

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA GEOTECHNIKY



STABILIZACE ZEMIN V ZEMNÍCH KONSTRUKCÍCH

DOPRAVNÍCH STAVEB

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Pavol Časnocha

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Daniel Jirásko, Ph.D.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF GEOTECHNICS



**SOIL STABILIZATION FOR EARTH STRUCTURES OF
TRANSPORT ENGINEERING**

BACHELOR THESIS

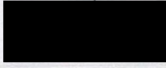

AUTHOR: Pavol Časnocha
SUPERVISOR: Ing. Daniel Jirásko, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE


I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Časnocha	Jméno: Pavol	Osobní číslo: 462000
Zadávací katedra: Katedra geotechniky		
Studijní program: (B3651) Stavební inženýrství		
Studijní obor: (3647R013) Konstrukce a dopravní stavby		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Stabilizace zemin v zemních konstrukcích dopravních staveb	
Název bakalářské práce anglicky: Soil stabilization for earth structures of transport engineering	
Pokyny pro vypracování: Proveďte rešerši možných způsobů zlepšování základových zemin a porovnání vhodností jejich uplatnění při budování zemních konstrukcí. Do práce zahrňte dostupnou vědeckou literaturu včetně normativních a jiných předpisů týkajících se stabilizace zemin. Pozornost věnujte druhům pojmů, technologií, provádění a zkoušení.	
Seznam doporučené literatury: Turček, J. 2005. Zakládání staveb. Jaga group. 314 s. ISBN: 80-8076-023-3 Vrbová, E. 2008. Stabilizace zemin. Praha. Diplomová práce. ČVUT, FSV, Katedra geotechniky	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Daniel Jirásko, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 13.4.2020	Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2020
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
 Podpis vedoucího práce	 /Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
17.4.2020 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci s názvem Stabilizace zemin v zemních konstrukcích dopravních staveb vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Daniela Jiráska, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů. Veškeré zdroje, které byly použity k tvorbě této práce jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 24.5.2020

.....
Pavol Časnocha

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Danielu Jiráskovi, Ph.D. a prof. Ing. Ivanu Vaníčkovi, DrSc. za pomoc při zpracování této práce, poskytnutí potřebných informací a materiálů.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lucii Dostalíkové za jazykovou korekturu práce.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval mé rodině za podporu během studia.

Abstrakt

Zlepšování základových zemin je jedním z významných úkonů ve stavitelském odvětví. V dnešní době již existuje celá řada možností, jak zeminy zlepšovat. Jedny z nejvýznamnějších a nejzákladnějších metod jsou například hutnění, vyztužování geosyntetikou nebo zlepšování zemin pojivy. Tyto metody se od sebe odlišují nejen provedením a samotným použitím u dané stavby, ale také například finanční náročností. Jako jedna z ekologičtějších a v praxi používaných metod zlepšování zemin se jeví například metoda stabilizace zemin, protože má potenciál využívat druhotné suroviny z energetické a metalurgické výroby. Pro urychlení konsolidace podloží, a tedy snížení vlhkosti v zemině, lze použít například metodu svislých geodrénu. Výhodami tohoto systému odvodňování jsou rychlá instalace, nízká cena a také minimální porušení zeminy. Cílem této práce bylo popsat základní a nejčastěji používané metody zlepšování základových zemin a ukázat jejich reálné využití v praxi. V početní části bylo navrženo a posouzeno armované násypové těleso, které bylo vyztuženo geosyntetikou. V druhém výpočtu bylo analyzováno celkové sedání silničního násypového tělesa a navržení svislých geodrénu.

Klíčová slova: Pojiva, stabilizace zemin, vyztužování, zhutňování, zlepšování zemin

Abstract

The improvement of foundation soils is one of the most important tasks in the construction industry. Today, there are already a number of ways how to improve soils. Some of the most important and basic methods are, for example, compaction, reinforcement with geosynthetics or soil improvement with binders. These methods differ from each other not only in the design and use of the construction, but also, for example, in financial demands. One of the more environmentally friendly methods of soil improvement, that is also used in praxis, appears to be the method of soil stabilization, because it has the potential to use the secondary raw materials from energy and metallurgical production. The method of vertical geo-drains can be used to accelerate the consolidation of the subsoil, and thus reduce the moisture in the soil. The advantages of this drainage system are fast installation, low cost and also minimal soil damage. The aim of this thesis was to describe the basic and most commonly used methods of improving foundation soils and to show their real use in practice. In the practical part, a reinforced embankment body was designed and assessed, which was reinforced with geosynthetics. In the second calculation, the total settlement of the road embankment and the design of vertical geo-drains were analysed.

Keywords: Binders, compaction, soil improvement, soil stabilization reinforcement

Obsah

1	Úvod a cíle	1
2	Rešerše	2
2.1	Zlepšování základové půdy.....	2
2.2	Zhutňování zemin.....	3
2.2.1	Metody zhutňování.....	3
2.2.1.1	Přetížení násypem	4
2.2.1.2	Válcování.....	4
2.2.1.3	Pěchovadla.....	7
2.2.1.4	Dynamická konsolidace	8
2.2.1.5	Hlubková vibrace (vibroflotace)	9
2.2.1.6	Hydromechanické zhutňování (prolévání vodou)	11
2.2.1.7	Zhutňování odstřelem.....	11
2.3	Výměna základové půdy	12
2.3.1	Podsyp	13
2.3.2	Plomba.....	13
2.3.3	Polštář	13
2.3.3.1	Roznášecí polštáře	13
2.3.3.2	Vyrovnávací polštáře.....	14
2.4	Injektování.....	14
2.5	Snižování vlhkosti	17
2.5.1	Vertikální drény.....	17
2.5.1.1	Pískové pilíře.....	18
2.5.1.2	Šterkové pilíře	18
2.5.1.3	Geodrény	19
2.5.2	Elektroosmóza	20
2.5.3	Vápenné piloty	20

2.6	Zmrazování zemin.....	20
2.7	Vypalování zemin	22
2.8	Vyztužování zemin.....	24
2.8.1	Mikrovyztužování	24
2.8.2	Makrovyztužování.....	25
2.9	Stabilizace zemin	26
2.9.1	Stabilizace jinou zeminou	27
2.9.2	Stabilizace hydraulickými pojivy	28
2.9.2.1	Vápno	31
2.9.2.2	Cement.....	39
2.9.2.3	Směsná pojiva.....	40
2.9.2.4	Silniční hydraulická pojiva.....	42
2.9.2.5	Druhotné materiály.....	43
2.9.3	Průkazní a kontrolní zkoušky	51
2.9.3.1	Průkazní zkoušky	51
2.9.3.2	Kontrolní zkoušky	53
3	Početní část.....	56
3.1	Návrh a statický výpočet armovaného násypu.....	56
3.1.1	Úvod do početní části	56
3.1.2	Podklady pro návrh a posouzení	56
3.1.2.1	Projektové podklady.....	56
3.1.2.2	Normy a předpisy	56
3.1.3	Softwarová podpora	57
3.1.4	Vstupní parametry	57
3.1.4.1	Geometrie konstrukce.....	57
3.1.4.2	Výztužné geomříže.....	58
3.1.4.3	Interakce mezi zeminou a výztuhou.....	58

3.1.4.4	Parametry zemin v podloží.....	58
3.1.4.5	Zazubení	60
3.1.4.6	Parametry násypového tělesa	60
3.1.4.7	Podzemní voda	60
3.1.4.8	Zatížení od dopravy.....	60
3.1.4.9	Přírodní seismičita.....	60
3.1.4.10	Návrhový přístup.....	60
3.1.5	Návrh vyztužení tělesa	61
3.1.6	Posouzení návrhu programem GEO5.....	61
3.1.7	Závěr početní části 1.....	65
3.2	Urychlení konsolidace silničního náspu.....	66
3.2.1	Úvod do početní části	66
3.2.2	Podklady pro návrh	66
3.2.2.1	Projektové podklady.....	66
3.2.3	Geotechnické poměry	66
3.2.4	Vstupní parametry	66
3.2.4.1	Geometrie násypového tělesa.....	66
3.2.4.2	Vertikální geodrény	67
3.2.4.3	Materiály násypu	67
3.2.4.4	Podloží násypu	67
3.2.4.5	Hladina podzemní vody.....	68
3.2.5	Výpočty	68
3.2.5.1	Výpočet celkového sedání.....	68
3.2.5.2	Výpočet časového průběhu sedání	69
3.2.5.3	Urychlení konsolidace.....	70
3.2.6	Závěr početní části 2.....	72
4	Závěr.....	73

Přehled použité literatury	74
Seznam norem a technických podmínek.....	78

Seznam obrázků

Obrázek 1. Hutnění válcem s hladkým běhounem	5
Obrázek 2. Ruční hutnicí vybavení (žába).....	8
Obrázek 3. Princip dynamického hutnění.....	9
Obrázek 4. Hranice použitelnosti hloubkové vibrace.....	10
Obrázek 5. Hydraulický ponorný vibrátor.....	11
Obrázek 6. Princip zhutnění zeminy v okolí náloží.....	12
Obrázek 7. Manžetová trubka z plastu]	15
Obrázek 8. Schéma technologie provádění jednofázové tryskové injektáže.....	17
Obrázek 9. Vytlačování vody bez využití vertikálních drénů	18
Obrázek 10. Vytlačování vody s využitím vertikálních drénů	18
Obrázek 11. Geodrén Colbondrain po aplikaci do podloží	19
Obrázek 12. Systémy zmrazování	22
Obrázek 13. Schéma pilířového vypalování	23
Obrázek 14. Umělá výztuž NAMFLEX před aplikací	25
Obrázek 15. Pokládka geomříží na dálnici D6 (Obchvat Řevničov).....	25
Obrázek 16. Rozsah použitelnosti pojiva při stabilizaci.....	26
Obrázek 17. Složení směsi stabilizovaných zemin.....	27
Obrázek 18. Dávkování vápna dávkovacím vozem.....	30
Obrázek 19. Frézování.....	30
Obrázek 20. Změny plasticity miocenních jílu karpatské předhlubně po přidání vápna	33
Obrázek 21. Vliv vápna na optimální vlhkost dle zkoušky Proctor Standard	34
Obrázek 22. Závislost efektivní soudržnosti zemin upravených vápnem na čase	35
Obrázek 23. Nárůst hodnoty poměru CBR v čase v závislosti na obsahu vápna při úpravě miocenních jílu karpatské předhlubně	35
Obrázek 24. Ettringitové sloupkové krystaly	36
Obrázek 25. Nárůst pevnosti zeminy zlepšené vápnem v čase.....	37
Obrázek 26. Hodnoty poměru únosnosti CBR zemin upravených vápnem	37
Obrázek 27. Reaktivnost páleného vápna.....	39
Obrázek 28. Schématické zobrazení výroby energosádrovce.....	45
Obrázek 29. Výroba železa a oceli doprovázené výrobou strusky	46
Obrázek 30. Chlazení vysokopecní strusky vodou.....	47

Obrázek 31. Závislost hodnoty pevnosti v prostém tlaku na době zrání jílu s nízkou plasticitou upravených popílkem	49
Obrázek 32. Závislost hodnoty pevnosti v prostém tlaku na době zrání jílu s vysokou plasticitou upravených popílkem	49
Obrázek 33. Závislost hodnoty CBR zeminy upravené směsným pojivem na saturaci vzorků, obsahu pojiva a době zrání	50
Obrázek 34. Závislost hodnoty CBR po saturaci zeminy upravené pojivem na obsahu pojiva a době zrání	50
Obrázek 35. Schéma příčného řezu	57
Obrázek 36. Dokumentace geologického vrtu.....	59
Obrázek 37. Finální návrh vyztužení	61
Obrázek 38. Kruhová smyková plocha (Bishop) $F_s = 1,07$	62
Obrázek 39. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,12$	62
Obrázek 40. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,23$	62
Obrázek 41. Kruhová smyková plocha (Bishop) $F_s = 1,16$	63
Obrázek 42. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,30$	63
Obrázek 43. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,64$	63
Obrázek 44. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,02$	64
Obrázek 45. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,14$	64
Obrázek 46. Schéma vyztužení násypového tělesa	65
Obrázek 47. Geometrie násypového tělesa.....	66
Obrázek 48. Schéma násypového tělesa a podloží	67
Obrázek 49. Graf časového průběhu sedání podloží násypu	70
Obrázek 50. Časový průběh sedání násypu s drény.....	71

Seznam tabulek

Tabulka 1. Průkazní zkoušky upravených zemin dle ČSN 73 6133.....	52
Tabulka 2. Kontrolní zkoušky při úpravě zemin pojivy	54
Tabulka 3. Kontrolní zkoušky čerstvé směsi upravených zemin.....	54
Tabulka 4. Kontrolní zkoušky na zemní pláni dle ČSN 73 6133	54
Tabulka 5. Kontrolní zkoušky při provádění a po dokončení zemního tělesa z upravených zemin dle ČSN 73 6133	55
Tabulka 6. Mechanické parametry geomříží	58
Tabulka 7. Charakteristické parametry zemin v podloží	59
Tabulka 8. Charakteristické parametry zemin násypového tělesa	60
Tabulka 9. Charakteristiky zemin	68
Tabulka 10. Výpočet sedání v ose násypu sumačním postupem	69
Tabulka 11. Výpočet časového průběh sedání.....	69
Tabulka 12. Časový průběh sedání podloží s drény	71

Seznam použitých zkratk

I_D	Relativní ulehlost
I_p	Index plasticity
Y_{dk}	Rovnovážná objemová tíha
W_L	Mez tekutosti
W_P	Mez plasticity
W_{opt}	Optimální vlhkost
CBR	Kalifornský poměr únosnosti (California Bearing Ratio)
pH	Potenciál vodíku (Potential of Hydrogen)
CCC	Průběžná kontrola hutnění (Continuous Compaction Control)

1 Úvod a cíle

Zlepšování základových zemin je jedním z významných úkonů ve stavitelském odvětví. Způsobů, jakými lze zeminu zlepšit, existuje celá řada. Ovšem vhodnost jednotlivých způsobů se liší v závislosti na typu zeminy, u které chceme zlepšit mechanické vlastnosti, popřípadě na rozsahu stavebních prací, přístupnosti, náročnosti na strojní vybavení, zkušenosti a tak dále.

Problematika zlepšování základových zemin provází stavitele odnepaměti. S postupným vývojem vědění a technologií docházelo k inovativním přístupům, jak se s touto problematikou vypořádat. V dnešní době existuje celá řada metod zlepšení, díky kterým jsou dnešní stavitelé schopni stavět i v místech, kde to bylo ještě donedávna považováno za téměř nemožné.

Metoda stabilizace zemin je dále rozvinuta o pojiva hojně i okrajově používaná, a také o průkazní a kontrolní zkoušky. Průkazní zkoušky jsou věnovány zeminám, pojivům a zlepšeným zeminám. Kontrolní zkoušky týkající se dávkování pojiva, hloubky promísení, hrudkovitosti, pojiv atd., jsou popsány a doplněny o tabulky s minimálními požadavky a četnostmi provádění dle stanovených norem. Cílem této práce je popsání základních a nejčastěji používaných metod zlepšování základové půdy, doplněné o reálné využití v praxi.

Zadání bakalářské práce bylo v průběhu jednou změněno. Původně se práce v první části měla věnovat rešerši možných způsobů stabilizace zemi. Tématem druhé části měly být zkoušky stabilizovaných zemin a jejich vyhodnocení. Následkem celosvětové pandemie muselo dojít ke změně zadání, jelikož provádění laboratorní činnosti v prostorách školy nebylo možné. Z původního zadání byla plně vypuštěna laboratorní činnost. Z toho důvodu byla práce rozšířena o rešerši dalších možných způsobů zlepšování zemin a doplněna o početní část.

