3 POPIS GEOLOGICKÝCH POMĚRŮ

Z regionálně-geomorfologického hlediska je posuzovaná trasa součástí dvou hlavních podsoustav: Východních Sudet, konkrétně Jesenické podsoustavy a Západní vněkarpatské sníženiny. V rámci Východních Sudet je zastoupen podcelek Tršická pahorkatina, Práslavická a Čekyňská pahorkatina, která představuje nejnižší část Nízkého Jeseníku. Tato oblast je charakterizována mírně zvlněným reliéfem, jenž vznikl erozí zarovnaného povrchu na paleozoických horninách v údolích řeky Olešnice a jejích přítoků.

K oblasti Západní vněkarpatské sníženiny náleží Hornomoravský úval, reprezentovaný podcelkem Středomoravské nivy. Středomoravská niva je rovina, kde dochází k akumulaci kvartérních struktur v oblasti nižších fluviálních teras a údolních niv, což se projevuje velmi plochým reliéfem s malou vertikální členitostí. Sedimenty Středomoravské nivy jsou uloženy na neogenních sedimentech.

Trasa stavby prochází dvěma hlavními geologickými jednotkami: moravským paleozoikem, devon až spodní karbon a vněkarpatskou předhlubní, neogén, viz Obr. 4.



Obr. 4 Geologická mapa zájmové oblasti (ČGS, c2026)

KENOZOIKUM: KVARTÉR: 6 – nivní sediment, 7 – smíšený sediment, 12 – písčito-hlinitý až hlinito-písčítý sediment, 13 – kamenitý až hlinito-kamenitý sediment, 16 – spraš až sprašová hlína, 22,24,25,26 – písek, štěrk,

NEOGÉN: 1821 – vápnitý jíł (tėgl), místy s polohami písků, 1823 – klastika – písky, štěrky se zpevněnými polohami pískovce, slepence,

PALEOZOIKUM: KARBON: 488 – droby, 490 – jílovité břidlice, prachovce, droby,

DEVON: 511 – vápence a dolomity.

Základem podloží zájmové oblasti jsou krystalické horniny a granitoidy. Směrem do nadloží jsou vyčleněny horniny devonu, spodního karbonu a miocénu. Paleozoické sedimenty nebyly vrtným průzkumem v trase zastiženy, jejich výskyt je předpokládán v hlubším podloží. Nejmladším pokryvným útvarem předkvartérního podloží je autochtonní sedimentární výplň vněkarpatské předhlubně, tvořená miocénními sedimenty. Skalní a poloskalní horniny mladšího paleozoika vystupují na povrch v širším okolí, konkrétně u obcí Kokory a Rokytnice, a jsou zastoupeny především kvarcity náležejícími k bazálnímu klastickému souvrství spodního devonu.

4 TECHNICKÉ OPATŘENÍ

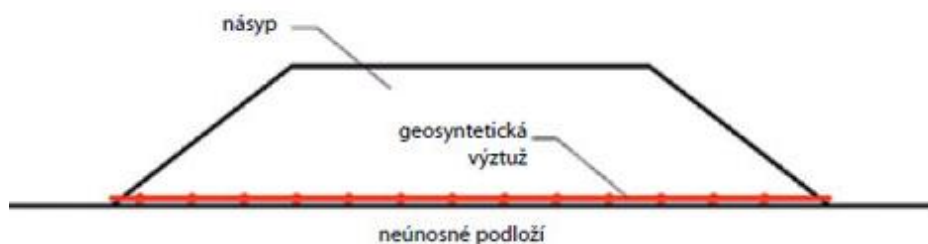
Pro zajištění stability vysokého násypu vysokorychlostní trati, zejména v místě křížení se stávajícím dálničním tělesem, je nezbytné aplikovat soubor geotechnických opatření. Tato opatření jsou zaměřena na zlepšení základových poměrů, zpevnění tělesa násypu a řízené odvodnění. Nedílnou součástí je rovněž kontinuální monitoring chování celé konstrukce.

4.1 Opatření v základové spáře

Opatření v základové spáře se soustředí na zlepšení únosnosti a snížení deformací podloží pod násypem, což je klíčové pro dlouhodobou stabilitu konstrukce.

4.1.1 Plošné vyztužení

Plošné vyztužení základové spáry geosyntetikmi (viz Obr. 5 a Obr. 6) představuje účinnou metodu pro zvýšení únosnosti měkkého podloží a omezení jeho diferenciálního sedání. Geomříže, které jsou typem geosyntetika, distribuují zatížení z násypu na větší plochu a zároveň zabraňují průniku sypaniny do měkkých zemin, čímž se stabilizuje základová spára. Tento princip je součástí technologie vyztužených násypů, které jsou klasifikovány jako konstrukce využívající geomateriál a vyztužný prvek, především geosyntetikum (Novák, 2022). Systém vyztužení umožňuje efektivnější přenos napětí a snižuje riziko lokálních poruch způsobených nerovnoměrnou stlačitelností podloží.



Obr. 5 Vyztužení báze násypu (ASB Portál, c2024)



Obr. 6 Vyztužení báze násypu výztužnou matrací (ASB Portál, c2024)

4.1.2 Štěrkové pilíře

Vývoj technologie štěrkových pilířů byl orientován pro potřebu efektivního zlepšení geotechnických vlastností slabých, měkkých a stlačitelných zemín, které vykazují nedostatečnou únosnost, vysokou stlačitelnost a potenciální riziko zkapalnění, což komplikuje založení stavebních konstrukcí (Vanko, 2015). Cílem metody je zvýšení tuhosti, pevnosti a propustnosti zemního podloží. Provádění štěrkových pilířů je technologie hloubkového zlepšování podloží, jejímž principem je optimalizace deformačních charakteristik a zvýšení celkové únosnosti geotechnické konstrukce.

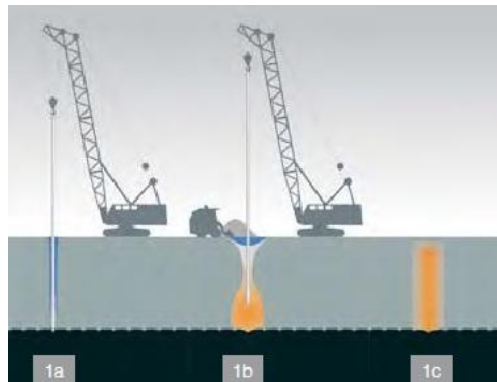
- *Štěrkový pilíř s horním plněním bez vodního výplachu*

Princip provádění štěrkových pilířů metodou horního plnění bez vodního výplachu, známou jako vibro-displacement (suchá metoda), spočívá v pronikání vibračního prvku do zeminy, při kterém dochází k radiálnímu zhutňování okolní zeminy a vytlačování materiálu do stran. Po dosažení projektované hloubky je vibrátor postupně vytahován a do vytvořeného otvoru je shora doplňován štěrk pomocí bagru nebo jiného mechanismu, jak je znázorněno na Obr. 7. Štěrk je následně vibrátorem zhutňován, což vede k postupnému formování pilíře a dalšímu zatlačování materiálu do okolní zeminy (Vanko, 2015; Keller, c2026a).

Tato metoda je vhodná pro nezpevněné až středně zpevněné soudržné zeminy, jako jsou jíly a bahna, dále pro zvodnělé soudržné zeminy, jemnozrnné a smíšené zeminy (Keller, c2026a).

Výhodou této technologie je zvýšení únosnosti podloží, snížení celkového a diferenčního sedání a urychlení konsolidace. Rovněž se snižuje riziko ztekucení zemin.

Nevýhodou je, že metoda není vhodná pro velmi soudržné zeminy a zeminy s nízkým obsahem vody, neboť v těchto podmínkách nelze dosáhnout dostatečného zhutnění a vytlačení zeminy. Navíc existuje riziko přetvoření okolních konstrukcí v důsledku bočních deformací zeminy (Keller, c2026a).



Obr. 7 Provádění štěrkových pilířů s plněním štěrku k ústí vpichu (Zakládání staveb, a. s., c2026)

- Štěrkový pilíř s dolním plněním

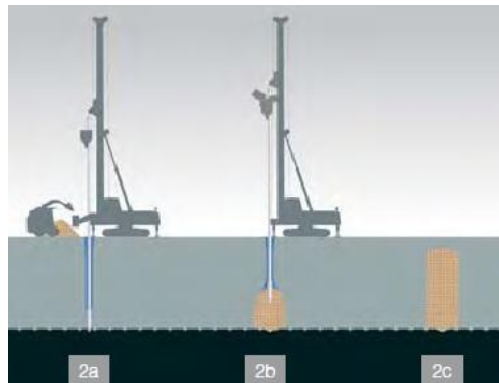
Bez vodního výplachu:

Provádění štěrkových pilířů metodou dolního plnění bez vodního výplachu je rovněž variantou vibro-displacement (suché metody) a liší se od horního plnění způsobem dopravy štěrku do formovaného pilíře. V tomto případě je štěrkový materiál přiváděn plnicí trubicí přímo k výpustnému otvoru na konci vibračního prvku, který proniká do zeminy. Po dosažení požadované hloubky je štěrk uvolňován a zhutňován vibrátorem během jeho postupného vytahování, viz Obr. 8. Tímto způsobem je pilíř formován "zdola nahoru" (Miča, 2021).

Tato technologie je primárně určena pro podobné typy zemin jako horní plnění bez výplachu, tedy pro nesoudržné až středně soudržné zeminy s vyšším obsahem vody, kde je možné vytlačit zeminu do stran a efektivně zhutnit nově vzniklý štěrkový pilíř (Vanko, 2015; Keller, c2026a).

Mezi výhody patří vysoká efektivita zhutnění materiálu v celém profilu pilíře a menší riziko zanesení otvoru oproti hornímu plnění v nestabilních zeminách.

Nevýhody jsou spojeny s potenciálními vibracemi a hlukem, stejně jako s rizikem deformací sousedních konstrukcí způsobených radiálním přetvořením zemního masivu (Keller, c2026a).



Obr. 8 Provádění štěrkových pilířů s plněním štěrku ke špici jehly (Zakládání staveb, a. s., c2026)

S vodním výplachem:

Technologie provádění štěrkových pilířů s vodním výplachem, známá jako vibro-replacement (mokrý metoda), využívá při vnikání vibračního prvku do zeminy proud vody pod tlakem. Voda usnadňuje pronikání vibrátoru a zároveň vyplavuje zeminu na povrch, kde je společně s vodou odstraňována. Po dosažení projektované hloubky je otvor postupně vyplňován štěrkem, který je vibrátorem zhutňován za současného vytahování nástroje. Tím dochází k náhradě původní zeminy štěrkovým materiálem (Vanko, 2015; Keller, c2026a).

Tato metoda je vhodná pro nesoudržné zeminu s dobrou propustností, ale lze ji aplikovat i v soudržných zeminách s vyšším obsahem vody.