2 Rešerše

2.1 Zlepšování základové půdy

Pojem zlepšování základové půdy zahrnuje celou řadu technického řešení, jehož výsledkem by mělo být především zvýšení smykové pevnosti, zmenšení deformací a zmenšení propustností. Volba metody zlepšování závisí zejména na prostředí, které má být zlepšováno, na požadovaných geotechnických parametrech, ekonomičnosti a v neposlední řadě na ekologii zvolené metody. Rozvoj strojního vybavení a technologií zlepšování umožňuje mnohem širší uplatnění metod než dříve. Základními metodami zlepšování základových půd jsou [1]:

- zhutňování zemin
- výměna základové půdy
- stabilizace zemin
- injektování zemin
- vápenné piloty
- snížení vlhkosti
- zmrazování zemin
- vypalování zemin
- vyztužování zemin

Rozvoj technologií dále způsobil, že metody, které byly donedávna chápány pouze jako metody zlepšující vlastnosti zemin, se díky novým technologiím staly prvky přenášejícími zatížení. Mezi tyto metody můžeme zařadit například tryskovou injektáž, vyztuženou zeminu a jiné [1]. Se zlepšováním zemin se v dnešní době setkáme u většiny liniových dopravních staveb, vodohospodářských a dalších typů staveb, jelikož zlepšování umožňuje širší uplatnění místních materiálů [2].

2.2 Zhutňování zemin

Zhutňování zemin patří mezi nejstarší a nejjednodušší způsoby zlepšování parametrů zemin. Účelem zhutňování zemin vyskytujících se v přirozeném uložení nebo materiálů sypaných, je zvýšení smykové pevnosti, zvýšení deformačních modulů a snížení propustnosti. Z hlediska zrnitosti se účinné metody dají rozdělit následovně [1]:

- a) pro hrubozrnné zeminy
 - válcování vibračními válci
 - ubíjení
 - prolévání vodou
 - dynamická konsolidace
 - hloubková vibrace (vibroflotace)

- b) pro jemnozrnné zeminy
 - přitížení násypem
 - válcování
 - dynamická konsolidace

Zemina v přirozeném stavu je třífázový systém skládající se z pevných částic, vzduchu a vody. Hlavní myšlenka zhutňování spočívá ve snaze zmenšit objem pórů v zemině, což má za následek zvýšení objemové a specifické tíhy zeminy [1]. Hutnění nachází uplatnění v silničním i železničním stavitelství, vodním hospodářstvím a také v zakládání staveb, kde se uplatňuje zejména při úpravě základových spár pod plošnými základy [2].

2.2.1 Metody zhutňování

- přitížení násypem
- válcování
- pěchovadla
- dynamické hutnění
- hloubkové hutnění (vibroflotace)
- hydromechanické zhutňování
- zhutňování odstřelem

2.2.1.1 Přítížení násypem

Přítížení násypem je jeden z nejstarších a nejjednodušších způsobů hutnění zemin. Použití této metody se využívalo především v silničním a vodním stavitelství. Princip metody spočívá v ukládání zemin v odpovídající vrstvě na hutněnou zeminu, na kterou působí tíha vrstvy zeminy určené k přítížení. Takto zbudovaný násyp se zpravidla nechává přes zimu konsolidovat. Vlivem přítížení podloží dochází k postupné konsolidaci podloží [1,2,3].

Konsolidaci lze urychlit návrhem svislých drénů, ovšem touto úpravou ztrácí metoda na jednoduchosti a taktéž cena narůstá. Po konsolidaci se přebytečná zemina odstraní. V takto zhotoveném násypu bude později probíhat sekundární konsolidace, která je však u většiny zemin zanedbatelná. Tento postup hutnění je primárně vhodný pro násypy ze sypkých materiálů [1,3].

Obecně řečeno, je metoda přítížení násypem založena na velkém přesunu hmot, které jsou jednak drahé, ale i neekonomické. Taktéž časová náročnost je značná. Vlivem tíhy zeminy v tělese násypu a zeminy určené k přítížení dochází ke konsolidaci i mělkých podložních vrstev násypu. Z tohoto důvodu je zapotřebí při návrhu dbát na to, aby nebyla překročena únosnost podloží. Nespornou výhodou této metody je rovnoměrné zhutnění v ploše [1].

2.2.1.2 Válcování

Válcování patří k nejjednodušším způsobům hutnění, které se využívá se k zhutnění zemin soudržných i nesoudržných. U zemin nesoudržných se využívá statický účinek válce v kombinaci s vibrací, naproti tomu u zemin soudržných se válcuje bez vibrací [2].

Užití této technologie hutnění je vhodné především na větších stavbách (pod základovými deskami, pod podlahami, na liniových stavbách – Obrázek 1) jelikož strojní zařízení (válce) jsou poměrně rozměrné. Hutnění za pomoci válců v případě základových pásů a patek není vhodné, jelikož je při něm nutné použít malé mechanizace, která je zpravidla méně účinná [2].



Obrázek 1. Hutnění válcem s hladkým běhounem

Strojní zařízení určené k válcování rozlišujeme podle několika kritérií [1]:

- a) podle pohonu stroje
 - samohybné
 - tažené
- b) podle zhutňovacích účinků
 - statické
 - dynamické
- c) podle konstrukce
 - hladké
 - ježkové
 - mřížové
 - pneumatické

U hladkých válců je účinek zhutňování nejvyšší na kontaktu válce se zeminou. Válce ježkové působí na zeminu dvojitým způsobem – zeminu stlačují ve svislém směru a za pomoci výstupků na běhounu zeminu vytlačují do stran a částečně prohnětou [1]. Vývoj této nejběžnější hutnicí techniky vedl k tomu, že dnes nejsou výjimkou válce kombinované, které mají na jedné ose hladký vibrační běhoun a na druhé ježkový běhoun [1]. Hmotnosti dnešních válců používaných u zemních konstrukcí dosahuje i 26 tun u klasických válců a až 50 tun u válců pneumatikových [2].

Na hmotnosti válců závisí hloubka zhutnění, která je optimální pro [1,2]:

a) hladké válce

- soudržné zeminy $h_0 = 0,09 \sqrt{\frac{G}{b}} r$ [cm]
- nesoudržné zeminy $h_0 = 0,12 \sqrt{\frac{G}{b}} r$ [cm]

kde h_0 je optimální tloušťka hutněné vrstvy

G je tíha válce [N]

b je šířka válce [cm]

r je poloměr válce [cm]

b) ježkové válce

$$h_0 \cong 0,65h_s$$

$$h_s = l + 2,5b - h_p$$

kde l je délka trnu [cm]

b je šířka trnu [cm]

h_p je povrchová nakypřená vrstvička [cm], asi 3 až 5 cm

h_s je optimální výška sypané vrstvy

c) mřížové válce – u mřížových válců je účinek podobný válcům ježkovým

d) pneumatické

$$h_0 = 0,175 \frac{W}{W_{opt}} \sqrt{\frac{G_k - P_w}{1 - k_t}} \text{ [cm]}$$

kde h_0 je optimální tloušťka hutněné vrstvy

G_k je zatížení na kolo [N]

P_w je tlak vzduchu v pneumatice [MPa]

W je skutečná vlhkost zeminy

k_t je součinitel tvrdosti pneumatik

W_{opt} je optimální vlhkost zeminy pro hutnění

Optimalizace hutnického procesu je z pohledu technologického založena na minimalizaci doby hutnění, minimalizaci počtu hutnických přejezdů a zároveň zaručení požadované míry zhutnění. Této problematice je v dnešní době věnována pozornost všech světových výrobců hutnické techniky. Směr, kterým se vydali tito výrobci, lze popsat jako stanovování míry zhutnění pod pracujícím vibračním válcem – online. Tato technologie umožňuje zvýšit efektivitu procesu hutnění a umožňuje okamžitou reakci obsluhy stoje na změny hutněného podloží, popřípadě automatickou regulaci stroje bez vlivu lidského faktoru. Rozhodující je pro tento druh technologie rychlá analýza míry zhutnění pod běhounem [41].

Pro stanovení míry zhutnění je využíváno dvou odlišných metod – relativní a absolutní. První zmíněná metoda poskytuje informaci o relativní míře zhutnění a pracuje na systému porovnávání hodnot naměřených ve dvou po sobě následujících přejezdech. Druhá zmíněná metoda stanovuje stav podloží fyzikální veličinou typu měrná hmotnost, modul pružnosti, nebo tuhost hutněného prostředí [41].

K zjišťování stavu hutnění patří i často užívané relativní metody označované jako CCC (Continuous Compaction Control). Tyto metody jsou založeny na nepřetržitě zpracovávání dat o průběhu vertikálního, případně horizontálního zrychlení vibračního běhounu. Na základě naměřených dat, která jsou následně online staticky zpracována, je stanovena míra zhutnění zeminy. Hodnota míry zhutnění je okamžitě zobrazena obsluze, která rozhodne, zda je zhutnění dostatečné, nebo je potřeba hutnický pojezd opakovat [41]. Lze předpokládat, že vývoj této techniky bude pokračovat a bude snahou zvýšit účinnosti při snížení energetických nároků.

2.2.1.3 Pěchovadla

Pěchovadlo neboli žába (Obrázek 2), je ruční strojní vybavení určené k hutnění ve stísněných podmínkách stavby. Příkladem může být hutnění zpětného zásypu rýhy, hutnění v blízkosti objektů a podobně. Účinnost pěchovadla a jeho použití je značně omezena hutnické energií [2]. Pěchovadlo může být poháněno diesellovým, elektrickým, popřípadě benzínovým motorem. V dnešní době se pěchy vyrábějí v hmotnostech od 10 do 2000 kg.



Obrázek 2. Ruční hutnící vybavení (žába)

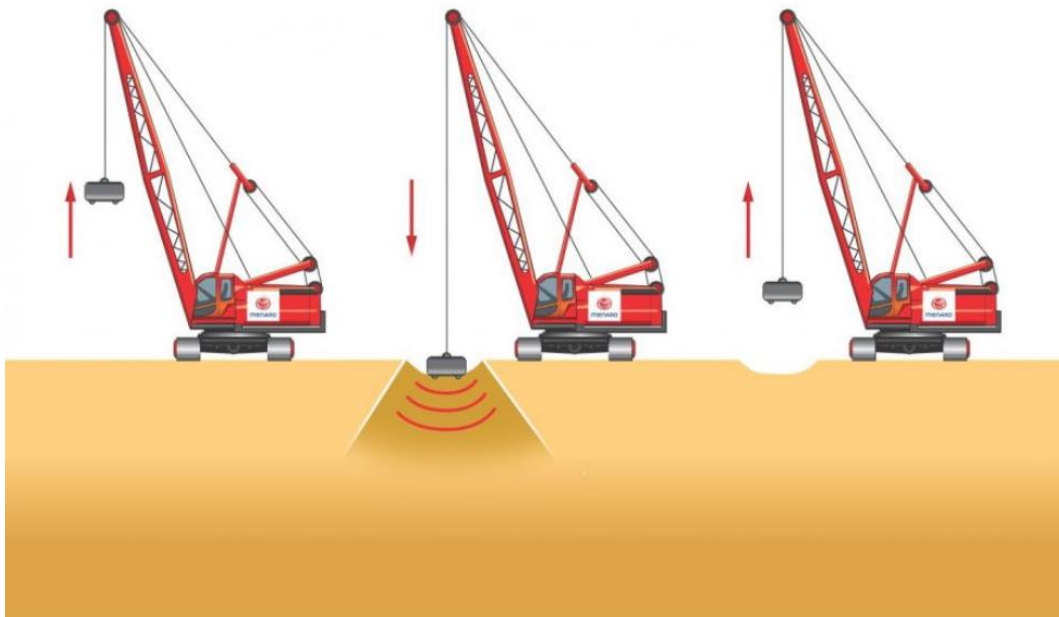
2.2.1.4 Dynamická konsolidace

Technologie dynamické konsolidace, známá také jako dynamické zhutňování, byla vynalezena společností Menard, která technologii zavedla do praxe koncem 60. let minulého století. Samotnou myšlenkou hutnění zemin pádem těžkého břemena se zabýval již roku 1812 francouzský architekt Jean-Baptista Rondelet, nicméně až v roce 1969 se francouzský inženýr Louis Ménéard zasloužil o zcela inovovaný průlom metody hlubinného dynamického zhutňování, na který také drží patentní právo [4,5].

Princip dynamické konsolidace je založen na jednoduché myšlence, kterou je spouštění těžkého břemene o váze 10 – 40 tun z výšky 5 – 40 metrů (Obrázek 3). Energie pádu (výška [m] × hmotnost [t]) se nejčastěji pohybuje od 300 – 500 tm, ale v minulosti bylo použito i mnohonásobně větší energie, a to až 4000 tm při hutnění startovací dráhy na letišti v Nice ve Francii. Takto získaná hutní energie se přenáší do podloží.

Tato technika je vhodná pro všechny druhy nesoudržných zemin, a to i v případě kamenných frakcí. Je vhodná také pro anorganické heterogenní antropogenní násypy a pro rekultivaci výsypek, štěrkových dolů a skládek. Využití nachází při zpevnění půdního

podloží v silničním a železničním stavitelství, dále při zpevnění pod průmyslovými a obchodními sklady, těžkými skladovacími halami a jinými velkoplošnými stavbami [4,5].



Obrázek 3. Princip dynamického hutnění [4]

Využití této technologie hutnění má mnoho pozitiv. Za zmínku stojí vysoká produktivita na velkých hutněných plochách a skutečnost, že technologie nevyžaduje dodávání jiných materiálů nebo zařízení. Kontrolu dynamického zhutňování je možno provádět za pomoci dynamického sondování několik dní po hutnění. Na základě výsledků dynamického sondování je možno upravovat hutnicí energii a schéma hutnění [4].

2.2.1.5 Hlubková vibrace (vibroflotace)

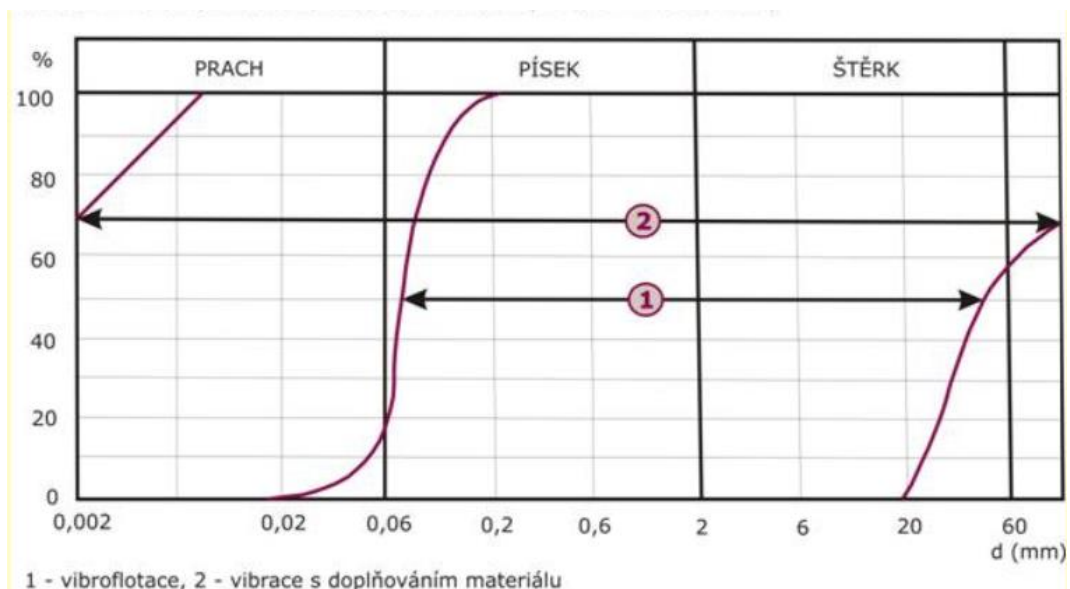
Hlubinné zlepšování zemin se začalo vyvíjet koncem 20. let minulého století, kdy byly pozorovány vlivy otřesů na základovou půdu v okolí těžce beraněných pilot [5]. Technologický pokrok metoda nicméně zaznamenala až ve 30. letech minulého století, kdy byly zavedeny vibrátory sloužící pouze k hlubinnému zhutňování zemin.

Následný vývoj vedl ve velmi krátké době k inovaci, která spočívala v kombinaci ponorného vibrátoru s vodním, později vzduchovým výplachem. Takto inovovaná metoda se nazývá hlubinné vibroflotační zhutňování [5] a je obzvláště výhodná v kyprých písčítých a šterkovitých zeminách, které mají větší mocnosti [1,5,6,7].