Výhodou je efektivní odstranění méně únosné zeminy z profilu budoucího pilíře a vytvoření homogenního štěrkového tělesa, což vede ke zvýšení únosnosti, snížení sedání a urychlení konsolidace.

Hlavními nevýhodami jsou však vysoká spotřeba vody, produkce velkého množství kontaminované zeminy s vodou, která vyžaduje odvoz a nákladnou likvidaci. Dále je nutné zajistit dostatečné množství vody na stavbě (Keller, c2026a).

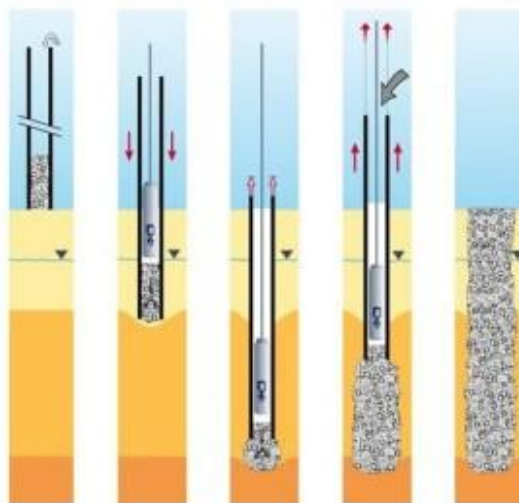
- *Využití systému Franki pro štěrkové pilíře*

Systém Franki představuje metodu vytváření štěrkových pilířů bez vibrací, která je založena na principu ražení ocelové výpažnice uzavřené zátkou do zeminy. Po dosažení požadované hloubky je zátky z výpažnice vytlačena, čímž se vytvoří prostor pro štěrkovou výplň. Následně je do výpažnice sypán drcený štěrk, který je hutněn pomocí beranu za postupného vytahování výpažnice, jak je znázorněno na Obr. 9. Tímto postupem dochází k intenzivnímu roztlačování okolní zeminy do stran a vytvoření pilíře, jehož průměr může být až dvojnásobný oproti průměru razičky (Vanko, 2015; Miča, 2021).

Tato metoda je efektivní pro málo únosné a stlačitelné zeminy, kde je cílem výrazně zlepšit mechanicko-fyzikální parametry původního materiálu a zvýšit únosnost zeminy, snížit sedání a urychlit konsolidaci (Miča, 2021).

Mezi výhody patří možnost dosažení vysokého stupně zhutnění pilíře, což vede k vysokým modulům deformace, a vytvoření velkých průměrů pilířů.

Nevýhodou může být generování značných otřesů a hluku během ražení výpažnice, což může být problematické v blízkosti stávajících konstrukcí, a riziko velkého bočního deformace zeminy (Vanko, 2015).



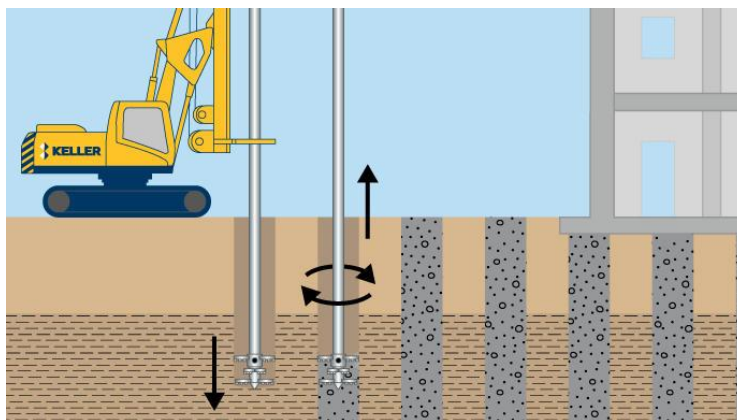
Obr. 9 Štěrkové pilíře systémem Franki (Marchese Group, c2026)

4.1.3 Stabilizace (zlepšení) podloží pojivem

Stabilizace zemin představuje proces, při kterém dochází k úpravě vlastností zemin prostřednictvím jejich smíchání s vhodnými pojivy, což vede ke změně jejich struktury a vzniku materiálu s vylepšenými geotechnickými charakteristikami (Miča, 2021). Tímto způsobem se zvyšuje únosnost podloží, snižuje se plasticita zeminy a zlepšuje se její propustnost.

Mezi nejčastěji používaná pojiva pro stabilizaci zemin patří vápno (oxid vápenatý – CaO), cement, sádra a jejich vzájemné kombinace (Miča, 2021). Volba konkrétního pojiva závisí na typu zeminy a jejích vlastnostech.

Stabilizace zemin se provádí buď plošně, kdy se zemina mísí s pojivem do hloubky přibližně 50–70 cm pomocí frézy, nebo hloubkově, kdy se úprava provádí do hloubek dosahujících několika desítek metrů (Miča, 2021). Hloubková stabilizace zahrnuje technologie jako Deep Mixing (DM), kde se pojivo buď mísí se zeminou za sucha (dry mixing), nebo se injektuje cementová suspenze (wet mixing) přímo do zeminy, čímž dochází ke zlepšení pevnosti, tuhosti a snížení stlačitelnosti a propustnosti zeminy (Keller, c2026b).



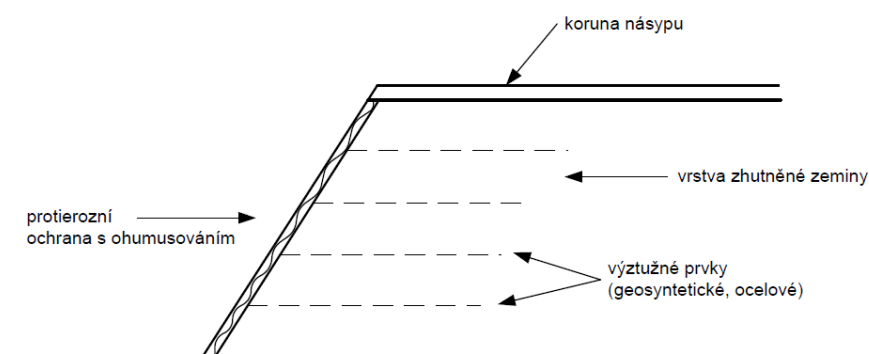
Obr. 10 Deep Mixing (Keller, c2026b)

4.2 Úprava konstrukce tělesa násypu

Stabilita a funkčnost vysokého násypu závisí také na samotné konstrukci jeho tělesa, kde lze aplikovat inovativní materiály a technologie.

4.2.1 Vrstevnaté vyztužování

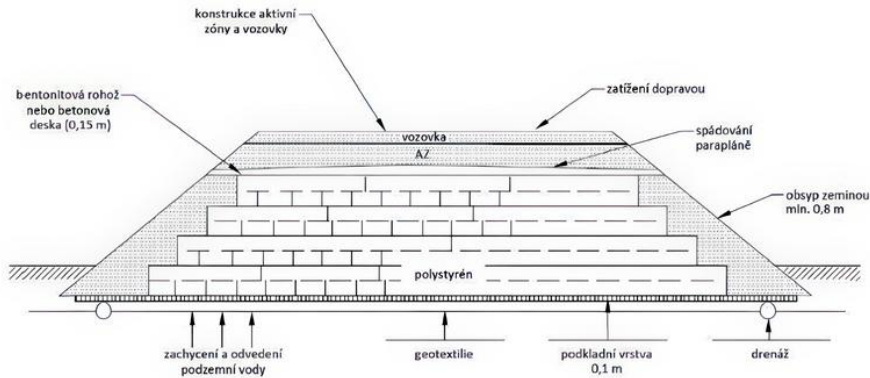
Vrstevnaté vyztužování, známé též jako vyztužená zemina, viz Obr. 11, představuje efektivní řešení pro zvýšení stability strmých násypů a omezení jejich deformací. Tato technologie spočívá v ukládání vyztužných prvků, typicky geosyntetik (např. geomříží), do jednotlivých vrstev sypaniny během výstavby násypu (Miča, 2021; Novák, 2022). Geosyntetika pohlcují tahová napětí a zabraňují šíření smykových ploch, čímž se zemině dodává dodatečná pevnost a zvyšuje se celková stabilita konstrukce.



Obr. 11 Vyztužení násypu (ÚNMZ, Únor 2010)

4.2.2 Lehčené násypy

Lehčené násypy, využívající materiály jako expandovaný polystyren (EPS) nebo liapor (expandovaný jííl), viz Obr. 12, jsou navrhovány s cílem snížit celkové zatížení podloží (Novák, 2022). EPS geofoam a liapor jsou materiály s nízkou objemovou hmotností, které minimalizují sedání a zvyšují stabilitu násypů na měkkém a stlačitelném podloží (Miča, 2021). V České republice jsou konkrétně využívány například LIAPOR (na přírodní bázi – jííl) a EPS (extrudovaný polystyrén). Tyto materiály jsou výhodné zejména v místech s kritickými geotechnickými podmínkami, což je zvláště relevantní pro návrh vysokorychlostních tratí na měkkých podložích, kde jsou kladeny přísné požadavky na minimální sedání a dynamické chování konstrukce (Woldringh a New, 1999).



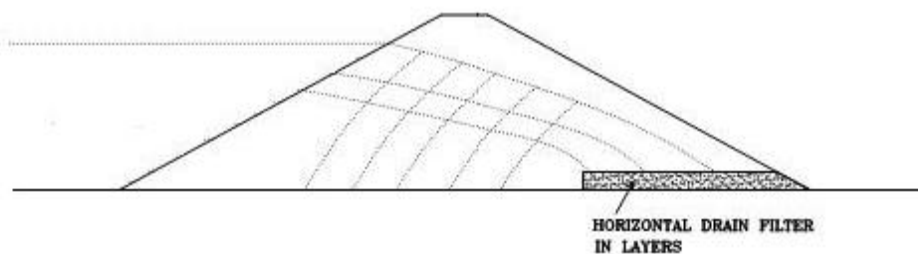
Obr. 12 Příčný řez násypem vylehčeného pomocí bloků z EPS (Ministerstvo dopravy ČR, 2008)

4.3 Odvodňovací a sanační systémy

Pro stabilitu násypu odvodnění je zásadní. Přítomnost vody významně snižuje smykovou pevnost zemin a ovlivňuje konsolidace podloží.

4.3.1 Plošný patní drén

Plošný patní drén z drceného kameniva se umísťuje v základové spáře násypu, typicky v jeho patě, jak je znázorněno na Obr. 13. Jeho primární funkcí je zachycování podpovrchové vody a její odvádění mimo těleso násypu, čímž se zabraňuje zvýšení pórových tlaků a saturaci zeminy. Použití drceného kameniva zajišťuje dostatečnou propustnost a stabilitu drénu. Systém patních drénů je klíčový pro udržení nízkého obsahu vody v násypu a jeho podloží, což přispívá k vyšší smykové pevnosti a celkové stabilitě.