Hlubkové zhutňování se podle způsobu vibrování rozděluje následovně [1]:

- svislé vibrování výpažnice s přidáváním šterkovité zeminy, případně betonu
- svislé vibrování tvarově různorodého zařízení bez vsypávání jiného materiálu
- vodorovná vibrace bez přidáváním materiálem nebo s přidáváním materiálu do předem zhotoveného otvoru (vibroflotace)

Vlivem dynamického namáhání – vibrací, dochází ke ztekucení okolí vibrátoru. Důsledkem toho je, že se zrna zemin dají do pohybu a začnou se vzájemně přibližovat. Výsledkem je hutnější struktura zeminy, která má pozitivní dopad na geotechnické parametry zemin, a také dochází ke snížení propustnosti vlivem hutnější struktury. Dnes, s nástupem nových technologií, lze efektivitu hutnění zvýšit vyladěním vibrátoru na frekvenci hutněné vrstvy. Takto lze efektivně hutnit do hloubek převyšujících až 50 metrů [5,6].



Obrázek 4. Hranice použitelnosti hloubkové vibrace [7]



Obrázek 5. Hydraulický ponorný vibrátor [5]

2.2.1.6 Hydromechanické zhutňování (prolévání vodou)

Hydromechanické zhutňování je dnes málo používanou metodou. Princip spočívá ve vyplnění pórů zeminy vodou, což má za následek porušení kapilárních sil, popřípadě rozpuštění spojení na kontaktech zrn. Takto uvolněné vazby mezi zrny v kombinaci s faktem, že se zhutňuje vrstva přitíží vodou, způsobují konsolidaci vrstvy. Metoda je vhodná zejména pro písčité zeminy, v některých státech se využívá také na odstranění prosedavosti sprašových zemin [1,3].

2.2.1.7 Zhutňování odstřelem

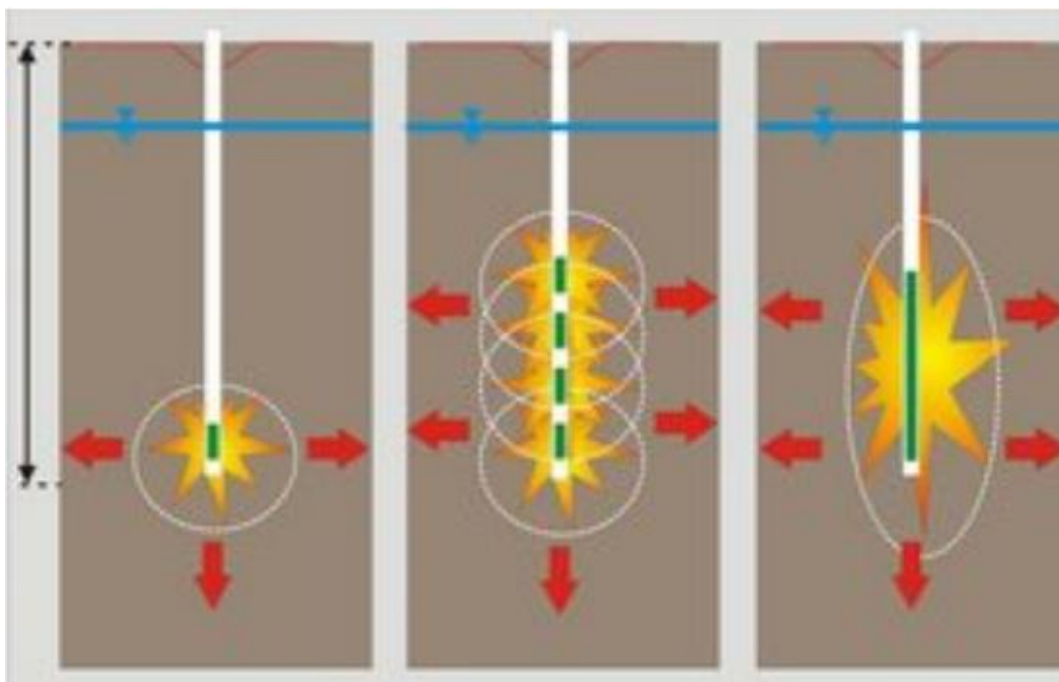
Zhutňování odstřelem (Obrázek 6) je metoda velice jednoduchá a finančně málo nákladná. Využití v reálném prostředí však naráží na přísné bezpečnostní předpisy, jelikož se jedná o metodu, při níž dochází k manipulaci s výbušninami. Rovněž teoretické a praktické zkušenosti v tomto směru nejsou do hloubky rozvinuty [1,3].

Zhutňování odstřelem je vhodné pro kypré písky a spraše. Dále je díky němu možné urychlovat konsolidaci soudržných zemin měkké až kašovitě konzistence, kdy odstřelem ve vývrtu vzniknou prostory, které se následně vyplní nesoudržnými zeminami, které drénují vodu [1,3,8].

Nálože užívané k zhutňování se rozdělují na [1]:

- táhlé nálože
- soustředěné časové nálože

Zkušenosti se zhutňováním odstřelem mají zejména v Polsku, kde se touto metodou zhutňovalo jak na souši, tak i v přístavech pod hladinou moře. Vyhodnocením staveb v Polsku, u kterých bylo zhutňování odstřelem táhlými náložemi využito, se dospělo k závěru, že efektivně zhutňovat odstřelem lze do hloubky 20 metrů. Mezi další země, mající zkušenosti s touto metodou, patří například Německo a Rusko [1].



Obrázek 6. Princip zhutnění zeminy v okolí náloží [8]

2.3 Výměna základové půdy

Metoda výměny základové půdy se hojně využívá v pozemním stavitelství, ale lze ji využívat i u staveb liniových. Jedná se o jednu z nejstarších, nejjednodušších a velmi bezpečných způsobů zlepšování podloží [1,3]. Zeminu, kterou tímto způsobem nahrazujeme, můžeme charakterizovat jako zeminu stlačitelnou s nevhodnými deformačními charakteristikami [9].

Podle rozsahu nahrazení zeminy jinou zeminou rozlišujeme [1,9]:

- podsyp
- plomba
- polštář

Polštář dále rozdělujeme na [1,9]:

- roznášecí polštář
- vyrovnávací polštář

2.3.1 Podsyp

Podsyp je v podstatě vrstva šterku nebo písčitého šterku pod plošným základem, zpravidla nepřesahující mocnost 0,2 metru. Navrhuje se pro všechny druhy plošných základů, které se nacházejí v soudrzných zeminách. Mezi jeho další funkce patří ochrana základové spáry proti rozbředáním a urychlením konsolidace [1,9].

2.3.2 Plomba

U plomby se jedná o výměnu neúnosné zeminy v omezené míře půdorysu. Její tloušťka je volena na základě vlastností zeminy, která se k výměně používá a také na přitížení stavbou. Tato částečná náhrada umožňuje reagovat na nepředvídatelné inženýrsko-geologické poměry stavby, aniž by muselo dojít k úpravě technologie založení [1,9].

2.3.3 Polštář

Jedná se o nahrazení neúnosné zeminy pod celým plošným základem. Využití nachází zejména u základových patek a pásů [1,9].

2.3.3.1 Roznášecí polštáře

Metodou roznášecích polštářů je zlepšováno podloží plošných základů. Tímto způsobem lze zmenšit sedání základu, zvýšit únosnost podloží, zajistit stejné sedání konstrukcí, zmenšit hloubku založení a v neposlední řadě odvodňovat jílovité zeminy pod polštářem, čímž dojde k rychlejší konsolidaci [1,9]. Materiálem roznášecího polštáře je šterk nebo písek, ovšem bez příměsí jemnozrnných zemin. Mocnost vrstev je možno navrhovat neomezeně, ale z ekonomického hlediska má tato úprava opodstatnění do mocnosti 2 metrů [1,9].

Hutnit roznášecí polštář lze běžnými hutnicími prostředky, jako jsou vibrační desky, vibrační válce, popřípadě lze také zvolit dynamické hutnění, které je neefektivnější. Pro vyhodnocení zhutněného polštáře se využívá hodnota relativní ulehlosti, která musí být $I_D \geq 0,7$, nebo hodnota rovnovážné objemové tíhy γ_{dk} [1]. Při návrhu je dále nutno dbát na to, aby napětí na hranici roznášecího polštáře a původní zeminy nepřesahovalo únosnost zeminy pod polštářem [9].

2.3.3.2 Vyrovňovací polštáře

Vyrovňovací polštáře se navrhují v případech, kdy je nutné zabezpečit rovnoměrné sedání objektu. Tato situace nastává tehdy, když se část objektu nachází na nestlačitelném, zpravidla skalním podloží a zbylé části na stlačitelném podloží [1,9]. Za tohoto stavu obvykle dochází k překročení nerovnoměrného sedání konstrukce, což je nepřijatelné. Vyrovňovací polštáře se navrhují ze stlačitelných zemín pod základy, které stojí na nestlačitelném podloží. Mocnost vyrovňovacího polštáře lze stanovit následovně [1]:

$$h_v = s \frac{\gamma_{dk}}{\gamma_{dk} - \gamma_d}$$

kde h_v je potřebná mocnost polštáře

s je požadované sednutí

γ_{dk} je rovnoměrná objemová tíha odpovídající působícímu napětí a vlhkosti zabudované zeminy

γ_d je objemová tíha zeminy po vysušení

2.4 Injektování

Pod touto metodou zlepšování základových půd rozumíme vtlačování tekutých směsí do podloží, které následně zatvrdnou. Injektování podloží se využívá ke zvýšení pevnosti a snížení propustnosti zemín či skalních hornin. Účinnost této metody roste s propustností podloží, do kterého se vtlačuje tekutá injektážní směs.

Injektážní směs by měla být taková, aby při velké dynamické viskozitě a malých zrnech mohla vnikat i do malých puklin a pórů, proto by měla být navrhována v závislosti na vlastnostech injektovaného podloží (velikost pórů a dutin). Důležitou vlastností směsi je, aby po aplikaci v podloží dosahovala vysoké pevnosti a docházelo k minimálnímu smrštění.

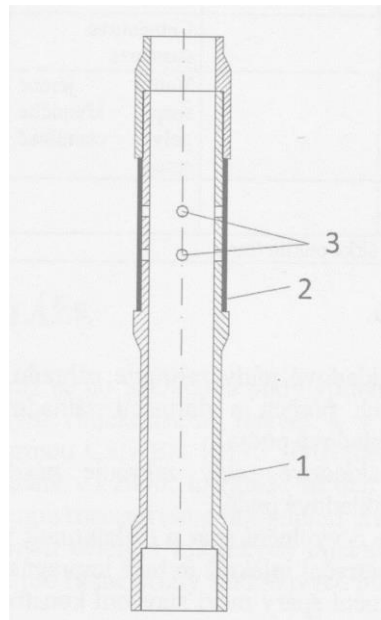
Dále musí injektážní směs splňovat následující [1,10,11]:

- musí být lehce zpracovatelná
- musí lehce pronikat
- musí být dobře čerpatelná
- musí být objemově stálá
- musí mít patřičné pevnosti (pevnost v tlaku)
- musí odolávat erozi
- nesmí být drahá

Z reologického chování a velikosti částic se injektážní směsi dělí [1]:

- nestabilní suspenze
- stabilní suspenze
- chemické směsi
- bitumeny
- plynné emulze

Injektážní práce se dnes realizují zejména pomocí manžetových trubek vyrobených podle patentu Solétanche [1]. Následující obrázek (Obrázek 7) popisuje manžetovou trubku s dvojitým obturátorem.



Obrázek 7. Manžetová trubka z plastu: 1 – manžetová trubka, 2 – pryžová manžeta, 3 – otvor [11]

U klasických injektáží probíhá postup prací následovně: nejprve se vyhloubí vrt do projektované hloubky a po jeho vyčištění se vyplní jílocementovou zálivkou. Do takto připraveného vrtu se zapustí perforované manžetové trubky. Po zatvrdnutí zálivky (pevnost 0,1 až 0,2 MPa) se manžetová trubka vypláchne a do požadované hloubky se spustí obturátor. Po zajištění obturátoru následuje injektáž. Injektážní tlak se navrhuje v závislosti na tíži nadloží. Nastavení správné hodnoty tlaku je velmi důležité, protože je-li tlak příliš malý, nedojde k dostatečnému proinjektování. Pokud je tlak příliš velký, může dojít k násilnému roztržení struktury, tzv. klakáži [1].

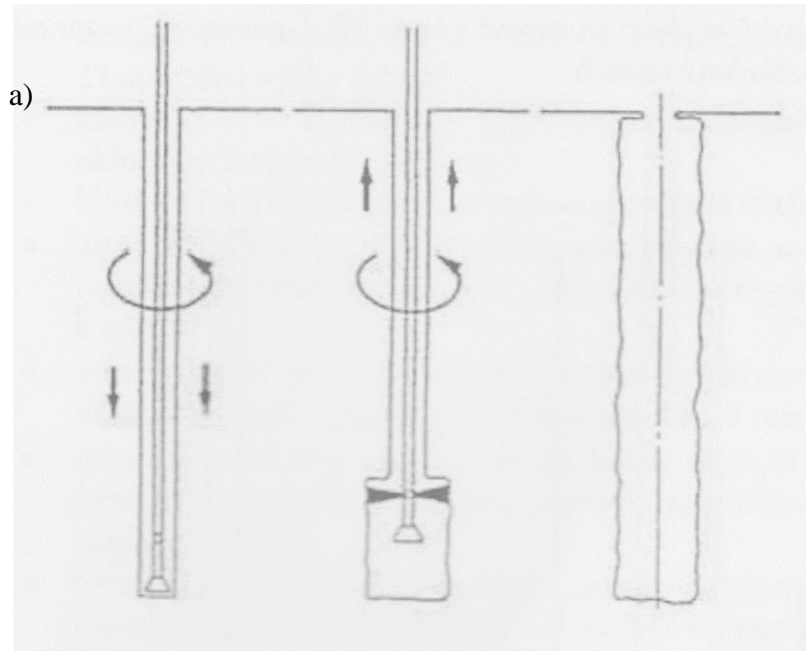
Vedle klasické injektáže existuje ještě injektáž kompenzační a trysková. Kompenzační injektáž je v podstatě řízená klakáž, která vyvolává deformaci stavebních objektů, vesměs zvedání. Principiálně se jedná o vtlačování materiálu skrze vrty pod stávající konstrukci. Takto lze anulovat deformace, které vznikly například nerovnoměrným sedáním objektů [11].

Další vývoj metody injektování vedl k vývoji tryskové injektáže, jež se stala mezníkem v zakládání staveb, jelikož umožňuje účinně řešit mnoho problémů v tomto oboru.

Trysková injektáž nachází uplatnění kupříkladu v těchto směrech [11]:

- zakládání staveb
- podchycování stávajících základů za účelem jejich odkopání
- podchycování stávajících základů za účelem zvýšení únosnosti základové spáry
- těsnící a pažící konstrukce

Trysková injektáž je založena na rozrušení struktury zeminy v okolí vrtu energií tryskaného média. Během této operace dochází ke smíchání rozrušené zeminy s cementačním pojivem. Následující obrázek (Obrázek 8) popisuje výrobu sloupu tryskové injektáže.



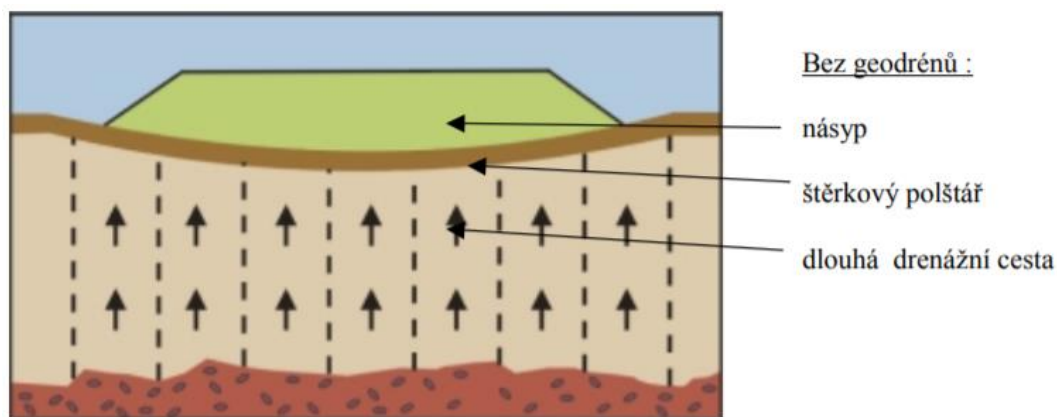
Obrázek 8. Schéma technologie provádění jednofázové tryskové injektáže [11]

2.5 Snižování vlhkosti

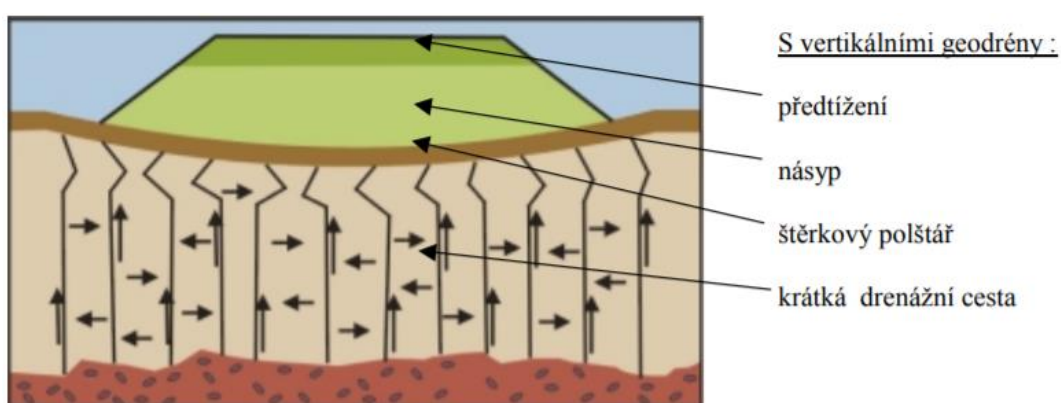
Snížením vlhkosti soudržných zemin lze dosáhnout lepších mechanických vlastností bez dalších zásahů. Možností, jak vlhkost v zemině snížit, je několik – svislé (vertikální) drény, elektroosmóza, vápenné piloty a další. Všechny možnosti pracují se zkrácením dráhy průsaku. Snížením vlhkosti v zemině se urychluje konsolidace podloží [1,10].

2.5.1 Vertikální drény

Vytlačování vody k povrchu do vodorovné drenáže (Obrázek 9) bez využití svislých drénů je časově náročné, jelikož dráha průsaku je značná. Instalací svislých drénů zkrátíme dráhu průsaku (Obrázek 10) a také čas potřebný k primární konsolidaci. Samotné drény jsou zhotoveny jako pískové nebo štěrkové pilíře, popřípadě jsou ve formě strojně vyráběných pásů (geosyntetické drény). Nacházejí využití především při zlepšování velmi stlačitelných jílových půd [1,12].



Obrázek 9. Vytlačování vody bez využití vertikálních drénů [12]



Obrázek 10. Vytlačování vody s využitím vertikálních drénů [12]

2.5.1.1 Pískové pilíře

Odvodňování za pomoci pískového pilíře je nenáročná jednoduše realizovatelná metoda. Výrobu takového pilíře lze rozdělit do dvou fází, přičemž lze tyto fáze jednoduše provést i v jednom pracovním kroku. První fází je vytvoření otvoru (nejčastěji válcového) v zemině, který lze zhotovit buďto roztlačením nebo vyvrtáním. Výhodou výroby otvoru roztlačením je, že navíc dochází k hutnění okolní zeminy. Druhá fáze spočívá pouze v zasypaní vzniklého otvoru. Pilíře se realizují v trojúhelníkové síti vzájemně vzdálené 1,5 až 3 metry [1].

2.5.1.2 Šterkové pilíře

Funkce a výroba šterkových pilířů je totožná jako u pískových.

2.5.1.3 Geodrény

Svislé geodrény zajišťují při správném návrhu dostatečně rychlou konsolidaci stlačitelného podloží s poměrně nízkými náklady. Historie svislých geodrénu sahá do 70. let minulého století, kdy firma Colbond Geosynthetics začala vyrábět svislé geodrény Colbondrain (Obrázek 11).

Obecně se geodrény skládají z jádra, které je navrženo tak, aby skrze něj mohla voda odtékat k povrchu. Dále obsahuje filtrační obal, který brání ucpání drenážního kanálku. Instalace se provádí vpichováním za pomoci speciálně navržených strojů. Tyto stroje můžou nabývat značných rozměrů, neboť jejich velikost je závislá na projektované délce geodrénu [21].



Obrázek 11. Geodrénu Colbondrain po aplikaci do podloží [42]

Drenážní funkce je nejvíce ovlivněna filtračním obalem. Tento obal by proto měl splňovat následující: měl by klást vodě co nejmenší odpor (propustnost), měl by zabránit vniknutí jemných částic unášených vodou do drenážního jádra a měl by po návrhovou dobu plnit svou funkci.

Filtrační obal může být zhotoven z neupraveného, impregnovaného papíru a netkaných textilií. Životnost neupraveného papíru se pohybuje do 16 měsíců, zatímco u impregnovaného papíru dosahuje až 30 měsíců. Výhodami tohoto systému odvodňování je rychlá instalace, nízká cena a také minimální porušení zeminy po samotné aplikaci geodrénu [1].

2.5.2 Elektroosmóza

Elektroosmóza je metoda vhodná pro zvodnělé zeminy, jako jsou jílovité hlíny, hlíny či prachovité hlíny, jejichž součinitel filtrace se pohybuje v rozmezí 10^{-6} až 10^{-9} m/s. V těchto zeminách je velká část pórů vyplněna vázanou vodou. Po zavedení stejnosměrného elektrického proudu dojde k uvolnění vázané vody, která může být následně odčerpána skrze čerpací studny [1].

2.5.3 Vápenné piloty

Základní myšlenka vápenných pilot spočívá v přidávání nehasšeného vápna do měkkých jílů, což má za následek snížení vlhkosti zeminy a také její vyztužení. Proces výroby vápenné piloty probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je zavrtání speciální hlavice do projektované hloubky. Druhým krokem je postupné vytahování hlavice (hlavice rotuje) s přidáváním nehasšeného vápna, které je dopravováno čerpadlem. U takto zhotovených vápenných pilot probíhá proces konsolidace měkkých jílů podstatně rychleji [1].

2.6 Zmrazování zemin

Technologie zmrazování zemin nachází uplatnění všude tam, kde je potřeba dočasně zamezit přítoku podzemní vody do konstrukce, či zhotovit dočasnou ledovou nosnou stěnu. Zmrazování se využívá v případech, kdy jiné způsoby utěsnění a zpevnění nejsou efektivní, nebo se nedají použít. Aby mohla být zemina zmrazena, nesmí být „suchá“. Z tohoto důvodu je zmrazování vhodné pro zeminy vlhké až vodou nasycené.

Rychlost a spotřeba energie pro zmrazování zeminy je závislá na teplotních vlastnostech dané zeminy, teplotě prostředí a obsahu vlhkosti. Mezi pozitiva této metody nesporně patří fakt, že při zmrazování nedochází k narušení hladiny spodní vody, a dokonce ani ke snížení její kvality. Dalšími výhodami je přizpůsobivost metody dané stavbě, vysoká bezpečnost práce, technologická nenáročnost a zachování původních vlastností zeminy. Naproti tomu, mezi nevýhody lze zařadit vysokou energetickou náročnost, délku zmrazování a objemové změny zemin [1,13,14].

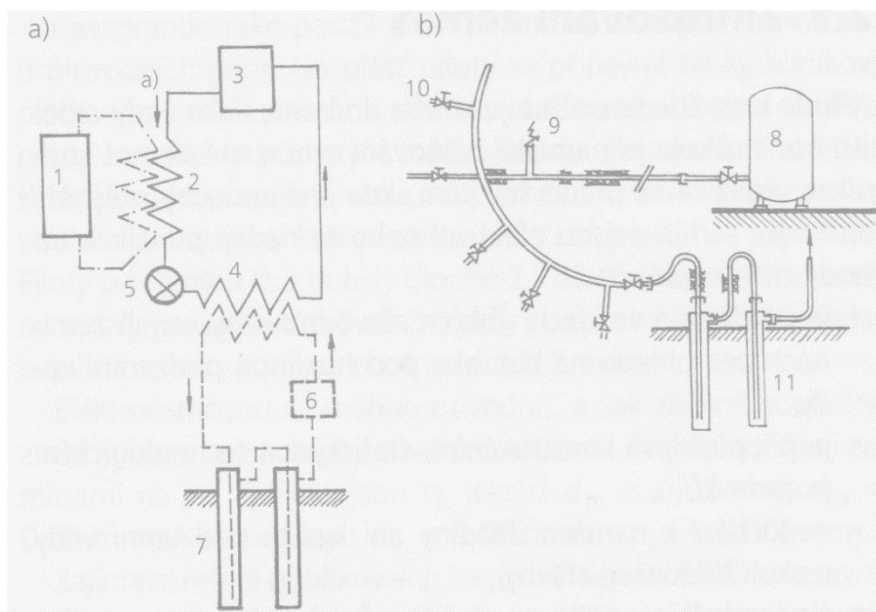
K chlazení (odběru tepla ze zeminy) se využívá chladicí látka, která se vhání do trubek, které jsou umístěny v předem beraněných či vrtaných otvorech. Aplikace chladicí látky trvá tak dlouho, dokud nedojde k zmrznutí zeminy a vytvoření souvislé zemní stěny. Tato zemní stěna se následně chová jako skalní hornina. Na délku zmrazování, jak bylo

popsáno výše, má vliv několik faktorů. Obecně lze ale nastínit, že zmrazení 1,5 metru mocné zemní stěny v nasyceném písku trvá 50 dní a zmrazení stejné stěny v soudržných zeminách může trvat až 3 měsíce.

Systémy zmrazování lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou je takzvaný uzavřený systém, který se skládá z kompresoru, vysokotlaké nádrže, výparníku, potrubí atd. (Obrázek 12 a), přičemž chladicí medium má v tomto systému tzv. nucený oběh, tedy cirkuluje. Nejčastěji používaná chladicí média jsou roztoky solí, tzv. solanka. Tyto roztoky musí být navrženy tak, aby nezamrzaly při chlazení, proto se nejčastěji používají roztoky chloridu sodného (NaCl) s různými koncentracemi. Dále lze užít roztok chloridu hořečnatého (MgCl₂), chloridu vápenatého (CaCl₂) a další.

Do druhé skupiny patří systémy otevřené (Obrázek 12 b), u nichž se chladicí medium dopravuje na stavbu ve speciálních cisternách, z kterých je následně přečerpáváno do zásobníku. Poté se médium rozvádí systémem potrubí k zmrazovacím vrtům, kde se vypařuje [1,14]. V tomto systému se jako chladicí látka používá čpavek (NH₃), kapalný oxid uhličitý (CO₂), tuhý oxid uhličitý (suchý led), ale nejčastěji tekutý dusík s teplotou -196 °C.

Tekutý dusík použitý u otevřeného systému chlazení má několik výhod oproti systému uzavřenému. Mezi tyto výhody patří absence zřizování chladicí stanice, anulování možností zamoření zeminy roztoky solí, jednodušší instalace celého systému a rychlejší zmrazení s lepšími mechanickými vlastnostmi [1,14].



Obrázek 12. Systémy zmrazování

a) uzavřený systém, b) otevřený systém

1 – ochlazení vody, 2 – kondenzátor, 3 – kompresor, 4 – výparník, 5 – expanzní ventil, 6 – čerpadlo, 7 – zmrazovací trubka, 8 – zásobník s kapalným dusíkem, 9 – ventil, 10 – první sonda, 11 – poslední sonda [1]

Proces zmrazování zemin lze rozdělit do tří fází. První fáze je samotné aktivní zmrazování, při níž probíhá nejintenzivnější odebrání tepla a vytváří se vlastní stěna. Tato fáze je finančně nejnákladnější a nejnáchylnější na výpadky chlazení. Druhá fáze je naproti tomu pasivní – dochází při ní pouze k udržování zmrazené konstrukce a je finančně poměrně nenáročná. Třetí fázi lze pojmenovat jako fázi rozmrazovací. Samotné rozmrazování může probíhat přirozeně nebo uměle [1,13,14]. Využití zmrazování zemin při zakládání staveb a budování podzemních děl lze považovat za vhodnou doplňkovou technologii v náročných hydrogeologických poměrech [1].

2.7 Vypalování zemin

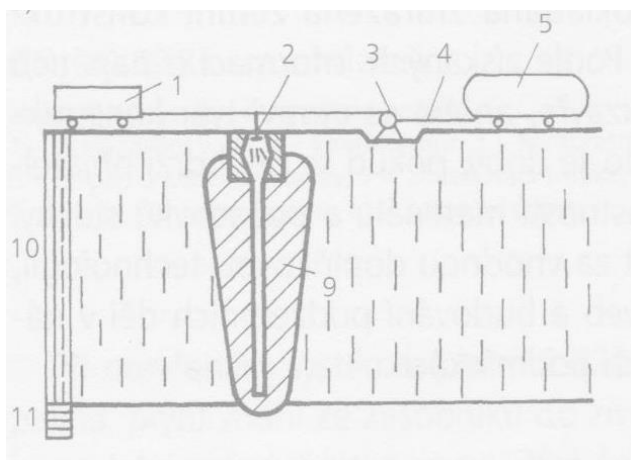
Metoda vypalování zemin (termické zpevňování) je použitelná pro zeminy obsahující více než 15 % jílových částic. Obzvláště vhodná je pro spraše a sprašové hlíny, u kterých se takto dá zvýšit pevnost a odstranit prosedavost. Vypalováním dochází také k snížení bobtnavosti, rozbředání a ke změně strukturálních vlastností zpevňované zeminy. Princip termického zpevňování je založen na přeměnách fyzikálně mechanických vlastností zemin po jejich zahřátí horkými plyny, které jsou vháněny do svislých, šikmých nebo i horizontálních vrtů.

Působením vysokých teplot dochází ke zvýšení strukturálních vazeb (natavení spojů) mezi zrny zeminy a současně se odpařuje volná voda z pórů spolu s elektromolekulárně vázanou vodou. Po zahřátí na 600 °C ztrácí zemina plasticitu a rozbředavost [1,3].

Jako palivo pro vypalování se používá zemní plyn, nafta, mazut apod. Tyto paliva je potřeba mísit se vzduchem, aby hořící směs dosahovala optimální teploty, která je ovlivněna vlastností dané zeminy. Při nižších vypalovacích teplotách nedochází k optimálnímu natavení spojů a kupříkladu prosedavost se tak neodstraní. Naopak při vysokých teplotách dochází ke spečení zemin a zanesení vrtů, následkem čehož se sníží pronikání horkých plynů do zeminy a tím také snížení efektivity vypalování [1,3].

Vypalování zemin probíhá nejčastěji formou tzv. pilířového zpevňování. Tato forma vypalování je znázorněna na obrázku 13. Vrt je uzavřen s tryskou v horní části. Na podporu hoření se do vrtu krom paliva vhání vzduch pod tlakem 0,015 až 0,05 MPa. Takto zhotovený pilíř má tvar kužele o průměru 1,5 až 3 metry, protože s přibývajícím hloubkou klesá teplota plynů. Spotřeba tekutého paliva se pohybuje od 80 do 180 kg na jeden metr délky vrtu. Časová náročnost vypalování se pohybuje od 5 do 10 dnů. Po vypálení má vypálený kužel krychelnou pevnost od 1 do 3 MPa [1].

Tato metoda je riziková z pohledu znečištění podzemních vod ropnými látkami, a proto je převážně v rozvinutých zemích zakázána. Jistou alternativou je vypalování za pomoci horkého vzduchu, který je vháněn do vrtů, přičemž lze dosáhnout prakticky stejného efektu. Vypalování zemin nenašlo na našem území uplatnění díky své energetické náročnosti a již zmíněné ekologické zátěži [1].