Obr. 13 Plošný drén (Jamal, 2017)

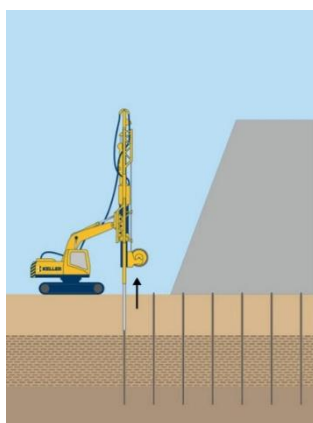
4.3.2 Vertikální drény

Svislé drény, často ve formě prefabrikovaných vertikálních drénů (PVD), představují efektivní geotechnické opatření primárně využívané k urychlení konsolidace stlačitelných zemin s nízkou propustností a vysokým stupněm nasycení (Miča, 2021).

Jejich uplatnění je klíčové v oblastech s výskytem vodou nasycených jíílů, vysoce plastických jíílů a vysoce organických zemin, kde je kritické zkrácení doby primárního sedání zemní konstrukce (Miča, 2021). Proces konsolidace je urychlen zkrácením odvodňovacích drah, čímž je umožněna efektivnější disipace zvýšených pórových tlaků vznikajících zatížením málo propustných zemin. PVD tak přispívají ke zvýšení pevnosti málo únosné zeminy a minimalizaci rizika nekontrolovaných deformací. Oproti tradičním pískovým drénům se PVD vyznačují vyšší efektivností a snadnější instalací s menší zónou porušení okolní zeminy (Miča, 2021).

Instalace PVD začíná úpravou terénu a případným zřízením pracovní vrstvy z hrubozrnného materiálu, která slouží jako plošný drén. Samotná instalace probíhá speciální soupravou, kdy je drén veden ocelovým trnem a na spodním konci fixován kotevní patkou, viz na Obr. 14. Po dosažení cílové hloubky se trn vytáhne, drén zůstává v podloží ukotven, uřízne se a proces se opakuje (Keller, c2026c).

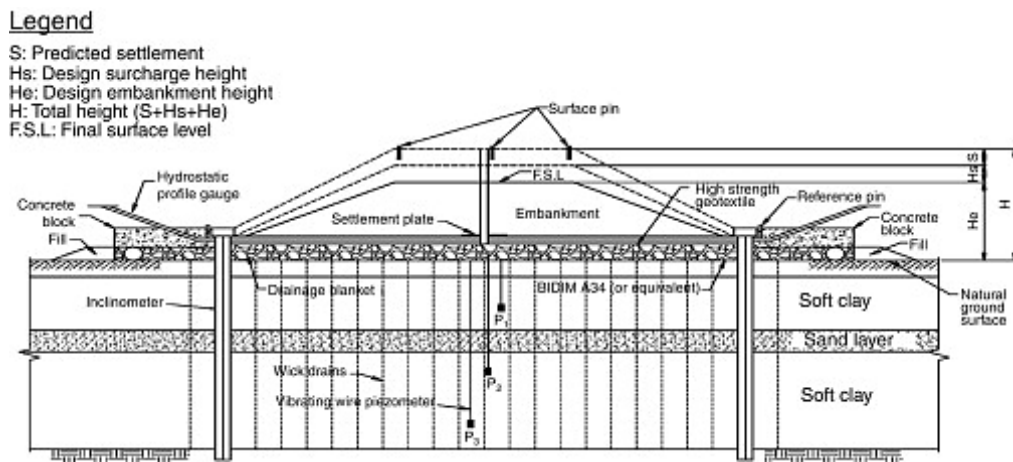
Použití PVD u vysokorychlostních tratí je klíčové pro splnění přísných limitů reziduálního sedání a zkrácení doby výstavby (Woldringh a New, 1999). Zrychlená konsolidace zajistí většinu sedání již během stavby, čímž eliminuje riziko nerovnoměrných deformací a zajišťuje dynamickou stabilitu tratě (Woldringh a New, 1999).



Obr. 14 Prefabrikovaný vertikální drén (Keller, c2026c)

4.4 Geotechnický monitoring

Geotechnický monitoring je nezbytnou součástí výstavby a provozu vysokých násypů, jelikož umožňuje sledovat chování konstrukce a včas reagovat na potenciální problémy (Buzgóová, 2023). Přístrojové vybavení a monitorování je graficky znázorněno na Obr. 15.



Obr. 15 Monitorovací vybavení násypu (Hsi a Martin, 2015)

4.4.1 Povrchové značky

Povrchové značky, umístované na povrchu násypu a v jeho blízkém okolí, slouží k měření horizontálních a vertikálních posunů. Tyto značky, často pevné body s geodetickou přesností, umožňují pravidelným měřením vyhodnocovat míru sedání a případných horizontálních deformací násypového tělesa (Buzgóová, 2023). Dlouhodobé sledování těchto posunů poskytuje cenné informace o stabilitě násypu a jeho interakci s podložím.

4.4.2 Inklinometrické vrty

- *Horizontální inklinometrické vrty*

Využívají se k monitoringu svislých deformací a sedání v podloží násypu. Systém se skládá z modifikované inklinometrické sondy, která funguje na principu elektronického kyvadla a je protahována horizontálně uloženou pažnicí s vodícími drážkami (Novák, 2022). Tato pažnice se instaluje do podloží před výstavbou násypu. Měření úklonu od horizontály v pravidelných intervalech se následně přepočítávají hodnoty sedání a celkových vertikálních deformací, což poskytuje přehled o časovém průběhu konsolidace a vertikálních pohybů pod konstrukcí (Novák, 2022).

- *Vertikální inklinometrické vrty*

Slouží k měření vodorovných deformací uvnitř zemního tělesa násypu a jeho podloží. Měřicí sonda je spouštěna do předem instalované vodící trubky, která je vybavena drážkami pro zajištění správné orientace sondy (Novák, 2022). Sonda detekuje změny sklonu v různých hloubkách (Buzgóová, 2023), což umožňuje identifikovat hloubku a rozsah potenciálních smykových ploch, které by mohly signalizovat nestabilitu násypu.

4.4.3 Piezometry

Piezometry jsou zařízení určená k měření tlaku pórové vody v zeminách. Monitorování pórových tlaků je kritické, neboť jejich zvýšení může významně snížit efektivní napětí v zemině a tím i její smykovou pevnost, což vede k nestabilitě (Buzgóová, 2023). Piezometry se umísťují do různých hloubek v násypu a jeho podloží, aby poskytovaly komplexní obraz o hydrogeologických podmínkách a jejich vlivu na stabilitu konstrukce (Novák, 2022).

5 METODOLOGIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ A INTERPRETACE GEOTECHNICKÝCH DAT

Numerické modelování, především s využitím metody konečných prvků (MKP), představuje zásadní nástroj pro analýzu složitých geotechnických úloh a interakcí mezi zeminou a konstrukcí (Masopust, 2004). Tato metoda umožňuje simulovat nelineární chování zemin a predikovat deformace a napětí v geologických masivech s vysokou přesností, což je pro návrh založení vysokého násypu klíčové. Cílem je posoudit vliv výstavby vysokého násypu na těleso dálnice numerickým modelováním a navrhnout adekvátní opatření. Kapitola se zaměřuje na objasnění principů použité metodiky, včetně volby konstitutivních modelů, interpretace in-situ dat a stanovení vstupních parametrů pro numerickou analýzu.

5.1 Volba a aplikace konstitutivních modelů zemin

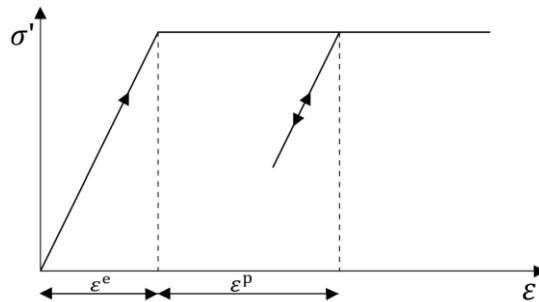
Pro realistickou simulaci chování zemin v geotechnických úlohách je nezbytná volba vhodného konstitutivního modelu, který vystihuje jejich komplexní mechanické vlastnosti. Softwarová prostředí pro numerické modelování, jako jsou PLAXIS, ZSoil nebo Midas GTS NX, poskytují komplexní nástroje pro definici geometrie problému, aplikaci okrajových podmínek, určení zatížení a implementaci různých konstitutivních modelů zemin (Bentley Systems, 2023; Obrzud a Truty, 2018). Tyto programy umožňují uživatelům zadávat materiálové parametry, simulovat konstrukční fáze a analyzovat výsledné deformace, napětí a stabilitu konstrukcí.

5.2 Modely ve softwaru Plaxis 2D

Software Plaxis 2D je široce uznávaným nástrojem pro dvoudimenzionální geotechnické analýzy pomocí metody konečných prvků. Pro modelování chování zemin v Plaxis 2D je možné využít různé konstitutivní modely.

5.2.1 Mohr-Coulomb Model

Tradiční lineárně-elastický ideálně-plastický model (Obr.16) Mohr-Coulomb (MC) představuje zjednodušený přístup, který charakterizuje zeminu konstantní tuhostí (jediným modulem pružnosti E_{ref}) a kritériem porušení založeným na úhlu vnitřního tření a kohezi (Bentley Systems, 2023).

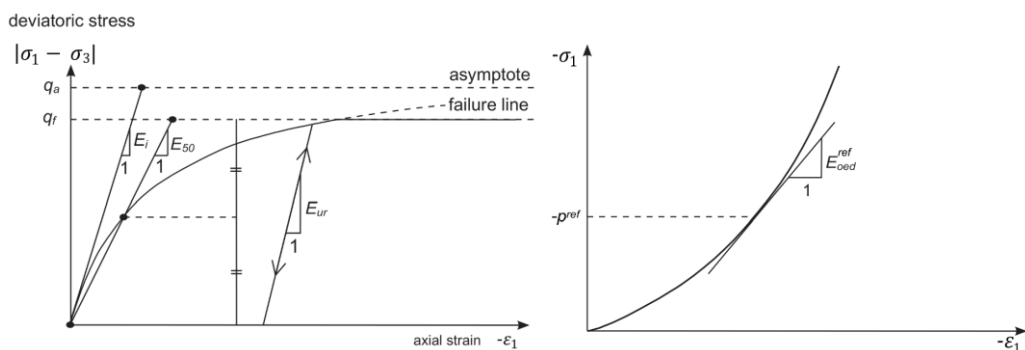


Obr. 16 Lineárně-elastický ideálně-plastický model (Bentley Systems, 2023)

Nicméně pro složitější úlohy, zejména při nelineárním chování zemin a přítomnosti překonsolidace, je model MC nedostatečný, neboť nedokáže postihnout závislost tuhosti na stavu napětí a plastické deformace při zatěžování.