Obrázek 13. Schéma pilířového vypalování

1 – kompresor, 2 – tryska, 3 – čerpadlo, 4 – potrubí, 5 – zásobník s palivem, 9 – zpevněná zemina, 10 – spráš, 11 – neprosedavá zemina [1]

2.8 Vyztužování zemin

Upravování zemin s použitím mechanického zlepšení nalezneme již v dávné historii. Pro vyztužování se dříve používaly přírodní materiály, jako jsou například větve stromů. Takto vyztužené zemní konstrukce lze najít například v Číně, jejich stáří se odhaduje na přinejmenším 1000 let. Ovšem mnohem starší stavbou, u níž byla využita výztužná vlákna, je zikkurat Agar-Qur, postavený v roce 1440 př.n.l. Tato konstrukce byla zbudována pomocí jílovitých cihel, které byly vyztuženy slámou a rákosem.

Moderní výztužné materiály započaly svou éru v polovině minulého století v Holandsku, kde byla poprvé vyrobena geotextilie. Následně, v roce 1969, definoval architekt a inženýr Henri Vidal princip vyztužené zeminy. V současné době je využití výztužných geosyntetik na vzestupu, zejména v dopravním stavitelství [15,17]. Tato technologie povrchového vyztužování zemin je jakousi analogií vyztužování betonu. V závislosti na velikosti výztuže ji můžeme dělit na mikrovyztužování a makrovyztužování [16,20].

2.8.1 Mikrovyztužování

Pod tímto termínem rozumíme rozptýlenou výztuž v zemině s cílem zlepšit vlastnosti dané zeminy. Tato výztužná vlákna (v délce do 100 mm) mohou být přírodního (rostlinného) nebo umělého původu. Myšlenka mikrovyztužování vyplynula z pozorování vegetace, kdy bylo zjištěno, že vegetace svým kořenovým systémem zadržuje zrnka zeminy vlivem tření a tahové pevnosti, čímž zpevňuje své okolí.

Do skupiny přírodních vláken patří bambus, juta, len, kokos, palma, sisal, sláma a cukrová třtina. Mezi umělá vlákna (Obrázek 14) řadíme vlákna z polypropylenu, polyesteru, polyetylenu, polyvinylalkoholu (PVA), nylonu, skla a oceli. Výztužná vlákna přírodního původu jsou ekologická, protože využívají obnovitelné zdroje, ovšem jejich životnost v konstrukci je omezená. Naproti tomu umělá vlákna jsou po zabudování do konstrukce stabilní. Tato technika zlepšování není v současné době v praxi využívána [17].



Obrázek 14. Umělá výztuž NAMFLEX před aplikací [18]

2.8.2 Makrovýztužování

Vyztužování zeminových inženýrských staveb je analogií k vyztužování betonu. Zatímco v betonu je onou výztuhou betonářská ocel, v zeminách se jedná o speciální rohože zvyšující smykovou pevnost, stabilitu a spolupůsobení. Tyto rohože jsou do konstrukcí vkládané, aby přenášely vodorovné tahové napětí zásypového materiálu. Dále zamezují vytlačování zemin z podloží, snižují příčné deformace, a tím také sedání. Nejčastěji používanými výztuhami jsou výztuhy hliníkové, ocelové a geosyntetické [10].

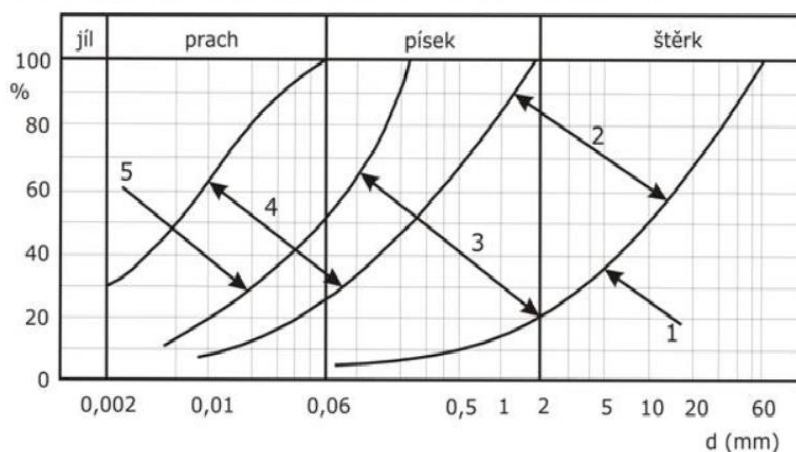
V dopravním stavitelství jsou nejčastěji používané geosyntetické výrobky, protože jednou z jejich vlastností je zamezení horizontálního posunu zrn zásypového materiálu a v důsledku toho zabránění vzniku tzv. kolejí. Norma ČSN EN ISO 10318 dělí geosyntetické výrobky na geotextilie, geomříže (Obrázek 15), geosítě, georohože a další [19].



Obrázek 15. Pokládka geomříže na dálnici D6 (Obchvat Řevničov)

2.9 Stabilizace zemin

Pod pojmem stabilizace zemin rozumíme zlepšování vlastností mícháním. Cílem je zlepšení zejména mechanických parametrů (pevnost) a zabránění namrzavosti. Metoda je vhodná prakticky pro všechny druhy zemin, které se dají rozdrobit, promíchat a následně zhutnit. Za nevhodné se považují zeminy, které obsahují zrna větší než 45 mm, zeminy s méně než 20 % zrn menších než 2 mm a zeminy obsahující více než 20 % organických látek nebo lehce rozpustných solí. Stabilizace dělíme podle použitých látek na stabilizace jinou zeminou, hydraulickými pojivy, bitumenem a stabilizace chemickými látkami. Obrázek 16 znázorňuje optimální použití pojiv k daným zeminám v závislosti na jejich granulometrickém složení.



Obrázek 16. Rozsah použitelnosti pojiva při stabilizaci [1,7]

1 – zeminy nevhodné na zpevnění bez úpravy zrnitosti, 2 – vhodné na zpevnění bitumenem, 3 – vhodné na zpevnění cementem, 4 – vhodné na zpevnění vápnem a cementem, 5 – možné zpevnit vápnem

Tato metoda úprav parametrů zemin se hojně využívá v dopravním stavitelství. Důvodů, proč zrovna v dopravním stavitelství, je určitě několik, ale za nejdůležitější lze považovat velký objem materiálu. Řada zemin vyskytujících se na stavbě nepatří mezi zeminy vhodné, ale naopak patří do skupiny málo vhodných až nevhodných. Zařazení zemin do jedné z nevyhovujících skupin však ještě nevylučuje jejich použití, ovšem pouze za předpokladu jistých opatření či úprav. Jedním z takových opatření může být právě stabilizace [22].

Tento typ úpravy zemin se jeví jako ekologičtější a ekonomičtější řešení oproti tradiční metodě výměny zemin, neboť dává možnost širšího uplatnění místních materiálů. Dále se v tomto případě eliminuje objem přepravovaného materiálu na skládku a ze

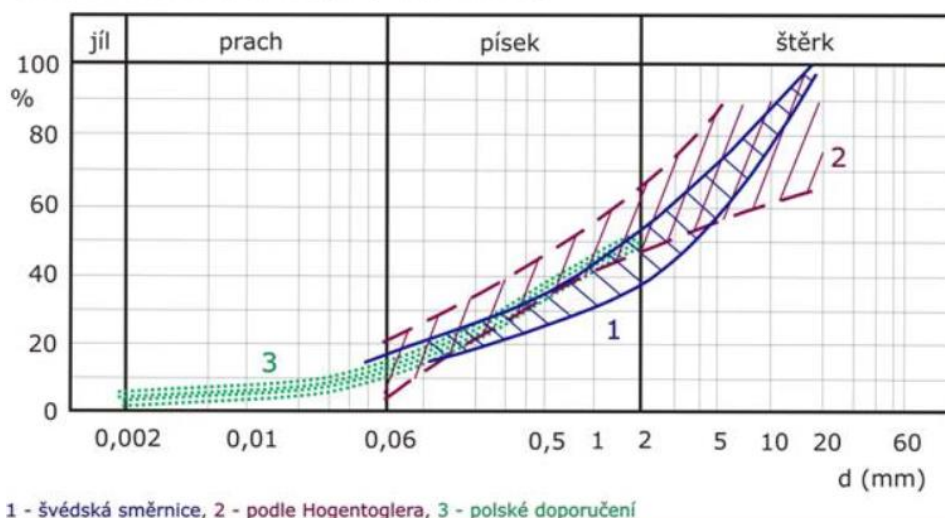
skládky, zatížení hlukem a výfukovými plyny, které by vznikly přepravou, nebo možnost poškození silniční sítě nákladními vozy [22].

Takto upravené zeminy nemají za cíl pouze zlepšit svou pevnost a únosnost, ale často také zpracovatelnost. Při práci na stavbě musí zemina umožňovat pojezd těžkými stroji a nesmí být lepkavá, neboť pro dosažení správného zhutnění musí mít optimální vlhkost [22].

V posledních letech četnost využívání metody stabilizace zemin roste, a to nejen v dopravním stavitelství. Důvodů je několik, ale mezi ty nejdůležitější patří zvyšování požadavků na deformační vlastnosti zemin, omezování záborů pro násypová tělesa, výstavba v zimním období, široký výběr pojiv na trhu a stále častější výstavba v méně kvalitních geotechnických podmínkách [22].

2.9.1 Stabilizace jinou zeminou

Jemnozrnne zeminy bez příměsí hrubších částic jsou pro budování zemních konstrukcí nevhodné a celkově těžko zpracovatelné. Jejich vlastnosti jsou ovlivněny vlhkostí. U takovéto zeminy lze mísením se sypkou zeminou dosáhnout vysoké pevnosti, únosnosti, nesmršťování a nerozbrídání za deště. Pro dosažení zlepšení je nutné navrhnout úpravu tak, aby jemné částice vyplňovaly póry sypké zeminy. Jednotlivé země mají stanoveny směrnice pro optimální složení směsi [1]. Následující graf (Obrázek 17) znázorňuje rozdíl v optimálních směsích mezi Švédskem, Polskem a postarším, ale uznávaným předpisem dle [45].



Obrázek 17. Složení směsi stabilizovaných zemin [7]

Švédský přístup jako optimální směs definuje složení, kdy např. d_{15} označuje, že směs obsahuje 15 % zrn menších než 0,1 až 0,005 mm [1]:

d_{15} – 0,1 až 0,05 mm	d_{50} – 4 až 1,7 mm
d_{20} – 0,3 až 0,13 mm	d_{60} – 6 až 3 mm
d_{40} – 2,5 až 0,9 mm	d_{100} – 20 mm

Naproti tomu, optimální směs pro těžkou dopravu v Polsku požaduje následující složení [1]:

zrna větší než 2 mm	více než 45 %
zrna 25 až 2 mm	45 až 55 %
zrna 2 až 0,05 mm	8 až 11 %
zrna menší než 0,002 mm	2 až 4 %

Zároveň optimální směs musí mít mez tekutosti $w_L \leq 29$ % a mez plasticity $W_P = 4$ až 9 %.

Podle předpisu [45] se složení směsi doporučuje:

35 až 50 % zrn o průměru 2 až 20 mm
50 až 65 % zrn menších než 2 mm

a současně směs musí mít mez plasticity $w_P = 4$ až 9 % a mez tekutosti $w_L = 14$ až 25 %.

Ve všech případech je nutné dodržet podmínku optimální vlhkosti při hutnění [1].

2.9.2 Stabilizace hydraulickými pojivy

Zlepšování zemin přidáváním hydraulických pojiv je možné provádět dvojitým způsobem. Prvním ze způsobů je mísení pojiv a zemin v mísicím centru. Druhým a častějším způsobem je mísení na místě (*in situ*). Každá z těchto variant má plusy i minusy a jejich výběr či vhodnost záleží na konkrétních podmínkách stavby. Spolu s hydraulickými pojivy je možné při mísení přidávat vodu, a tím upravovat vlhkost směsi. Při dodržení všech postupů je výsledkem homogenní materiál s novými vlastnostmi [24].

Mísicí centrum

Mísicí centrum je zařízení využívající míchačky na beton k mísení zemin s hydraulickými pojivy. Tento způsob úpravy není příliš využíván, jelikož je nutné zeminu dovážet do centra a po promíchání rozvážet po staveništi, což vede ke zvýšení nákladů spojených s dopravou [1]. Tento druh úpravy je vhodný pro menší realizace,

kteře se nacházejí v blízkosti mísicího centra, nebo do míst, kam se nemůžee dostat zemní fréza (např. zásypy patek).

Mísení v centru nachází uplatnění také v zásypech rýh a v případech, kdy by skalní podloží mohlo zničit hroty frézy. Výhodou mísicího centra, oproti přípravě na stavbě, je nezávislost na počasí (např. vítr a srážky). V centru jsou také jednotlivé složky dávkovány přesněji (hydraulické pojivo, voda) a nedochází k znečištění okolí rozfoukaným pojivem. Výsledná směs je dokonale homogenní [22].

Před vlastní stabilizací je nutné zeminu předpřipravit pro lepší průchodnost jednotlivými částmi mísicího centra, aby byla výsledná směs dokonale homogenní. Po smísení s pojivem a úpravě vlhkosti je směs převezena na stavbu a rozprostřena. Pro rozprostřání směsi lze využít dozery, grejdry, finišery a jinou dostupnou techniku. Při návrhu směsi a její vlhkosti je nutné zohlednit vzdálenost mísicího centra od staveniště a čas potřebný k uložení a zhutnění do výsledné vrstvy. Zvláště v letních měsících hrozí vysušování směsi, a proto se musí směs během transportu chránit a co nejrychleji uložit [22].

Technologie in situ

Výhodou úpravy zeminy na místě je maximální využití místních materiálů, což eliminuje převoz materiálů do mísicího centra. Tento postup je logisticky a energeticky méně náročný. Sice přibývají dvě fáze, a to dávkování a mísení přímo na stavbě, ale tyto fáze nejsou ani zdaleka tak náročné jako vytěžení zeminy a její následné převezení do míchacího centra, transport na stavbu a uložení. Z tohoto pohledu se lze domnívat, že úprava na místě je ekologičtější.

Celý proces úpravy na místě začíná hrubou úpravou terénu. S použitím různých dávkovačů (Obrázek 18) se na upravovanou zeminu rozprostře potřebné pojivo v předepsaném množství. Následuje nejdůležitější proces, a to proces míchání (Obrázek 19). Ke smísení zeminy s pojivem se používají zemní frézy, ale v literatuře lze narazit i na zemědělské nářadí, které lze k mísení také využívat. Moderní zemní frézy jsou schopny v průběhu mísení upravovat vlhkost směsi na potřebnou hodnotu. Takto upravená vrstva zeminy se přerovná buldozéry či jiným strojním vybavením a zhutní. Následují zkoušky a ošetřování vrstvy [22,24].



Obrázek 18. Dávkování vápna dávkovacím vozem



Obrázek 19. Frézování

Velká pozornost se věnuje vlhkosti zeminy během hutnění, neboť je důležité, aby zemina po zhutnění neobsahovala více než 5 % vzduchu v pórech. Proto je nutné věnovat velkou pozornost tzv. zrání. Pod pojmem zrání rozumíme čas mezi smícháním pojiva se zeminou a finálním zhutněním. Při úpravě zeminy vápnem se doporučuje po promíchání

pouze jemné zhutnění a následné ponechání 24 – 72 hod. Po uplynutí potřebné doby následuje druhé promíchání s doplněním množství vody a následné finální zhutnění [44].

Jako pojivo se používá [22]:

- Vápno
- Cement
- Speciální směsná pojiva – Dorosol, Silunit
- Silniční hydraulická pojiva
- Druhotné materiály
 - Energosádrovec
 - Škvára
 - Mletý pucolán
 - Odprašky z rotační cementové pece
 - Zrnitá vysokopecní struska
 - Elektrárenský popílek z fluidního spalování

2.9.2.1 Vápno

Vápno je v poslední době nejrozšířenějším druhem pojiva pro zlepšování zemín v České republice. Jeho obliba je dána přinejmenším okamžitým účinkem na zeminu. Vápno je vhodné pro úpravu jemnozrnných soudržných zemín, jelikož dobře reaguje s jílovitými minerály. Při takovéto reakci dochází ke kationtové výměně, kdy volné ionty vápníku (Ca^{2+}) v krystalové struktuře jílu nahrazují ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+). Následkem výměny dochází ke změně struktury výsledného materiálu z vrstevnaté, která je typická pro jílové minerály, na zrnitou, umožňující flokulaci a aglomeraci. Materiál po úpravě již není plastický jíl, ale zrnitý materiál [27].