5.2.2 Hardening Soil Model

Model Hardening Soil (HSM) (Obr. 17), nebo jeho varianta zohledňující tuhost při malých přetvořeních (HS Small), představuje pokročilý elasto-plastický model s izotropním zpevněním. (Bentley Systems, 2023).



Obr. 17 Vlevo: Závislost napětí a přetvoření při primárním zatěžování pro standardní odvodněnou triaxiální zkoušku; Vpravo: Definice parametrů E_{oed}^{ref} a E_{ur}^{ref} ve výsledcích edometrické zkoušky (Bentley Systems, 2023)

HSM rozšiřuje klasický hyperbolický model (Duncan & Chang) a jeho hlavní výhodou je schopnost modelovat nelineární závislost tuhosti na úrovni napětí, odlišnou tuhost při primárním zatěžování od tuhosti při odtížení a opětovném přitížení (GOOGLE GEMINI, 2025). Tyto charakteristiky jsou pro geotechnické konstrukce, jako jsou vysoké násypy, kritické.

5.3 Zdůvodnění volby modelu

Pro účely této diplomové práce byl pro podloží zvolen konstitutivní model Hardening Soil (HSM). Toto rozhodnutí je podloženo specifickými geologickými poměry lokality, kde se práce zabývá založením vysokého násypu na tělese dálnice. Podloží je pravděpodobně tvořeno jemnozrnnými zeminami neogenního (terciárního) stáří. Tyto jíly se vyznačují vysokou plasticitou, tuhostí a významnou historií napětí vedoucí k překonsolidaci (GOOGLE GEMINI, 2025; Masopust, 2004). Model HSM je schopen reprodukovat nelineární chování těchto zemin a jejich reakci na změny napětí spojené s výstavbou nového násypu, včetně odlišného chování při primárním zatěžování a odtížení/přitížení. Jeho schopnost zahrnout historii napětí (překonsolidaci) je pro predikci reálných deformací překonsolidovaných jílu klíčová (GOOGLE GEMINI, 2025). Pro modelování konstrukčních prvků je využit konstitutivní model Mohr-Coulomb (MC).

5.4 Stanovení a interpretace parametrů HSM z CPT dat

5.4.1 Charakteristické parametry konstitutivního modelu HS

Model Hardening Soil (HSM) je charakterizován sadou parametrů, které detailně popisují nelineární, napětově závislé a anizotropní chování zemin. Mezi klíčové parametry patří tři různé moduly tuhosti definované při referenčním napětí p_{ref} (standardně 100 kPa), které postihují nelinearitu zeminy v různých fázích zatěžování (GOOGLE GEMINI, 2025):

- *Referenční sečnový modul pružnosti (E_{50}^{ref})*

Tento parametr odpovídá sečnovému modulu pružnosti při mobilizaci 50% maximální smykové pevnosti v drénovaném triaxiálním testu. Fyzikálně řídí velikost přetvoření při primárním smykovém zatěžování.

- *Referenční edometrický modul (E_{oed}^{ref})*

Jedná se o tečný modul při primárním jednorozměrném stlačování (edometrickém testu), který řídí plastické objemové přetvoření a určuje polohu a evoluci tzv. "Cap" (uzávěru) plastické plochy tečení.

- *Referenční modul v odtížení/přetížení (E_{ur}^{ref})*

Reprezentuje tuhost zeminy uvnitř plastické plochy tečení, v oblasti "kvazi-elastického" chování. Tento parametr je zásadní pro překonsolidované jíly, kde se většina deformací řídí touto vysokou tuhostí, pokud nepřekročí historické maximální napětí.

Dále je v modelu zahrnut exponent tuhosti m , který popisuje nárůst tuhosti s rostoucím všesměrným tlakem.

Pro modul E_{ur} platí například vztah (rov. 5.4.1):

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cot \varphi' + \sigma'_3}{c' \cot \varphi' + p_{ref}} \right)^m \quad (\text{rov. 5.4.1})$$

kde σ'_3 je menší hlavní efektivní napětí, efektivní koheze (c') a efektivní úhel vnitřního tření (φ'). Pro tuhé neogenní jíly se hodnota m typicky pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 (GOOGLE GEMINI, 2025). Model rovněž zahrnuje parametry pro smykovou pevnost a parametry dilatance.

5.4.2 Interpretace geotechnických vlastností z dat CPT

Statická penetrační zkouška (CPT) je klíčovou in-situ metodou pro interpretaci geotechnických vlastností zemin. Měří se při ní primárně dvě veličiny: odpor na hrotu (q_c) a plášťové tření (f_s). Odpor na hrotu (q_c) reflektuje

kompresní a smykovou pevnost zeminy, zatímco plášťové tření (f_s) měří smykové napětí na svislé ploše třecí objímky (GOOGLE GEMINI, 2025).

Pro přesnější interpretaci se z těchto hodnot odvozuje korigovaný odpor hrotu (rov.5.4.2):

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (\text{rov. 5.4.2})$$

kde u_2 je pórový tlak a a je plocha (GOOGLE GEMINI, 2025), a třecí poměr (rov.5.4.3):

$$R_f = \left(\frac{f_s}{q_t} \right) \times 100 [\%] \quad (\text{rov. 5.4.3})$$

U vysoce plastických neogenních jílu je R_f typicky vysoký (3% až 6% i více), což je zásadní pro jejich klasifikaci (Robertson a Cabal, 2022). Moderní interpretace využívá index typu chování zeminy (I_c), který integruje q_t a R_f , a umožňuje přesnou klasifikaci zeminy (Robertson a Cabal, 2022). Kombinace těchto měřených veličin je esenciální pro přesnou klasifikaci chování zeminy a následnou volbu korelačních koeficientů pro stanovení parametrů konstitutivních modelů (GOOGLE GEMINI, 2025).

5.4.3 Stanovení předkonsolidačního napětí a poměru překonsolidace

Pro správnou aplikaci modelu Hardening Soil je nezbytné stanovit historii napětí zeminy, reprezentovanou předkonsolidačním napětím (σ'_p) a poměrem překonsolidace (OCR). Předkonsolidační napětí (σ'_p) představuje maximální efektivní vertikální napětí, které zemina v minulosti zažila, a OCR je poměr tohoto napětí k aktuálnímu efektivnímu vertikálnímu napětí (σ'_{v0}) (GOOGLE GEMINI, 2025). Překonsolidace u zemin v lokalitě je způsobena kombinací mechanického odtížení (eroze nadložních vrstev), stárnutí (sekundární komprese a thixotropní zpevnování) a cyklických změn hladiny podzemní vody (GOOGLE GEMINI, 2025). Pro stanovení σ'_p z CPT dat se využívají korelace odvozené z teorie dutinové expanze.

Jednou z často používaných korelací je vztah dle Mayne (Mayne a Kemper, 1988), upravený pro tuhé jíly (rov. 5.4.4):

$$\sigma'_p = k (q_t - \sigma_{v0}) \quad (\text{rov. 5.4.4})$$

kde k je koeficient, pro který se pro tuhé jíly doporučuje hodnota kolem 0,35 (GOOGLE GEMINI, 2025). Stanovení těchto parametrů je kritické, neboť bez jejich správného určení by model HSM predikoval chování zeminy po měkké primární konsolidační křivce namísto po tuhé rekompresní křivce. (Obrzud a Truty, 2018).

5.4.4 Odvození referenčních modulů tuhosti z CPT dat

Stanovení referenčních modulů tuhosti pro Hardening Soil model z CPT dat je založeno na empirických korelacích kalibrovaných na laboratorní zkoušky. Prvním krokem je odvození edometrického modulu in-situ (M), pro který se používá Sangleratův vztah (rov. 5.4.5):

$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{v0}) \quad (\text{rov. 5.4.5})$$

kde α_M je faktor závislý na typu a pevnosti zeminy (Robertson a Cabal, 2022). Hodnota α_M se volí z Tab.1:

Tab. 1 Hodnoty α_M podle odporu hrotu a tření

Typ zeminy (dle CPT)	q_c [MPa]	R_f [%]	Doporučené α_M
Jíl tuhý, vysoce plastický	1,5 – 3,0	3–5	5–6
Jíl pevný, překonsolidovaný	3,0 – 6,0	> 4	6–8
Jíl tvrdý / Slínovec	> 6,0	> 5	8–14

Následně se in-situ edometrický modul (M) převádí na referenční edometrický modul (E_{oed}^{ref}) normalizovaný na referenční tlak $p_{ref} = 100$ [kPa], a to pomocí vztahu (rov. 5.4.6):

$$E_{oed}^{ref} = \frac{M}{\left(\frac{\sigma'_{v0} + c' \cot \varphi'}{p_{ref} + c' \cot \varphi'}\right)^m} \quad (rov. 5.4.6)$$

s exponentem $m = 0,7$ pro daný typ zemin (GOOGLE GEMINI, 2025). Referenční sečnový modul E_{50}^{ref} se pro standardní jíly často uvažuje rovný E_{oed}^{ref} . Modul v odtížení/přetížení E_{ur}^{ref} je pak kritický parametr pro překonsolidované jíly a standardní nastavení v PLAXIS je (Bentley Systems, 2023) (rov. 5.4.7):

$$E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref} \quad (rov. 5.4.7)$$

Pro velmi tuhé neogenní jíly však laboratorní zkoušky a zpětné analýzy naznačují, že poměr může být vyšší, a doporučuje se použít faktor 3 až 5 (Atkinson, 2007).

5.5 Výpočetní postup

Průběh q_c byl v rámci příslušného hloubkového intervalu aproximován lineární regresní funkcí ve tvaru (rov. 5.5.1):

$$q_c(z) = a \cdot z + b \quad (rov. 5.5.1)$$

kde q_c je penetrační odpor hrotu [MPa],

z je hloubka pod terénem [m],

a je směrnice regresní přímky [MPa/m],

b je absolutní člen regresní přímky [MPa].

Parametry regresní přímky byly stanoveny metodou nejmenších čtverců z naměřených hodnot q_c v příslušném hloubkovém intervalu. Reprezentativní hodnota penetračního odporu pro další zpracování byla stanovena odečtením hodnoty z regresní přímky v rozhodné hloubce:

$$q_{c,rep} = q_c = a \cdot z_{ref} + b \quad (rov. 5.5.2)$$

kde z_{ref} je referenční hloubka, odpovídající uvažované úrovni zatížení nebo zakládání konstrukce.

- *Parametry čistého odporu*

Tab. 2 Parametry čistého odporu

Typ zeminy	z_{ref} [m]	$q_{c,\text{rep}}$ [MPa]
Q13	1,0	0,785
Tn2	5,0	2,640

Výpočet in – situ napěťového stavu:

- *Totální vertikální napětí*

$$\sigma_{v0} = z \times \gamma \quad (\text{rov. 5.5.3})$$

kde z je hloubka pod terénem a

γ je průměrná objemová tíha zeminy.