Rozeznáváme 2 typy vápna – vzdušná a hydraulická. Hydraulická vápna vznikají pálením vápenců, dolomitických vápenců nebo vápnitých slínů a slínovců pod teplotu 1250 °C. Další možností přípravy hydraulického vápna je semletí vzdušného vápna s vhodnými přísadami obsahujícími hydraulické oxidy, přičemž vápno musí obsahovat minimálně 10 % hydraulických složek, jako jsou například SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Hydraulická vápna se vlastnostmi blíží cementům a pro úpravu zemín se nevyužívají [22,25].

Vzdušná vápna se vyrábějí pálením čistých (popřípadě jen velmi málo znečištěných) vysokoprocentních nebo dolomitických vápenců při teplotě 1000–1250 °C, tedy na teplotu pod slinutí. Ve stavebnictví se používá ve formě páleného vápna, hašeného vápna a také ve formě vápenného mléka. Pálené vápno nachází uplatnění především u zemin, jejichž vlhkost je příliš vysoká. Po aplikaci dokáže velmi účinně vysoušet zeminu, a tím také měnit její vlastnosti a možnost použití [22,25].

Pálené vápno (CaO) v přítomnosti vody hydratuje (tzv. hašení vápna) a vzniká hydroxid vápenatý Ca(OH)_2 . Tato reakce je silně exotermická a dochází při ní k objemovým změnám. Chemicky ji lze zapsat jako $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{teplo}$. V minulosti, ale i současnosti, se hašení věnuje vysoká pozornost, jelikož i velmi kvalitní surovinu lze během tohoto procesu znehodnotit.

Proces hašení lze provádět dvojím způsobem, a to za sucha nebo za mokra. Suché hašení se provádí ve speciálních mísicím zařízení přímo ve vápence. Do mísicího zařízení je přiváděna voda, která v kombinaci s páleným vápnem hydratuje. Přiváděné množství vody je předem stanoveno s malým přebytkem (60 až 70 litů vody na 100 kg páleného vápna). Během přeměny se vlivem uvolňujícího se tepla tato přebytková voda odpaří a výsledným produktem je práškový vápenný hydrát (hydroxid vápenatý).

Takovýto produkt je vhodný pro úpravu nevhodných zemin, jejichž vlhkost odpovídá Proctorově zkoušce. Pro úpravu zeminy s odpovídající vlhkostí by bylo sice možné použít i pálené vápno, ale výše zmíněnou reakcí by docházelo k snižování vlhkosti, což by v tomto případě nebylo žádoucí a upravovaná směs by se musela zpětně dovlhčit přidáním vody [22,25].

Mokrý hašení je prováděno zpravidla na stavbách, kde se skrání vrstva páleného vápna vodou v ploché otevřené nádobě zvané hasnice. Teplota při hašení nesmí dosáhnout 100 °C. V opačném případě dojde k tzv. spálení. Hašení probíhá za přebytku vody (230 až 320 litů vody na 100 kg vápna) a je při něj nutné dodržovat přísné bezpečnostní opatření [25]. Tato metoda se pro úpravu zemin nevyužívá a zde byla zjednodušeně popsána pro ucelení tématu hašení.

Zeminy nevhodné s vlhkostí menší, než je vlhkost optimální (w_{opt}) je vhodné upravovat vápenným mlékem – suspenzí jemných částic hydroxidu vápenatého. V případě menšího obsahu vody se jedná o vápennou kaši. Výhodou takovéto úpravy je, že se do zeminy zapravuje spolu s pojivem i potřebná vlhkost [22,26]. Po aplikování

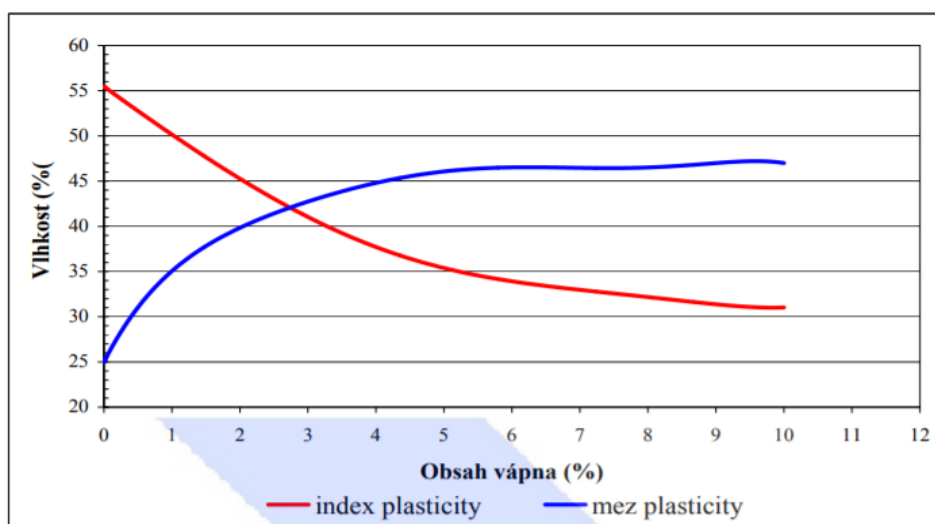
vápna dochází v zemině vždy k okamžitým účinkům, které spočívají ve zlepšení zpracovatelnosti a za jistých okolností i k dlouhodobým účinkům přinášejícím zejména zlepšení pevnosti [22].

Okamžité účinky

Po smísení vápna se zeminou se začnou projevovat krátkodobé účinky v řádu minut. Zvláště po použití páleného vápna dochází k rychlému snížení obsahu vody v zemině vlivem [27]:

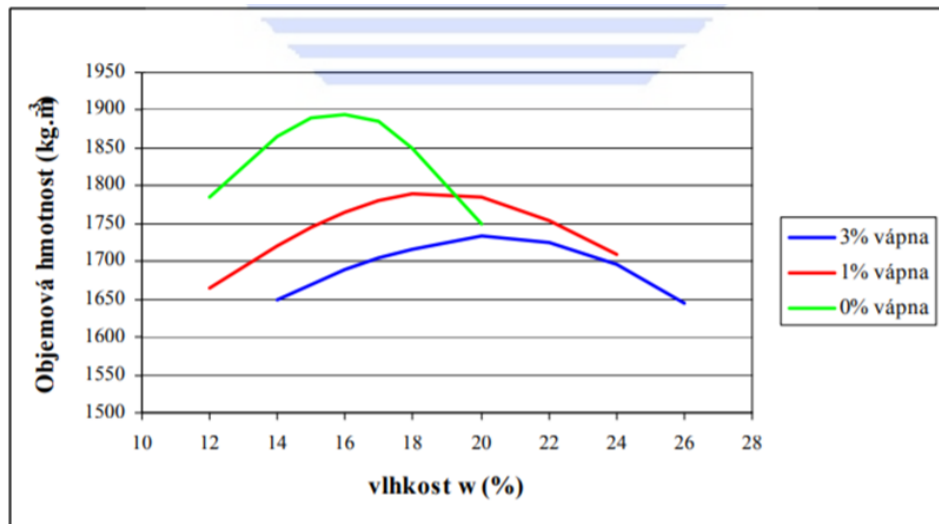
- Hydratace páleného vápna ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 65 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)
- Vypařování vody následkem exotermické reakce
- Provzdušňování při míchání
- Přidáním suché hmoty dochází k snížení poměru hmotnosti vody k hmotnosti pevné hmoty

Bezprostředně po aplikaci dochází ke zvýšení meze plasticity, a tím se snižuje index plasticity (Obrázek 20), výsledkem úpravy je pak nižší konzistence zeminy. Dojde-li ke smísení určitého množství vápna s jemnozrnnou zeminou, jejíž přirozená vlhkost je na čáře plasticity, následující pokles meze plasticity se shoduje se snížením vlhkosti a ovlivňuje chování zeminy, která se mění z plastické na pevnou, což ji činí také lépe zpracovatelnou [27].



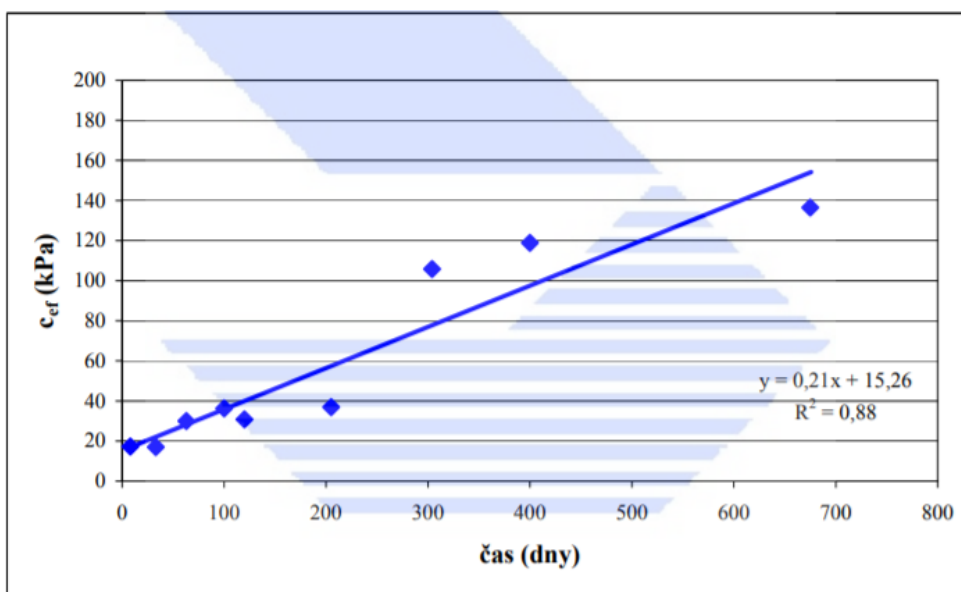
Obrázek 20. Změny plasticity miocenních jíílů karpatské předhlubně po přidání vápna (F8 CH) [27]

Další pozitivní změnou v zemině po aplikaci vápna je snížení citlivosti zlepšené zeminy na vlhkost. Dle zkoušky zhutnitelnosti Proctor Standard se optimální vlhkost zvýší a celá křivka je plošší dle grafu (Obrázek 21). Plošší křivka je výhodnější, jelikož se zvětší interval pro optimální hutnění.

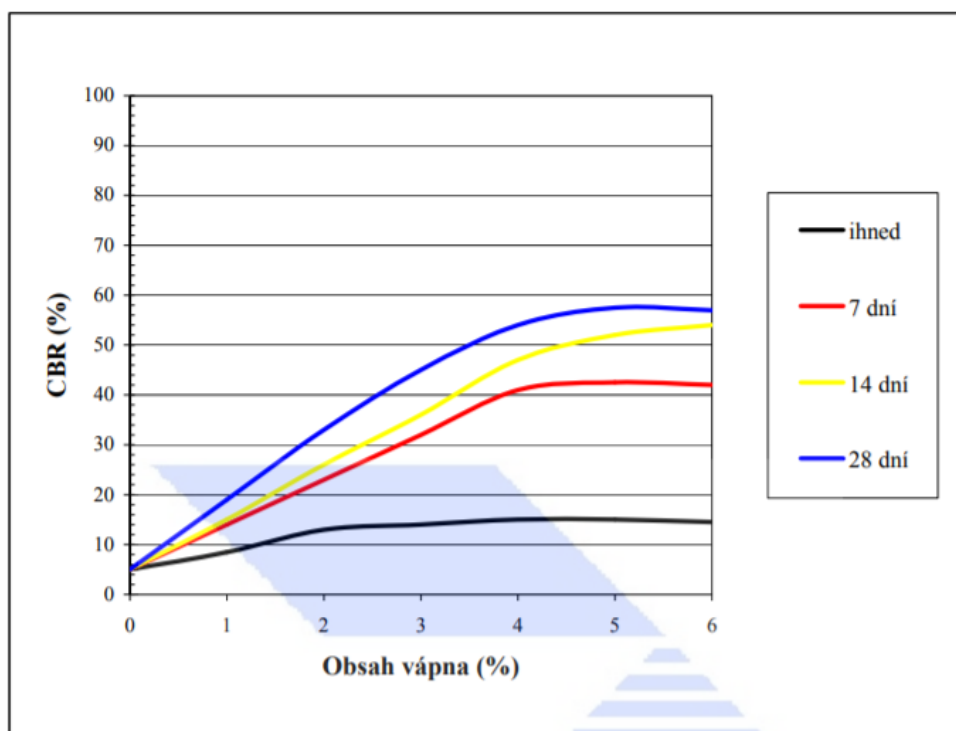


Obrázek 21. Vliv vápna na optimální vlhkost dle zkoušky Proctor Standard [27,47]

Následkem kationtové výměny je, mimo jiné, redukce tloušťky vrstvy absorbované vody a snížení příjmu další vody. Co se pevnostních charakteristik týče, dochází ke zvýšení smykových a přetvárných parametrů, zvýšení CBR (Kalifornský poměr únosnosti – California Bearing Ratio) nebo také k snížení namrzavosti. V případě efektivní soudržnosti hodnota kationtové výměny (Obrázek 22) a CBR (Obrázek 23) výrazně roste s časem [22,27].



Obrázek 22. Závislost efektivní soudržnosti zemin upravených vápnem (F6 CL s 3 % CaO) na čase [27,46]



Obrázek 23. Nárůst hodnoty poměru CBR v čase v závislosti na obsahu vápna při úpravě miocenních jílu karpatské předhlubně (F8 CH) [27]

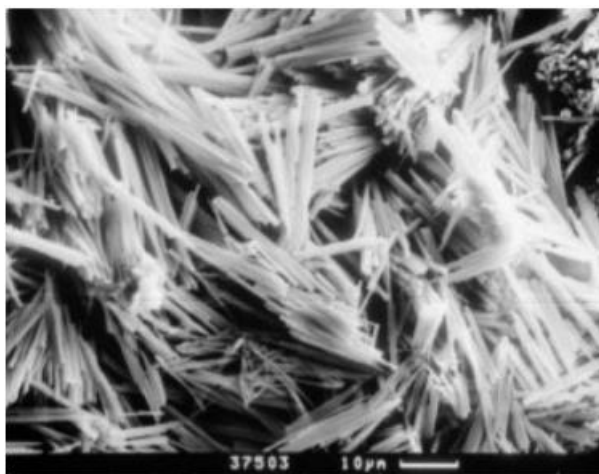
Na závěr krátkodobých účinků lze říci, že aplikace vápna na jílovité zeminy způsobuje v řádu několika minut transformaci materiálu měkkého, lepkavého a neúnosného na materiál pevný, sypký a velmi únosný. Tyto velice rychlé změny v zemině umožňují pojíždět po zemině i těžkými stavebními stroji [22].

Dlouhodobé účinky

Dlouhodobé účinky se začínají projevovat řádově po měsících. Jedním z účinků je pucolánová reakce, která je dlouhodobá a dochází při ní ke krystalizaci gelu vzniklého reakcí jílovitých minerálů a vápna. Hydroxylové ionty (OH^-), které jsou uvolněny působícím vápnem, vytvoří prostředí s pH vyšším než 12, které umožňuje rozpouštět SiO_2 a Al_2O_3 z jílových minerálů. SiO_2 a Al_2O_3 v jílových minerálech reagují s vápnem a vodou, během čehož vznikají gely hydrátů vápníku, křemíku a hliníku. Následně tyto gely krystalizují a propojují strukturu navzájem. Výsledkem pucolánové reakce je pak stmelený materiál, který je pevnější než původní zemina.

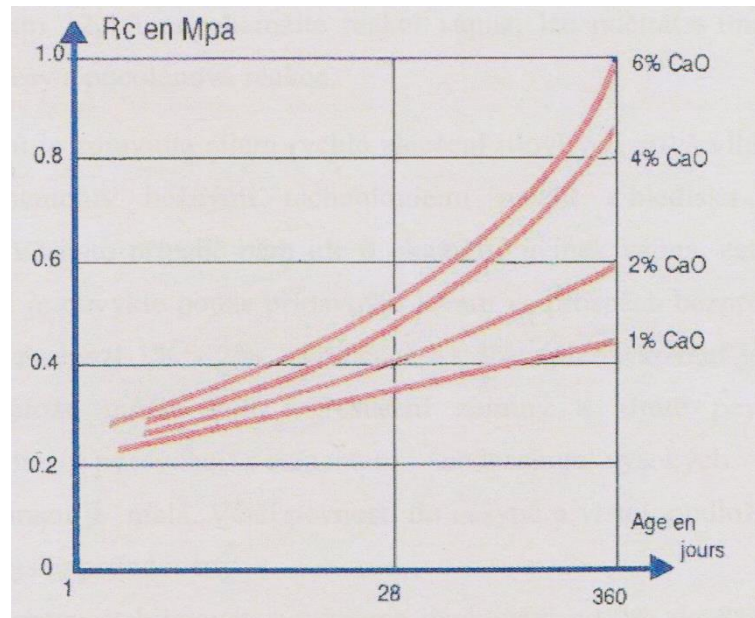
Pucolánovou reakci ovšem neumožňují všechny zeminy, přestože jsou klasifikovány jako jíly. Jedná se například o sericitické jíly obsahující vysoký obsah slíd, které mají původ ve zvětrávání krystalických břidlic, nebo jíly obsahující vysoký obsah organické hmoty, dusíkatých sloučenin, anebo sírany. Sírany ve formě sádry nebo pyritu reagují s vápnem a následkem této reakce dochází k bobtnání a snižování pevnosti stabilizované zeminy.

Tato reakce mezi sírany, vápnem a jílovými minerály je složitý chemický proces, který závisí na mnoha faktorech, zejména na pH zeminy, teplotě a vlhkosti. Minerál s obsahem síranu, který způsobuje objemové změny, se nazývá ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[\text{SO}_4(\text{OH})_4]_3$). Voda obsažená v zemině se zabudovává do krystalů, které mají podobu dlouhých jehliček (Obrázek 24). V místech, kde jsou vazby mezi částicemi jílu slabé, je mohou krystaly ettringitu vytlačit. Celkově růst těchto krystalů oslabuje fyzikálně-chemické vazby mezi částicemi jílu. Z tohoto důvodu je nutné ověřovat množství síranů v upravované zemině [22].



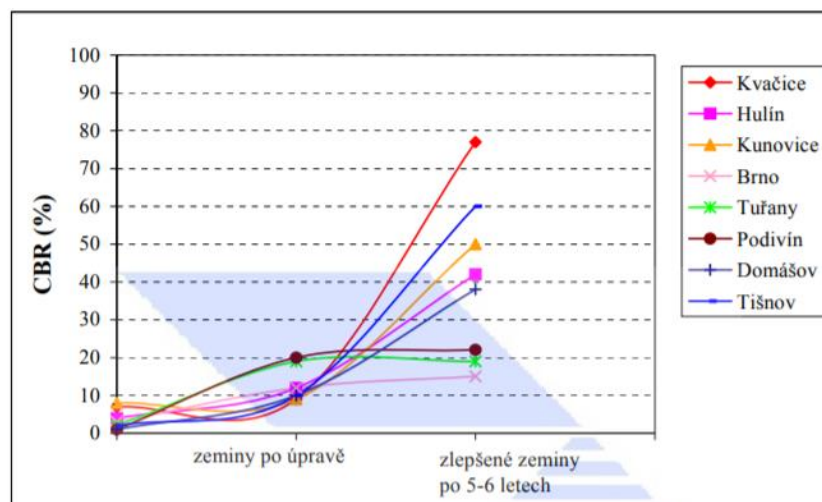
Obrázek 24. Ettringitové sloupkové krystaly [43]

Délka trvání pucolánové reakce je závislá na teplotě a typu jílu obsaženém v zemině. Následkem reakce dochází k zvýšení pevnosti v prostém tlaku (Obrázek 25), zvýšení indexu CBR, smykových parametrů zemin, odolnosti proti mrazu či zvýšení trvalé únosnosti a také k stabilitě směsi po saturaci [22,27].



Obrázek 25. Nárůst pevnosti zeminy zlepšené vápnem v čase [22]

Dalším z dlouhodobých účinků je růst hodnot CBR u zemin zlepšených vápnem. Obrázek 26 znázorňuje výsledky zkoušek zemin zlepšených vápnem po 5 – 6 letech na území Jižní Moravy [27].



Obrázek 26. Hodnoty poměru únosnosti CBR zemin upravených vápnem po 5 – 6 letech [27]

U vápnem zlepšených zemin se také objevuje tzv. syntaktický efekt. Jedná se o jev vyskytující se u částečně saturovaných či saturovaných měkkých vápenců a slínovců. Tento jev lze charakterizovat podle [27] takto:

- Vápno spolu s vlhkým pórovitým agregátem hydratuje, současně způsobuje snižování obsahu volné vody, což má za následek vznik hydratovaného vápna
- Hydratované vápno je schopno obalit povrch každého zrna zeminy
- Snižováním vlhkosti výparem a působením vápna vzniká saturovaný roztok karbonátů ve volné vodě a dochází ke krystalizaci kalcitu. Následkem krystalizace dochází k blokování pórů v zemině a zvyšování její pevnosti
- Zvýšená hodnota pH způsobuje přebytek vápenného obalu a znemožňuje kalcitu rozpouštět se
- Rekarbonatací vápenného obalu s přebytkem CO_2 vzniká směs (nehydraulická) spojující agregát na povrchu vrstvy.

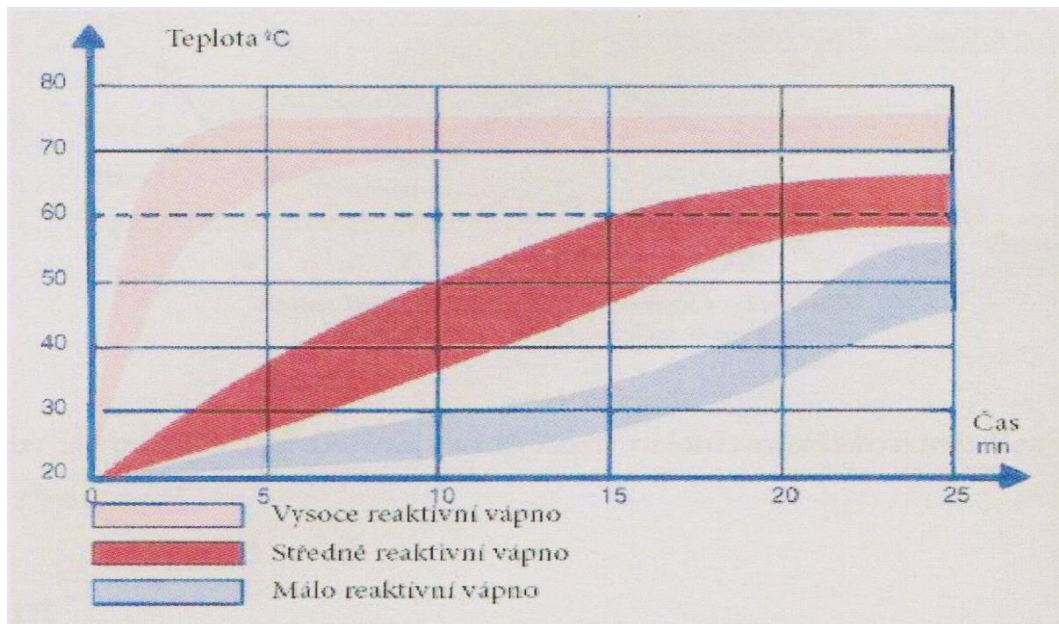
Vlastnosti vápna

Vápna určená k úpravě zemin musí splňovat požadavky normy ČSN EN 459-1 ed.3. Dále by tento materiál neměl být starší 40 dnů, jelikož ze vzduchu přijímá vlhkost, která má za následek snížení jeho aktivity. Základními fyzikálními vlastnostmi vápna jsou jemnost, měrný povrch, objemová hmotnost, rozpustnost a reaktivita.

Jemnost je vlastnost, která má vliv na rychlost, s jakou vápno reaguje. Mimo to, tato vlastnost ovlivňuje dopravu, skladování a míchání. Měrný povrch je místo, které přichází do kontaktu s okolím. Vyjadřuje tedy celkovou plochu všech zrn jednotkového množství a má tak přímý vliv na rychlost reakce. Stanovuje se za pomoci Blainova přístroje v cm^2/gram látky. Obecně se tyto hodnoty u páleného vápna pohybují v rozmezí 3 000 – 10 000 cm^2/g , u hašeného vápna v rozmezí 10 000 – 20 000 cm^2/g .

Objemová hmotnost se odvíjí od druhu vápna, zrnitosti a provzdušnění. Hodnoty u páleného vápna se pohybují od 800 – 900 kg/m^3 a u hašeného okolo 300 – 650 kg/m^3 . Rozpustnost je u vápna poměrně malá a závislá na teplotě – se zvyšující se teplotou rozpustnost klesá. Reaktivita vyjadřuje rychlost reakce vápna. Je spojena s fyzikálními a chemickými charakteristikami. Nejrozšířenější zkouškou reaktivnosti vápna (páleného)

je jeho hydratace. Během této zkoušky se měří nárůst teploty v závislosti na čase, jak je zobrazeno na Obrázku 27. Další metodou je měření rychlosti reakce během neutralizace vzorku páleného vápna s kyselinou [22].



Obrázek 27. Reaktivnost páleného vápna (150 g nehašeného vápna v 600 g vody při 20 °C) [22]

2.9.2.2 Cement

Zlepšování zemin cementem je vhodné pro nesoudržné zeminy obsahující jen málo hlinitých příměsí a pro zeminy s indexem plasticity $I_p < 6$. Zlepšování cementem nachází uplatnění zejména při stavbě podkladních vrstev vozovky a podloží.

Běžně se používají cementy portlandské (pevnostní třídy 22,5 a 32,5), struskoportlandské a cementy vysokopecní třídy 32,5. Z důvodu vzniku smršťovacích trhlin je nevhodné používat cementy rychlotuhnoucí, protože nárůst pevnosti by měl být co možná nejpomalejší.

Během reakce cementu – hydratace se bezvodé složky cementu mění na složky s různým množstvím chemicky vázané vody (kalciumhydroalumináty a kalciumhydrosilikáty). Voda potřebná k hydrataci se získá ze zeminy, která se tímto vysušuje. Vznikající sloučeniny tvoří krystaly, které se v zemině proplétají a zvětšují styčnou plochu. Doprovodným jevem hydratace je teplo. Tuhnutí nastává po několika hodinách, krystalizace gelů v řádu několika dní až týdnů a vytvrzovací procesy jsou otázkou i několika let [22,27].

Porovnáme-li vápno s cementem, cement dosahuje vyšší pevnosti v tlaku i tahu, což se příznivě projevuje na odolnosti proti mrazu. Hydratace cementu je ve srovnání s vápnem pomalejší a produkované teplo během reakce je nižší. Navíc proces hydratace cementu probíhá téměř nezávisle na minerálním složení zeminy, na rozdíl od pucolánové reakce vápna, která je minerálním složením podstatně ovlivněna.

Cement jako pojivo vzniká v cementárně společným vypalováním vápence a jílu při teplotě okolo 1450 °C. Produktem vypalování je slínek, který se mele do podoby jemného prášku a někdy bývá obohacen o příměsi – vysokopecní strusku či popílek. Jemnost má vliv na výsledné pevnosti, jelikož dochází k většímu propletení, jak bylo popsáno výše. Vzniklý šedivý prášek – cement – vytváří po smísení s vodou pojivou hydraulickou složku.

Šedivou barvu dává cementům vysoký obsah oxidů železa a manganu. V praxi je možné se setkat i s bílým cementem, který neobsahuje tak vysoký podíl výše zmíněných oxidů, ale v České republice se nevyrábí a k úpravě zemin se nevyužívá [27,28]. Pro potřeby úprav zemin cementem se používají cementy odpovídající normě ČSN EN 197–1 ed.2.

Dle technických podmínek TP94 kromě nárůstu pevnosti vyvolá 1 % cementu v zemině tyto změny [27]:

- Dojde ke snížení vlhkosti o 0,2 – 0,4 %
- Dojde ke snížení objemové hmotnosti o 6 – 20 kg/m³
- Dojde k zvýšení poměru únosnosti CBR o 5 – 15 % (na vzorku zhutněném při zkušební vlhkosti)
- Dojde k zvýšení CBR o 10 – 50 % po zrání a následné saturaci
- Optimální vlhkost zůstává beze změny

2.9.2.3 Směsná pojiva

Pro úpravu zemin je mnohdy zapotřebí skloubit výhody jednotlivých pojiv. V Německu v roce 1994 bylo poprvé použito směsné pojivo, které vzniklo smísením vápna a cementu. Cílem tohoto kroku bylo využít vlastnosti obou pojiv v jednom pracovním kroku. Vápenná část směsného pojiva má za cíl upravit vlastnosti zeminy tak, aby byla lépe zpracovatelná (soudržnou zeminu přeměnit na zeminu sypkou) a aby snížila plasticitu zeminy, zatímco část tvořená cementem zvyšuje pevnost a odolnost proti

mrazu. Dalšími pojivy, kterými může být směs tvořena, jsou struska, slínek, popílek, pucolán, bentonit nebo odprašky [30].

Mísením různých pojiv v různých poměrech máme možnost optimálně přizpůsobit recepturu konkrétní stavbě za konkrétních podmínek. Každé pojivo působí na zeminu jinak a ovlivňuje zejména chování při tuhnutí, spotřebu vody, odolnost proti síranům, propustnost, pevnost a reologické vlastnosti.

Během výroby těchto pojiv je důležité, aby byla jednotlivá pojiva správně dávkovaná a řádně promísena, neboť po aplikaci musí proběhnout úprava stejná v celém objemu. Dle TP94 musí být účinnost směsných pojiv prokázána laboratorními průkaznými zkouškami a doplněna provozními zkouškami. V České republice jsou směsná pojiva prodávána například pod obchodními značkami Dorosol C xx (xx znamená podíl vápna ve směsi), Silunit vyráběný v Hranicích na Moravě a Prachovice Geosol C.

Dorosol C xx

Firma Holcim přišla v roce 2004 se směsným pojivem Dorosol C, které je tvořeno kombinací vápna a cementu s dalšími cementářskými výrobky. Podíl hlavních složek směsi lze libovolně upravovat v závislosti na druhu zeminy a díky tomu je možné zvolit optimální variantu pro danou stavbu [32]. Dorosol se vyznačuje vysokou jemností mletého zrna a odstupňovanou zrnitostí. Je vhodný zejména pro zeminy středně vlhké až vlhké s nízkou až střední plasticitou.

Dorosol se vyrábí ve třech modifikacích v závislosti na obsahu vápenné složky. Jedná se o Dorosol C30, Dorosol C50 a Dorosol C70. Číselné označení vyjadřuje procentuální hmotnost vápna ve směsi. Zbylá hmotnost je tvořena hydraulickými a jinými materiály. Dávkování Dorosolu se pohybuje v rozmezí od 2 % do 8 % suché objemové hmotnosti zeminy [22].

Silunit

Silunit, jakožto směsné pojivo, vyvinula Cementárna Hranice na Moravě. Jedná se o práškové pojivo připravené smícháním několika hydraulických komponentů. Poměr hydraulických komponentů upravuje vlhkost, namrzavost, pevnost a bobtnání stabilizované zeminy.

Receptura Silunitu byla navržena jako univerzální pojivo aplikovatelné v množství od 1 % do 5 % pro všechny typy zemin. Postupem vývoje bylo pojivo

modifikováno do dalších dvou podob, a to Silunit 1 a Silunit 2. Tyto dvě modifikované varianty jsou vhodné zejména pro zeminy s indexem plasticity do 10. Dávkování při aplikaci se provádí standartní mechanizací v rozmezí od 2 – 3 % [31].