- *Hydrostatický tlak vody*

$$u_0 = \max\{0; (z - h_w) \times \gamma_w\} \quad (\text{rov. 5.5.4})$$

kde h_w je hloubka hladiny podzemní vody a

γ_w je tíha vody (10 kN/m^3).

- *Efektivní vertikální napětí*

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \quad (\text{rov. 5.5.5})$$

Výpočet parametrů napěťové historie:

- Čistý penetrační odpor

$$q_{net} = q_t - \sigma_{v0} \quad (\text{rov. 5.5.6})$$

Uvažujeme $q_t \approx q_c$ v případě absence měření pórového tlaku u_2 .

- Překonsolidační tlak

$$\sigma'_p = k \times q_{net} \quad (\text{rov. 5.5.7})$$

V metodice je pro tuhé jíly stanoven empirický koeficient $k = 0,35$.

- Stupeň překonsolidace (OCR)

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (\text{rov. 5.5.8})$$

- Pre-Overburden Pressure (POP)

$$POP = \sigma'_p - \sigma'_{v0} \quad (\text{rov. 5.5.9})$$

Výpočet parametrů tuhosti:

- Edometrický modul in-situ

$$M = \alpha \times q_c \quad (\text{rov. 5.5.10})$$

- Referenční edometrický modul (zjednodušený)

$$E_{oed}^{ref} = M \times \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,7} \quad (\text{rov. 5.5.11})$$

- Referenční sečnový modul

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} \quad (\text{rov. 5.5.12})$$

- Referenční modul v odtížení/přetížení

$$E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref} \quad (\text{rov. 5.5.13})$$

6 ZÁKLADNÍ VSTUPNÍ GEOTECHNICKÉ PARAMETRY PRO NUMERICKOU ANALÝZU

V tabulkách (Tab. 3 a Tab. 4) jsou prezentovány parametry podloží, přičemž základní parametry zemin byly převzaty z IGP (INSET s.r.o., 2017). Parametry pro stanovení modulů deformace (E) byly získány interpretací z dat penetračních testů CPT, které byly rovněž provedeny společností INSET s.r.o. (2017), konkrétně ze statické penetrace označené SP1097.

Tab. 3 Parametre podloží pro HSM – vrstva Q13 (F6 CL)

Typ zeminy Q13 (F6 CL)			
γ_{sat} [kN/m ³] objemová tíha saturovaná	20	σ_{vo} [kPa] tot vertikální papětí	57
γ_{unsat} [kN/m ³] objemová tíha	19	u_0 [kPa] hydrostat tlak vody	0
γ_w [kN/m ³] objemová tíha	10	σ'_{vo} [kPa] efektivní napětí	57
p^{ref} [kPa] referenční napětí	100	σ'_p [kPa] překonsolidační tlak	275
c' [kPa] efektivní soudržnost	21,5	OCR [-] stupeň překonsolidace	5
φ' [°] úhel vnitřního tření	19,8	M [kPa] edometrický modul	3925
m [-] exponent tuhosti	0,6	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kPa] edometrický modul	5499
k [-]	0,35	E_{50}^{ref} [kPa] sečnový modul	5500
q_c [MPa] čistý odpor	0,785	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kPa] modul odtížení	16500
q_{net} [kPa] čistý odpor	785	POP [kPa]	700
α_M [-]	5	R_f [-] poměr porušení	0,9

Tab. 4 Parametre podloží pro HSM – vrstva Tn2 (F8 CH)

Typ zeminy Tn2 (F8 CH)			
γ_{sat} [kN/m ³] objemová tíha saturovaná	20	σ_{vo} [kPa] tot vertikální papětí	460
γ_{unsat} [kN/m ³] objemová tíha	19	u_0 [kPa] hydrostat tlak vody	230
γ_w [kN/m ³] objemová tíha	10	σ'_{vo} [kPa] efektivní napětí	230
p^{ref} [kPa] referenční napětí	100	σ'_p [kPa] překonsolidační tlak	924
c' [kPa] efektivní soudržnost	20	OCR [-] stupeň překonsolidace	4
φ' [°] úhel vnitřního tření	18	M [kPa] edometrický modul	15840
m [-] exponent tuhosti	0,7	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kPa] edometrický modul	8842
k [-]	0,35	E_{50}^{ref} [kPa] sečnový modul	8800
q_c [MPa] čistý odpor	2,640	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kPa] modul odtížení	26400
q_{net} [kPa] čistý odpor	2640	POP [kPa]	700
α_M [-]	6	R_f [-] poměr porušení	0,9

V tabulce (Tab. 5) jsou uvedeny parametry pro konsolidační a silniční násyp, jejichž hodnoty byly převzaty z technické zprávy (DIPONT s.r.o., 2024).

Tab. 5 Parametre materiálu konstrukcí pro MCM

Typ konstrukce	Konsolidační násyp	Silniční násyp
γ_{unsat} [kN/m ³] objemová tíha	19	19
E_{ref} [kPa] modul tuhosti	15000	15000
ν [-] Poissonovo číslo	0,3	0,3
c_{ref} [kPa] soudržnost	10	10
φ [°] úhel vnitřního tření	27	27

7 VÝPOČETNÍ MODEL KONSOLIDAČNÍHO NÁSYPU

7.1 Základní charakteristiky 2D modelu

Pro účely analýzy byl v softwaru Plaxis 2D vytvořen rovinný model, který pro výpočetní simulace využívá metodu konečných prvků (MKP). Pro diskretizaci byl zvolen 15-uzlový konečný prvek. Detailní specifikace vytvořeného modelu jsou prezentovány v Tab. 6.

Tab. 6 Charakteristiky 2D modelu – Konsolidační násyp

Šířka modelu [m]	Výška modelu [m]	Počet konečných prvků [-]	Počet uzlů [-]
300	72	568	4729

7.2 Fáze výpočtu

V této části jsou zobrazeny převedené fáze výpočtu (viz Tab. 7). Numerická simulace probíhala v rovinném modelu PLAXIS 2D, přičemž jednotlivé fáze byly definovány s ohledem na technologický postup výstavby a nutnost analýzy konsolidace zemního podloží.

Tab. 7 Přehled fází výpočetního modelu – Konsolidační násyp

Fáze	Název	Doba trvání	Typ zatěžování	Typ výpočtu
0	Initial phase	0 dní	Postupná výstavba	K0 procedure
1	Výstavba násypu	120 dní	Postupná výstavba	Consolidation
2	Konsolidace násypu	730 dní	Postupná výstavba	Consolidation
3	Výstavba dálnice	120 dní	Postupná výstavba	Consolidation
4	Konsolidace	1825 dní	Postupná výstavba	Consolidation
5	Konsolidace U=95 %		Stupeň konsolidace	Consolidation

- *Fáze 0: Initial phase*

Tato fáze představuje nultý krok výpočtu a slouží k definici výchozího rovnovážného stavu zemního masivu před zahájením stavebních prací.

- *Fáze 1: Výstavba násypu*

Fáze simuluje výstavbu konsolidačního násypu o výšce 12 m a šířce 91 m po dobu 120 dní. V rámci parametrů řízení bylo nastaveno vynulování deformací, které zajišťuje sledování přírůstků posunů jen pro tuto konkrétní fázi.

- *Fáze 2: Konsolidace násypu*

Tato fáze navazuje na výstavbu násypu a představuje dvouletou technologickou přestávku pro konsolidaci podloží pod vybudovaným násypem.

- *Fáze 3: Výstavba dálnice*

V rámci této fáze je aktivován dálniční násyp o výšce 5 m a šířce 50 m. Současně je provedeno odtěžení přibližně 25 % materiálu konsolidačního násypu, který byl zahrnut v předchozí fázi.

- *Fáze 4: Konsolidace*

Tato fáze simuluje dlouhodobou konsolidaci. Typ výpočtu byl zvolen za účelem sledování časově závislého sedání vyvolaného rozptylem nadbytečných pórových tlaků v podloží po úplném dokončení stavby. Pětiletý interval byl stanoven pro posouzení zbytkového sedání konstrukce v období po uvedení dálnice do provozu, což je klíčové pro zajištění provozní způsobilosti.

- *Fáze 5: Konsolidace $U = 95\%$*

Tato finální konsolidační fáze je zaměřena na dosažení 95% primární konsolidace podloží. Cílem je zjistit čas potřebný k dosažení této míry stabilizace. Důvodem pro volbu 95 % konsolidace je skutečnost, že zbývajících

5 % probíhá asymptoticky velmi dlouho a pro stavební praxi je 95 % považováno za ukončenou primární konsolidaci.

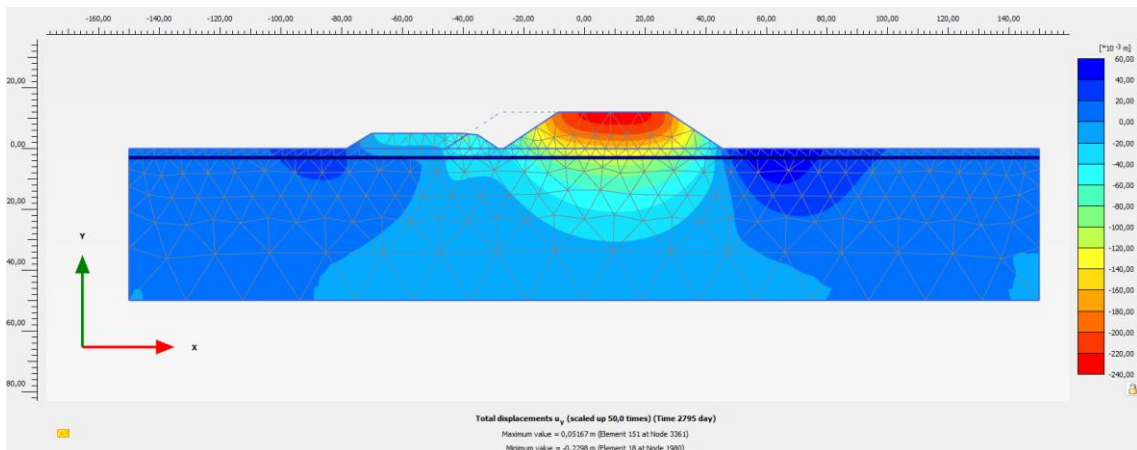
7.3 Analýza výsledků

V předložené tabulce (Tab.8) jsou prezentovány hodnoty sedání (u_y), v charakteristických bodech pod osou konstrukce konsolidačního a dálničního násypu v průběhu jednotlivých fází výstavby a konsolidace. Analyzovány jsou vertikální deformace podloží v závislosti na čase (t).

Tab. 8 Vývoj sedání (u_y) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Konsolidační násyp

Typ konstrukce	Fáze	Název	t [den] celkový čas	u_y [mm] sedání
Konsolidační násyp	4	Konsolidace	2 795	-133,4
	5	Konsolidace U=95 %	45 395	-190,9
Dálniční násyp	4	Konsolidace	2 795	-19,0
	5	Konsolidace U=95 %	45 395	-55,9

Během fáze konsolidace (fáze 4, celkem 2795 dnů, což představuje přibližně 7,6 let) bylo zaznamenáno další narůstání sedání pod oběma konstrukcemi. Pod konsolidačním násypem dosáhla hodnota sedání -133,4 mm. V případě dálničního násypu došlo k přechodu z počátečního vytlačování do fáze sedání, přičemž celkové kumulované sedání v této fázi činilo -19,0 mm. Celkové vertikální posuny pro fázi 4 jsou detailněji znázorněny na Obr. 18.



Obr. 18 Celkové vertikální posuny pro fázi 4 – Konsolidační násyp

Pro dosažení 95 % primární konsolidace podloží byl stanoven celkový čas přibližně 124 let (45395 dnů). V této konečné fázi je předpokládáno kumulované sedání podloží pod osou konsolidačního násypu, který reprezentuje násyp vysokorychlostní trati (VRT), v hodnotě -190,9 mm. Pod osou dálničního násypu bylo pro stejnou fázi prognózováno celkové sedání -55,9 mm. Získané výsledky poukazují na dlouhodobý charakter konsolidačních procesů a vzájemný interakční vliv obou významných dopravních staveb na chování základové půdy.

Vzhledem k zaznamenaným hodnotám sedání a predikované délce trvání primární konsolidace bude v následující kapitole navržena a analyzována soustava zmírňujících opatření.

8 ZAHRNUTÍ OPATŘENÍ DO VÝPOČETNÍHO MODELU

8.1 Vibrované štěrkové pilíře

8.1.1 Metodika výpočtu

V rámci návrhu opatření pro zmírnění vlivu výstavby vysokého násypu byla zohledněna konstrukce štěrkových pilířů pod konsolidačním násypem. Implementace této sanace do numerického 2D modelu byla provedena s respektováním specifik obou prvků i jejich interakce s okolním prostředím.

Modelování štěrkových pilířů v 2D prostředí bylo realizováno kombinací dvou přístupů. Únosnost štěrkových pilířů byla reprezentována pomocí prvků typu „Embedded beam“, které fungují jako jednorozměrné nosníky a efektivně zachycují charakteristiky tuhosti i vliv pilířů na celkovou stabilitu základové půdy. Současně byla funkce drénu, esenciální pro urychlení konsolidace, modelována pomocí liniových prvků s vlastností drénu. Tyto drény byly situovány v polovině rozteče mezi modelovanými prvky „Embedded beam“, což bylo nezbytné z důvodu geometrické a numerické nekompatibility plynoucí z rozdílné dimenzionality a funkčnosti obou typů prvků.

Přijatý modelovací přístup má specifické dopady na interpretaci výsledků. Globální únosnost celého systému je primárně ovlivněna a zachována díky robustnímu zohlednění prvků „Embedded beam“. V otázce finálního sedání se očekává, že výsledky budou poměrně přesné, jelikož konečný stav po konsolidaci je determinován především tuhostí materiálu a není závislý na rychlosti odtoku vody. Časový vývoj konsolidace a s ním spojená rychlost sedání však mohou být touto zjednodušenou reprezentací zkresleny. Tento fakt vyplývá z aproximace prostorového rozmístění drénů v 2D modelu, což ovlivňuje modelovanou cestu vody a její disipaci. Je proto nutné při vyhodnocování rychlosti konsolidace toto metodologické omezení zohlednit.

Konkrétní geometrické a materiálové parametry „Embedded beam“, jako definice štěrkových pilířů v numerickém modelu, jsou uvedeny v Tab. 9

Tab. 9 Parametre "Embedded beam" pro 2D model

Typ konstrukce	Štěrkový pilíř (embedded beam)
γ [kN/m ³] objemová tíha	19
L_{spacing} [m] rozteč	2,0
\varnothing [m] průměr	0,8
E [kPa] modul tuhosti	100 000
$T_{\text{skin,start,max}}$ [kN/m] plášťové tření na začátku (horním konci)	206
$T_{\text{skin,end,max}}$ [kN/m] plášťové tření na konci (dolním konci)	341
F_{max} [kN] odpor na patě	500

8.1.2 Základní charakteristiky 2D modelu

Pro účely výpočetních simulací byl v softwarovém prostředí Plaxis 2D vyvinut rovinný model, jehož základem je MKP. Diskretizace modelovaného kontinua byla provedena s využitím 15-uzlového konečného prvku. Podrobné specifikace tohoto numerického modelu jsou k dispozici v Tab. 10.

Tab. 10 Charakteristiky 2D modelu – Vibrovaný štěrkový pilíř

Šířka modelu [m]	Výška modelu [m]	Počet konečných prvků [-]	Počet uzlů [-]
300	72	4183	35930

8.1.3 Fáze výpočtu

V této části jsou zobrazeny převedené fáze výpočtu (viz Tab. 11), které byly převzaty z výpočetního modelu konsolidačního násypu (kapitola 7.2) s doplněním fáze Štěrkové pilíře.

Tab. 11 Přehled fází výpočetního modelu – Vibrované štěrkové pilíře

Fáze	Název	Doba trvání	Typ zatěžování	Typ výpočtu
0	Initial phase	0 dní	Postupná výstavba	KO procedure
1	Štěrkové pilíře	0 dní	Postupná výstavba	Plastic
2	Výstavba násypu	120 dní	Postupná výstavba	Consolidation
3	Konsolidace násypu	730 dní	Postupná výstavba	Consolidation
4	Výstavba dálnice	120 dní	Postupná výstavba	Consolidation
5	Konsolidace	1825 dní	Postupná výstavba	Consolidation
6	Konsolidace U=95 %		Stupeň konsolidace	Consolidation

8.2 Injektážní clona

8.2.1 Metodika výpočtu

Jako druhé opatření, navržené pro zmírnění vlivu výstavby vysokého násypu VRT na těleso dálnice, byla ve výpočetním modelu zohledněna realizace podzemní clony z tryskové injektáže.

Koncepce tohoto opatření se lišila od předchozích modelů ve specifickém sledu výstavby. Nejprve bude dokončena výstavba stávající dálnice. Následně, ve vzdálenosti přibližně 35 metrů od osy dálnice, bude vybudována podzemní stěna (clona) z tryskové injektáže, která bude orientována rovnoběžně s osou dálnice. Teprve po dokončení a prověření funkčnosti injektované clony bude zahájena samotná výstavba vysokého násypu VRT. Implementace této clony má za cíl vytvořit bariéru omezující přenos dodatečných napětí a deformací do tělesa dálnice.

Ve výpočetním modelu byla trysková injektáž vykreslena pomocí polygonu. K bočním okrajům a patě injektované clony byly přiřazeny kontaktní prvky typu Negative interface. Jejich použití je klíčové pro správné modelování interakce mezi tuhou konstrukcí a okolní zeminou, neboť umožňuje, aby se těleso injektáže chovalo jako samostatný, relativně tuhý

blok v podloží. Pro účely modelování rozhraní byly vytvořeny kopie materiálových modelů podloží (označených jako Q13 a Tn2). U těchto kopií byla následně změněna redukce pevnosti (R_{inter}) a tyto modifikované materiály byly přiřazeny k příslušným kontaktním prvkům.

Konkrétní geometrické a materiálové parametry tryskové injektáže jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Parametre clony (tryskové injektáže) pro 2D model

Typ konstrukce	Clona (trysková injektáž)
γ_{unsat} [kN/m ³] objemová tíha	21
E_{ref} [kPa] referenční modul tuhosti	1 000
R_{inter} [kPa] referenční modul tuhosti	0,5
\varnothing [m] průměr	0,4
L [m] délka	15

8.2.2 Základní charakteristiky 2D modelu

Numerické simulace byly realizovány v programu Plaxis 2D, kde byl sestaven rovinný model s aplikací MKP. K diskretizaci výpočetní domény byl zvolen 15-uzlový konečný prvek. Detailní technické parametry a konfigurace tohoto modelu jsou prezentovány v Tab. 13.

Tab. 13 Charakteristiky 2D modelu – Clona z tryskové injektáže

Šířka modelu [m]	Výška modelu [m]	Počet konečných prvků [-]	Počet uzlů [-]
300	72	1158	9602

8.2.3 Fáze výpočtu

V této části jsou zobrazeny převedené fáze výpočtu, které byly aplikovány v numerickém modelu s clonou z tryskové injektáže (viz Tab. 14). Nastavení jednotlivých fází výpočtu zůstalo shodné s parametry použitými v kapitole 7.2. Odlišnost spočívá v pozměněném pořadí těchto fází a v přidání nové specifické fáze, která zahrnuje zhotovení tryskové injektáže.

Tab. 14 Přehled fází výpočetního modelu – Injektážní clona

Fáze	Název	Doba trvání	Typ zatěžování	Typ výpočtu
0	Initial phase	0 dní	Postupná výstavba	KO procedure
1	Výstavba dálnice	120 dní	Postupná výstavba	Plastic
2	Zhotovení clony	0 dní	Postupná výstavba	Plastic
3	Výstavba násypu VRT	120 dní	Postupná výstavba	Consolidation
4	Konsolidace	1825 dní	Postupná výstavba	Consolidation
5	Konsolidace U=95 %		Stupeň konsolidace	Consolidation

8.3 Analýza výsledků

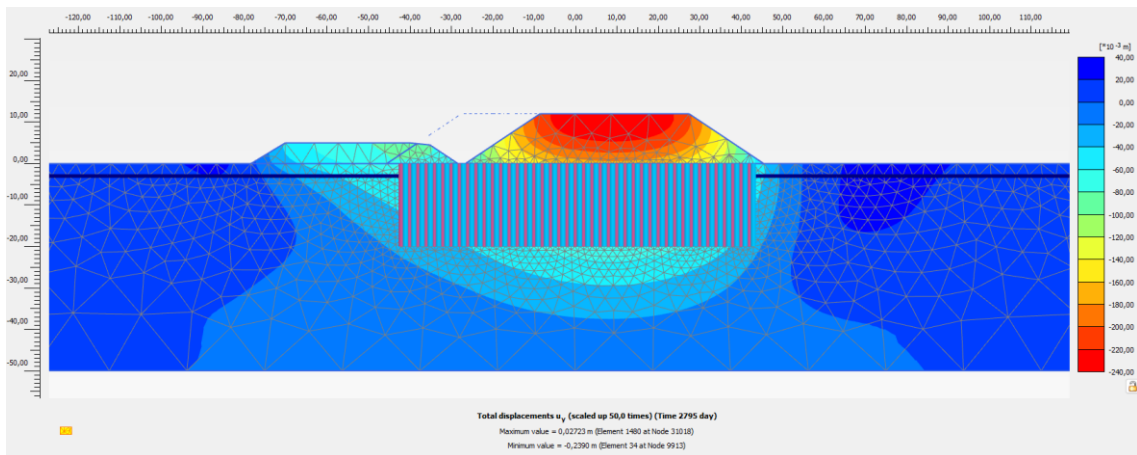
8.3.1 Vibrované štěrkové pilíře

Vliv navrhovaného opatření, spočívajícího ve výstavbě štěrkových pilířů pod konsolidačním násypem, na sedání těles násypů v závislosti na čase je prezentován v Tab. 15. Tabulka detailně zobrazuje hodnoty vertikálního sedání (u_y) pro konsolidační násyp a dálniční násyp v různých fázích konsolidace.

Tab. 15 Vývoj sedání (u_y) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Vibrované štěrkové pilíře

Typ konstrukce	Fáze	Název	t [den] celkový čas	u_y [mm] sedání
Konsolidační násyp	5	Konsolidace	2 795	-161,2
	6	Konsolidace U=95 %	18 185	-185,5
Dálniční násyp	5	Konsolidace	2 795	-24,9
	6	Konsolidace U=95 %	18 185	-48,4

Pro konsolidační násyp bylo v páté fázi, po uplynutí celkového času 2795 dnů, zaznamenáno sedání o hodnotě -161,2 mm. Dosažení 95% konsolidace (fáze 6) si vyžádalo celkový čas 18185 dnů (přibližně 50 let), přičemž výsledné sedání dosáhlo hodnoty -185,5 mm. Celkové vertikální posuny pro fázi 5 jsou detailněji znázorněny na Obr.19.



Obr. 19 Celkové vertikální posuny pro fázi 5 – Vibrované štěrkové pilíře

V případě dálničního násypu bylo ve fázi pět zjištěno sedání -24,9 mm. Stejně jako u konsolidačního násypu. Konečné sedání ($t = 18185$ dní) dálničního násypu dosáhlo -48,4 mm.

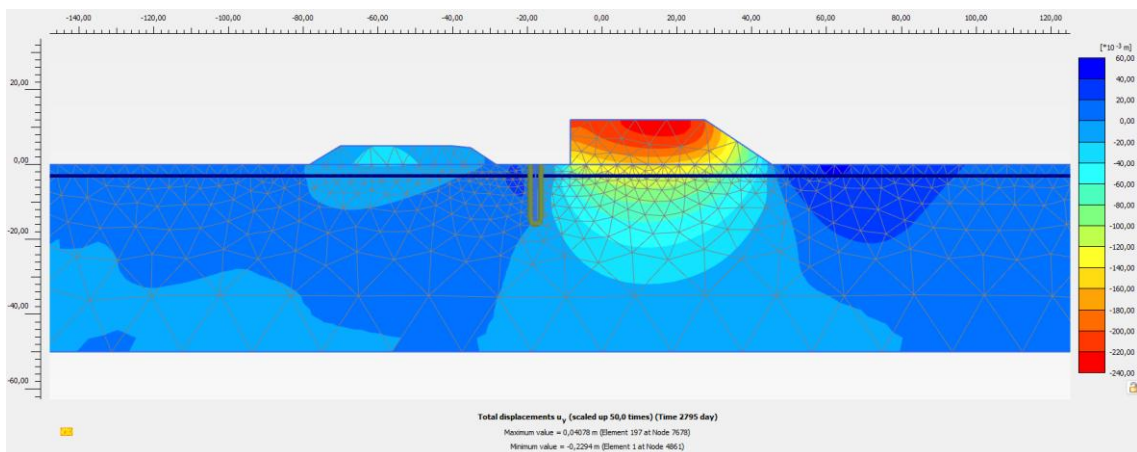
8.3.2 Injektážní clona

Vliv navrhovaného opatření, spočívajícího v aplikaci injektážní clony, na vertikální sedání těles násypů v závislosti na čase je detailně prezentován v Tab. 16. Tato tabulka zobrazuje hodnoty sedání (u_y) pro násyp vysokorychlostní trati (VRT) a dálniční násyp v klíčových fázích konsolidace.

Tab. 16 Vývoj sedání (u_y) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Injektážní clona

Typ konstrukce	Fáze	Název	t [den] celkový čas	u_y [mm] sedání
Násyp VRT	4	Konsolidace	2 795	-149,8
	5	Konsolidace U=95 %	48 535	-200,2
Dálniční násyp	4	Konsolidace	2 795	-18,2
	5	Konsolidace U=95 %	48 535	-47,4

Pro násyp VRT bylo ve čtvrté fázi, po uplynutí celkového času 2795 dnů, zaznamenáno sedání o hodnotě -149,8 mm. Dosažení 95% stupně konsolidace (fáze 5) vyžadovalo celkový čas 48535 dnů (přibližně 133 let), přičemž výsledné sedání dosáhlo hodnoty -200,2 mm. Celkové vertikální posuny pro fázi 5 jsou detailněji znázorněny na Obr. 20.



Obr. 20 Celkové vertikální posuny pro fázi 4 – Injektážní clona

V případě dálničního násypu bylo ve čtvrté fázi ($t = 2795$ dnů) zjištěno sedání -18,2 mm. Pro dosažení 95% konsolidace (fáze 5) konečné sedání dálničního násypu po této době ($t = 48535$ dnů) dosáhlo -47,4 mm. Z uvedených dat je zřejmé, že konsolidace obou násypů s aplikovanou injektážní clonou probíhá ve velmi dlouhém časovém horizontu, přesahujícím 130 let pro dosažení 95% stupně konsolidace.

9 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Cílem této kapitoly je komparativní analýza vlivu navržených opatření na vertikální sedání násypů a dobu konsolidace, srovnávající výchozí stav bez jakýchkoli opatření s variantami zahrnujícími vibrované štěrkové pilíře a injektážní clonu. Hodnocení se zaměřuje na kumulované sedání pod osou násypu vysokorychlostní trati (VRT) a dálničního násypu, a dále na čas potřebný k dosažení 95% primární konsolidace podloží.

Ve výchozím stavu, bez aplikace zmírňujících opatření, bylo pro násyp VRT prognózováno kumulované sedání ve výši -190,9 mm, přičemž k dosažení 95% konsolidace bylo zapotřebí přibližně 45395 dnů (tj. cca 124 let). Pro dálniční násyp bylo za stejných podmínek predikováno sedání -55,9 mm s identickou dobou konsolidace.

Aplikace vibrovaných štěrkových pilířů pod konsolidačním násypem přinesla zřetelné změny v časovém průběhu i konečných hodnotách sedání. Sedání konsolidačního násypu (reprezentujícího násyp VRT) se mírně snížilo na -185,5 mm. Klíčovým přínosem však bylo výrazné zkrácení doby potřebné k dosažení 95% konsolidace na 18185 dnů (přibližně 50 let). V případě dálničního násypu došlo ke snížení sedání na -48,4 mm při shodném časovém horizontu konsolidace. Z těchto dat vyplývá, že vibrované štěrkové pilíře efektivně urychlují konsolidaci a částečně snižují konečné sedání obou konstrukcí.

Naopak řešení s injektážní clonou vykazovalo odlišné tendence. Sedání násypu VRT se mírně zvýšilo na -200,2 mm. Nejvýraznější odlišnost spočívá v prodloužení doby potřebné k dosažení 95% konsolidace, a to na 48535 dnů (přibližně 133 let). U dálničního násypu došlo ke snížení sedání na -47,4 mm, což představuje nepatrně lepší výsledek než u vibrovaných štěrkových pilířů, ovšem za cenu delší doby konsolidace. Lze konstatovat, že injektážní clona nezrychluje konsolidační proces, v daném modelování jej spíše zpomaluje, ale efektivněji snižuje sedání dálničního násypu ve srovnání s výchozím stavem.

Souhrnně lze konstatovat, že vibrované štěrkové pilíře představují účinné opatření pro akceleraci konsolidace podloží, čímž výrazně zkracují celkovou dobu potřebnou pro stabilizaci násypů z původních 124 let na 50 let. Současně dochází k mírnému snížení konečného sedání obou konstrukcí. Injektážní clona sice vede k nepatrnému snížení sedání dálničního násypu a mírně ovlivňuje sedání násypu VRT, avšak za cenu prodloužení doby konsolidace na 133 let.

Z hlediska stavební praxe a nutnosti rychlé stabilizace je řešení s vibrovanými štěrkovými pilíři výhodnější z časového hlediska, zatímco injektážní clona může být preferována v případech, kde je prioritou maximální snížení sedání sousední dálnice, i přes prodloužení konsolidačního období.

10 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se komplexně zabývala analýzou vlivu výstavby vysokého násypu vysokorychlostní železniční trati (VRT) na těleso stávající dálnice v místě jejich křížení a návrhem adekvátních geotechnických opatření. Hlavním cílem práce bylo stanovení rozsahu a velikosti vlivu násypu VRT na stávající infrastrukturu, návrh a analýza opatření pro zmírnění těchto vlivů a vypracování návrhu monitoringu.

V teoretické části práce byla popsána problematika dané lokality, včetně jejích specifických inženýrskogeologických poměrů, charakterizovaných jemnozrnnými zeminami neogenního stáří s vysokou plasticitou a stlačitelností. Byla provedena rešerše stávajících technických řešení pro založení vysokých násypů a zmírnění jejich negativních vlivů, zahrnující opatření v základové spáře (plošné vyztužení, šterkové pilíře, stabilizace pojivem), úpravy konstrukce tělesa násypu (vrstevnaté vyztužování, lehčené násypy) a odvodňovací a sanační systémy (patní a vertikální drény). Důraz byl kladen na geotechnický monitoring jako nezbytnou součást zajištění stability konstrukcí.

Praktická část práce byla zaměřena na numerické modelování interakce násypů s využitím softwaru Plaxis 2D a metody konečných prvků. Pro modelování zemního podloží byl zvolen konstitutivní model Hardening Soil (HSM), reflektující nelineární chování a historii napětí přítomných jíílů. Konstrukční prvky násypů byly modelovány pomocí Mohr-Coulombova modelu (MCM).

Z analýzy výchozího stavu, bez aplikace jakýchkoliv zmírňujících opatření, bylo zjištěno kumulované sedání pod osou násypu VRT ve výši -190,9 mm. Sedání dálničního násypu dosáhlo -55,9 mm. Dosažení 95% primární konsolidace podloží bylo predikováno za přibližně 124 let (45 395 dní). Tyto výsledky jednoznačně poukázaly na nutnost aplikace geotechnických opatření.

V rámci návrhu zmírňujících opatření byly analyzovány dvě varianty: vibrované šterkové pilíře a injektážní clona.

Aplikace vibrovaných štěrkových pilířů pod konsolidačním násypem prokázala výrazné zkrácení doby konsolidace. Dosažení 95% konsolidace bylo předpovězeno za přibližně 50 let (18 185 dní). Kumulované sedání násypu VRT se mírně snížilo na -185,5 mm a sedání dálničního násypu na -48,4 mm.

Variantní řešení s injektážní clonou vykázalo odlišné tendence. Sedání násypu VRT se mírně zvýšilo na -200,2 mm. Doba potřebná k dosažení 95% konsolidace se v tomto případě prodloužila na přibližně 133 let (48 535 dní). Sedání dálničního násypu se snížilo na -47,4 mm.

Komparativní analýza výsledků ukázala, že vibrované štěrkové pilíře představují účinné opatření především pro akceleraci konsolidace podloží, čímž výrazně zkracují celkovou dobu stabilizace násypů a mají pozitivní vliv na snížení finálních sedání. Injektážní clona se jeví jako efektivní pro snížení sedání dálničního násypu, avšak za cenu prodloužení konsolidačního období, což v kontextu časových nároků výstavby vysokorychlostních tratí může být limitující.

Celkově práce poskytuje detailní analýzu a komplexní návrh založení vysokého násypu VRT s ohledem na interakci se stávající dálniční infrastrukturou. Získané poznatky jsou cenným příspěvkem pro další fáze projektování a realizace obdobně náročných geotechnických staveb.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ASB PORTÁL, c2024. *Zakládání staveb: Vyztužení báze násypů*. [online]. Jaga Media. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/geotechnika/zakladani-staveb-vyztuzeni-baze-nasypu>. [cit. 2026-01-04].

ATKINSON, John, 2007. *The Mechanics of Soils and Foundations*. Second Edition. London: Taylor & Francis. ISBN 978-0-415-36256-6.

BENTLEY SYSTEMS, 2023. *PLAXIS 2D: Material Models Manual*. [online]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/>. [cit. 2026-01-15].

BUZGÓOVÁ, Ivana, 2023. *Poruchy násypových těles železničního spodku spojené s jejich postupným rozšiřováním*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.

ČGS, c2026. *Geologická mapa 1 : 50 000. Geovědní mapy 1 : 50 000*. [online]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>. [cit. 2026-01-06].

ČÚZK, c2026. *Nahlížení do KN*. [online]. Dostupné z: <https://sgi-nahlizenidokn.cuzk.gov.cz/marushka/default.aspx?themeid=3&MarMiddlePoint=-538478.4915846796%20-1135601.3781990013&MarScale=14288&MarUid=1A477E15%20541088B3%2062CEA7EE%2074DB2C4C%20911E3E5F%20B62615DB%20C9DD086C%20CA9E039A%20E576B101&MarUidi=28BB42BB%209275DE84>. [cit. 2026-01-06].

DIPONT S.R.O., 2024. *KONSOLIDAČNÍ NÁSYP: Technická zpráva. Projektant Ing. Jan GREPL: Konsolidační opatření křížení D55 5502 Kokory - Přerov s plánovanou VRT*.

GOOGLE GEMINI, 2025. *Metodika derivace parametrů konstitutivního modelu Hardening Soil z výsledků statické penetrace (CPT) pro terciární překonsolidované jíly*. [online]. Dostupné z: <https://gemini.google.com/share/2f28d13943b4>. [cit. 2026-01-13].

HSI, Jeff a MARTIN, James, 2015. *Soft Ground Treatment and Performance, Yelgun to Chinderah Freeway, New South Wales, Australia*. In: ScienceDirect [online]. Amsterdam: Elsevier. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/embankment-settlement>. [cit. 2026-01-04].

INSET S.R.O., 2017. *D55 5502 Kokory - Přerov: Podrobný geotechnický průzkum*. Brno.

JAMAL, Haseeb, 2017. *Phreatic Line and Horizontal Drain In Earth Fill Dams*. [online]. AboutCivil.Org. Dostupné z: <https://www.aboutcivil.org/phreatic-line-horizontal-drain-earth-fill-dams.html>. [cit. 2026-01-04].

KELLER, c2026a. *Vybrované štěrkové pilíře*. [online]. Keller - speciální zakládání, spol. Dostupné z: <https://www.keller-cz.com/odbornost/technologie/vibrované-sterkove-pilire>. [cit. 2026-01-04].

KELLER, c2026b. *Deep Soil Mixing*. [online]. Keller - speciální zakládání, spol. Dostupné z: <https://www.keller-cz.com/odbornost/technologie/deep-soil-mixing-dsm-suchy-proces> <https://www.keller-cz.com/odbornost/technologie/deep-soil-mixing-dsm-mokry-proces>. [cit. 2026-01-04].

KELLER, c2026c. *Vertikální prefabrikované drény*. [online]. Keller - speciální zakládání, spol. Dostupné z: <https://www.keller-cz.com/odbornost/technologie/vertikalni-prefabrikovane-dreny>. [cit. 2026-01-04].

MARCHESE GROUP, c2026. *Pali in ghiaia (Štěrkové pilíře)*. [online]. Dostupné z: <https://www.gruppomarchese.com/tecnologie/pali-in-ghiaia/>. [cit. 2026-01-07].

MASOPUST, Jan, 2004. *Speciální zakládání staveb: 1. díl*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2770-1.

MIČA, Lumír, 2021. *Zemní konstrukce (se zaměřením na dopravní stavby)*. Vysokoškolský učební text (skripta). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, odbor infrastruktury, 2008. *TP 198: Vylehčené násypy pozemních komunikací: Technické podmínky*. Praha: Stavební geologie GEOTECHNIKA.

MOSELEY, M. P. a KIRSCH, K. (ed.), 2004. *Ground Improvement*. 2nd ed. London: Taylor & Francis. ISBN 0-415-27455-9.

NOVÁK, Marek, 2022. *Konsolidace násypů*. Bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební.

OBRZUD, Rafał F. a TRUTY, Andrzej, 2018. *The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook: Z_Soil.PC 100701 report*. [online]. Zace Services. Dostupné z: <http://www.zsoil.com/>. [cit. 2026-01-15].

ROBERTSON, Peter K. a CABAL, Kelly L., 2022. *Guide to Cone Penetration Testing: for Geotechnical Engineering*. [online]. 7. edice. California: Gregg Drilling: Signal Hill. Dostupné z: <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CPT-Guide-7th-Final-SMALL.pdf>. [cit. 2026-01-16].

ÚNMZ, Únor 2010. ČSN 73 6133, *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

VANKO, Peter, 2015. *Štěrkové pilíře - význam klenbového efektu*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.

WOLDRINGH, R.F. a NEW, B.M., 1999. Embankment design for high speed trains on soft soils. In: BARENDS, et al. (ed.). *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*. Rotterdam: Balkema. ISBN 90 5809 047 7.

ZAKLÁDÁNÍ STAVEB, A. S., c2026. *Vibroflotace - Provádění štěrkových pilířů*. [online]. Praha: Zakládání staveb. Dostupné z: <https://zakladani.cz/cs/vyrobni-program/technologie/vibroflotace-3>. [cit. 2026-01-04].

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Katastrální mapa k. ú. Rokytnice u Přerova a Luková u Přerova – výřez M1:10 000 (ČÚZK, c2026).....	10
Obr. 2 Půdorys dálnice D55 v místě křížení násypu VRT (DIPONT s.r.o., 2024)	11
Obr. 3 Podélný řez osou násypu VRT (DIPONT s.r.o., 2024)	12
Obr. 4 Geologická mapa zájmové oblasti (ČGS, c2026)	15
Obr. 5 Vyztužení báze násypu (ASB Portál, c2024).....	17
Obr. 6 Vyztužení báze násypu výztužnou matrací (ASB Portál, c2024).....	18
Obr. 7 Provádění štěrkových pilířů s plněním štěrku k ústí vpichu (Zakládání staveb, a. s., c2026)	19
Obr. 8 Provádění štěrkových pilířů s plněním štěrku ke špici jehly (Zakládání staveb, a. s., c2026)	20
Obr. 9 Štěrkové pilíře systémem Franki (Marchese Group, c2026)	21
Obr. 10 Deep Mixing (Keller, c2026b)	22
Obr. 11 Vyztužení násypu (ÚNMZ, Únor 2010)	23
Obr. 12 Příčný řez násypem vylehčeného pomocí bloků z EPS (Ministerstvo dopravy ČR, 2008)	24
Obr. 13 Plošný drén (Jamal, 2017)	24
Obr. 14 Prefabrikovaný vertikální drén (Keller, c2026c).....	25
Obr. 15 Monitorovací vybavení násypu (Hsi a Martin, 2015)	26
Obr. 16 Lineárně-elastický ideálně-plastický model (Bentley Systems, 2023).....	30
Obr. 17 Vlevo: Závislost napětí a přetvoření při primárním zatěžování pro standardní odvodněnou triaxiální zkoušku; Vpravo: Definice parametrů <i>Eoedrefa Eurref</i> ve výsledcích edometrické zkoušky (Bentley Systems, 2023)	30
Obr. 18 Celkové vertikální posuny pro fázi 4 – Konsolidační násyp	43
Obr. 19 Celkové vertikální posuny pro fázi 5 – Vibrované štěrkové pilíře.....	50
Obr. 20 Celkové vertikální posuny pro fázi 4 – Injektážní clona.....	51

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty αM podle odporu hrotu a tření.....	34
Tab. 2 Parametry čistého odporu.....	36
Tab. 3 Parametre podloží pro HSM – vrstva Q13 (F6 CL)	38
Tab. 4 Parametre podloží pro HSM – vrstva Tn2 (F8 CH)	39
Tab. 5 Parametre materiálu konstrukcí pro MCM.....	40
Tab. 6 Charakteristiky 2D modelu – Konsolidační násyp	41
Tab. 7 Přehled fází výpočetního modelu – Konsolidační násyp	41
Tab. 8 Vývoj sedání (uy) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Konsolidační násyp	43
Tab. 9 Parametre "Embedded beam" pro 2D model	46
Tab. 10 Charakteristiky 2D modelu – Vibrovaný štěrkový pilíř	46
Tab. 11 Přehled fází výpočetního modelu – Vibrované štěrkové pilíře.....	47
Tab. 12 Parametre clony (tryskové injektáže) pro 2D model	48
Tab. 13 Charakteristiky 2D modelu – Clona z tryskové injektáže.....	48
Tab. 14 Přehled fází výpočetního modelu – Injektážní clona.....	49
Tab. 15 Vývoj sedání (uy) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Vibrované štěrkové pilíře	49
Tab. 16 Vývoj sedání (uy) v čase (t) v jednotlivých fázích výstavby – Injektážní clona...	50