Prachovice Geosol C

Prachovice Geosol C vyráběné firmou Cemex je směsné anorganické pojivo. Vyrábí se smísením vzdušného vápna s cementem a elektrárenským popílkem, ale může být dále doplněno o odprašky z rotační cementářské pece.

Tento druh pojiva je prodáván pod obchodním názvem Prachovice Geosol C s čísly 10 až 70, která jsou odstupňována po desítkách. Tak jako u výše zmíněného pojiva tato čísla představují minimální obsah (hm. %) vzdušného vápna ve výsledné směsi, tvoří tedy 10 až 70 % směsi dle druhu výrobku a účelu použití.

Podíl popílku, popřípadě odprašku činí 30 % konstantně, zbytek je tvořen cementem (CEM II/B-M (S-V) 32,5 R dle ČSN EN 197-1 ed.2). Tento produkt je dodáván jako volně ložený a na stavbu se převáží v cisternách na sypký materiál [34].

2.9.2.4 Silniční hydraulická pojiva

Silniční hydraulická pojiva jsou tvořena pouze hydraulickými složkami, popřípadě jsou doplněna o přísady upravující jejich vlastnosti. Tato pojiva byla vyvinuta pro úpravu hrubozrnných zemín. Oproti cementu mají delší dobu tuhnutí a eliminují tak vznik trhlin. Nárůst pevnosti a modulu pružnosti je taktéž pomalejší, což souvisí se zmíněným nižším výskytem vzniku trhlin. Tato pojiva jsou odolná vůči mrazu, a proto se používají zejména do podkladních vrstev vozovek.

Účinky těchto pojiv na zeminu lze rozdělit na okamžité a dlouhodobé. Po aplikaci pojiva dochází k okamžitému snížení vlhkosti – vysoušení zeminy. Rozsah závisí na množství pojiva, ovšem obvykle dochází k snížení vlhkosti zeminy o 0,3 až 0,5 % po přidání 1 % pojiva. V případě silničních pojiv s vysokým obsahem vzdušného vápna nebo vápenného hydrátu dochází po aplikaci k okamžitému účinku, který zahrnuje také flokulaci jílových minerálů [27].

Střednědobé a dlouhodobé účinky hydraulických pojiv jsou výsledkem zpevňujících reakcí, které ovlivňují pevnost upravované zeminy. Reakce, ke kterým dochází lze dle TP94 rozdělit do třech etap. První etapa se někdy označuje jako latentní fáze. Jedná se o čas potřebný k vysrážení Ca-SI-Fe-Al gelu z vody volné v zemině.

Obvykle se tento čas pohybuje v rozmezí 2 až 24 hodin po promísení, v ojedinělých případech až 48 hodin. Tato etapa je velice významná pro úpravu zemin, jelikož určuje dobu zpracování směsi.

V druhé etapě dochází ke krystalizaci gelu a zpevnování směsi. Tato fáze v případě silničních hydraulických pojiv s nízkým obsahem pucolánových pojiv trvá po dobu několika týdnů. Třetí etapa je takzvaně zpevňující. Dochází při ní k vytvoření všech Fe-Si – aluminátů a pevnost se tak ještě zvyšuje. Tato etapa probíhá v řádu několika týdnů až měsíců v závislosti na použitém pojivu. Na českém trhu jsou k dostání výrobky firem Holcim a Cemex. Firma Holcim prodává na českém trhu silniční hydraulické pojivo pod obchodní značkou Doroport, zatímco firma Cemex pod obchodní značkou Prachovice Georoad [27,33,34].

Doroport TB 25

Doroport TB 25 je výrobek vytvořený kombinací mletého slinku a hydraulických komponentů. Předností tohoto výrobku je jeho vysoká pevnost, která narůstá velmi pomalu. Pevnost po aplikaci v čase sedmi dnů je maximálně 50 % z 28 denní pevnosti. Výsledných hodnot pevnosti Doroport TB 25 nabývá až po několika měsících. Tento materiál vykazuje také vysokou odolnost proti síranům, které způsobují v zemině objemové změny, například bobtnání. Po aplikaci pojivo začíná tuhnout po 4,5 hodinách. Proces tuhnutí končí v závislosti na počasí po asi 6,5 hodinách od aplikace [22].

Prachovice Georoad

Prachovice Georoad je další nabízené pomalu tuhnoucí hydraulické pojivo na našem trhu. Je vyráběno semletím portlandského slinku, elektrárenského popílku (dle ČSN EN 197), popřípadě odprašků z rotační cementářské pece, vysokopecní strusky či sádrovce. Tento druh pojiva je určen pro výrobu stabilizovaných podkladů dle norem ČSN EN 14227. Tak jako u Doroportu TB 25, i Prachovice Georoad je odolný proti síranům [34].

2.9.2.5 Druhotné materiály

Druhotné materiály vznikají jako vedlejší produkty energetické a metalurgické výroby. Téma zpracování vedlejších produktů je v současné době velmi aktuální, jelikož s vývojem dochází také k jejich stále rostoucí produkci a je tedy nasnadě najít pro tyto materiály další využití. Z pohledu silničních staveb mohou druhotné materiály produkované z energetického a metalurgického průmyslu nacházet uplatnění jako

náhrada přírodního materiálu, případně je lze novými technologiemi dále upravovat na hydraulická pojiva.

Problémem těchto produktů je fakt, že jejich homogenita není stálá a nelze vlastnosti a chování jednotlivých výrobků jednoduše zobecňovat. Tento problém nabývá na významu tehdy, kdy je nutné rozlišovat nejenom mezi producenty, ale i mezi provozy, a dokonce i mezi jednotlivými šaržemi těchto produktů. Nestejnorodost v rovinách producentů či provozů nese řadu problémů a je tedy nutné každý druhotný materiál posuzovat individuálně, což vede k tomu, že tyto produkty nemohou být jednoduše používány ve větší míře.

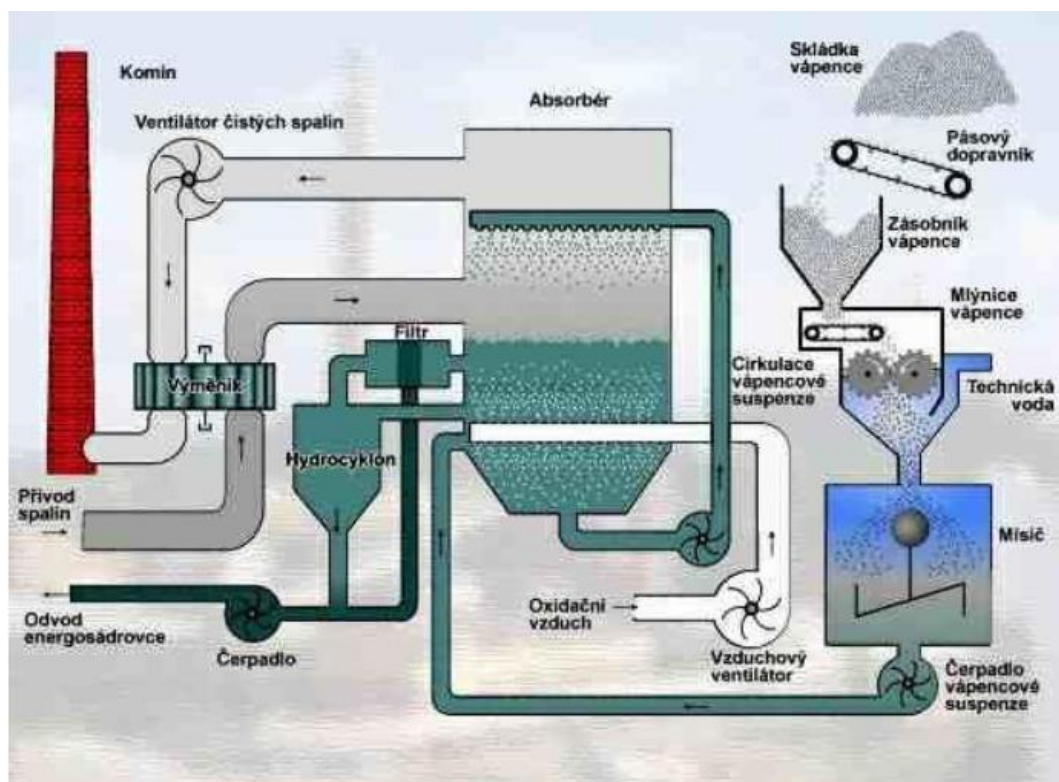
Dalšími nezanedbatelnými problémy jsou různé chemické látky, které se v těchto produktech nacházejí, například popílky obsahující mnoho těžkých kovů, sírany či arsen. Tyto chemické látky omezují uplatnění druhotných materiálů, protože by mohlo docházet k jejich samovolnému a nežádoucímu úniku do okolního prostředí.

V praxi naráží uplatnění vedlejších produktů na nedostatek zkušeností a nedůvěru ze strany zhotovitelů. Dále se na jejich využití negativně podepisuje také současné vzrůstající tempo výstavby, jelikož lze jen stěží uplatňovat materiály, u kterých je nutné pečlivé a zdlouhavé laboratorní posouzení. Ne zřídka se setkáváme s případy, kdy je množství pojiva odhadováno na základě dlouhodobých zkušeností a jsou opomíjeny nové technologie a postupy [36].

Vedlejší energetický produkt je běžně definován jako tuhá látka vznikající během procesu spalování tuhých látek, případně při procesech úpravy vyprodukovaných spalin. Tyto produkty nicméně vznikají i během spalování kapalných či plyných paliv, při výrobě elektrické energie, výrobě tepla, při spalování odpadu a v mnoha dalších odvětvích. S rozmanitostí kotlů používaných pro primární účel výroby energie roste i rozmanitost a kvalita vedlejších energetických produktů [36].

Příkladem vedlejšího energetického produktu vznikajícího při úpravě vyprodukovaných spalin, konkrétně při jejich odsiřování, je energosádrovec, neboli síran vápenatý (CaSO_4). Odsiřování probíhá za pomoci suspenze, která je tvořena jemně mletým vápencem a vodou. Tato suspenze je čerpána do tzv. absorberu, kde dochází ke kontaktu suspenze se spalinami tak, jak je zobrazeno na obrázku 28. Následnou chemickou reakcí dochází k vázání kyslíčků síry a tím vzniká energosádrovec. Jedná se o chemicky velice čistý materiál s čistotou 97 – 98 %.

Výsledný produkt slouží jako příměs (surovina) pro výrobu pórobetonových tvárnic, sádkartonových desek a mnoho dalších produktů používaných ve stavebnictví. Za zmínku také stojí, že energosádrovec je využíván i při výrobě cementu, kde slouží jako regulátor doby tuhnutí [37,38]. Nachází rovněž uplatnění pro úpravu parametrů zemin, protože jeho aplikací dochází k snížení obsahu vlhkosti v zemině, avšak jeho přítomnost nemá velký vliv na pevnost. Použitím sádry nedochází k změně pH v zemině. Výhodou aplikace je zlepšení zpracovatelnosti zemin a posunu meze plasticity k vyšším vlhkostem [22].



Obrázek 28. Schématické zobrazení výroby energosádrovce

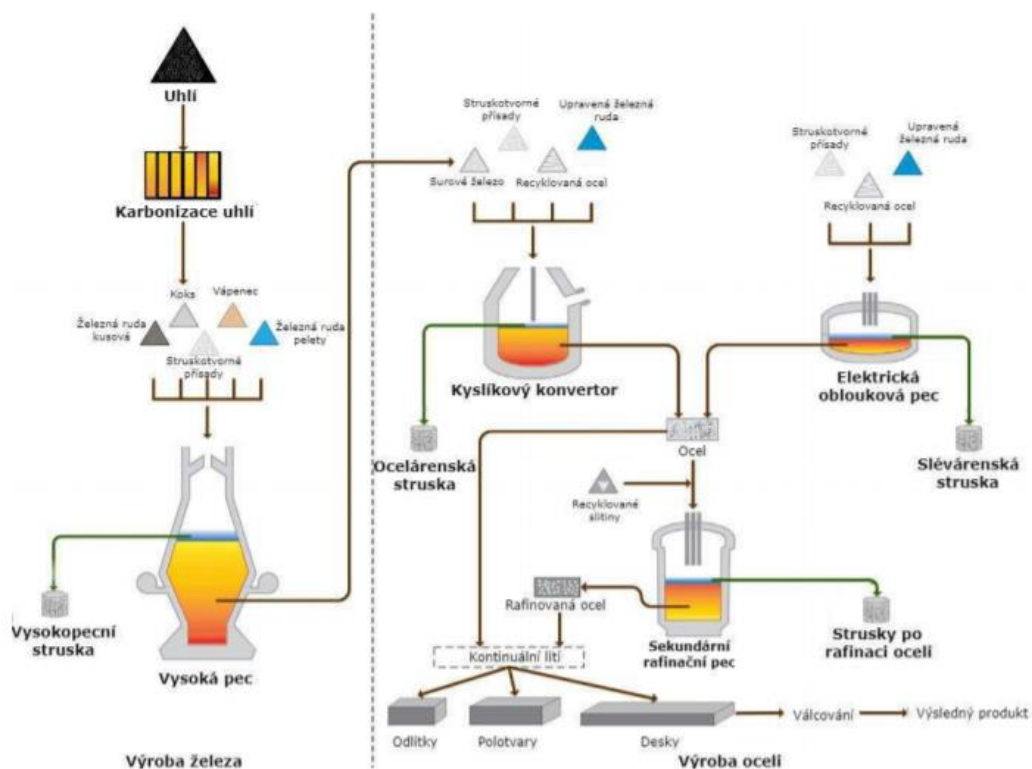
Z pohledu spalování dělíme vedlejší energetické produkty na několik základních typů. Jedná se o produkty, které zůstávají na dně kotlů, dále na produkty odloučené ze spalin, produkty získané při čištění výrobků, popřípadě produkty odsíření. Podrobnější dělení je pak závislé na konkrétním druhu výroby, při kterém daný vedlejší energetický produkt vzniká [36].

Vedlejší produkty metalurgického průmyslu neboli druhotné suroviny, jsou spjaty s výrobou surového železa a s výrobou oceli. Postup úpravy železných rud a jejich přeměna na ušlechtilé materiály je znám už dlouhou dobu. Ovšem v posledních desetiletí množství produkovaných materiálů neustále roste spolu s vedlejšími produkty (v roce 2017 činila světová produkce oceli 1,69 miliardy tun). Mezi nejvýznamnější produkty patří vysokopecní a ocelářská struska, pro které se v dnešní době snažíme najít širší uplatnění [36].

Struska (obecně)

Struska obecně vzniká jako vedlejší produkt především hutního a energetického průmyslu, popřípadě při spalování pevných látek v teplárnách a dalších provozech. Struska je hrubozrnný materiál s ostrými hranami, často s černým zabarvením.

Výsledný vzhled strusky, její chemické složení a mechanické vlastnosti jsou závislé na způsobu spalování, na materiálech vstupujících do výroby, na způsobu chlazení a mimo jiné také na způsobu uložení strusky. Obrázek 29 schématicky zobrazuje proces výroby železa a oceli doprovázený výrobou vedlejšího produktu strusky [39].



Obrázek 29. Výroba železa a oceli doprovázené výrobou strusky [36]

Vysokopecní struska

Vzhledem k povaze této práce bude téma vysokopecní strusky zjednodušeno. Struska odděluje surové železo ve vysoké peci od procesů probíhajících ve vrchních částech a chrání surové železo před oxidací, nadměrným nasycením uhlíkem a celkovou degradací. Vysokopecní struska vzniká v peci nepřetržitě během tavení, a proto je nutné ji soustavně odvádět, chladit a zpracovávat.

Množství vyprodukované strusky je závislé na vstupních materiálech vstupujících do pece a na množství tavidel, které jsou nezbytné pro dosažení požadované jakosti surového železa. Struska je využívána v současné době k mnoha průmyslovým aplikacím, například se může přidávat do hydraulických pojiv, popřípadě je plně nahrazovat. V dnešní době známe několik způsobů zpracování strusky, ovšem jedním z nejrozšířenějších je granulace, pomocí které získáváme produkt vhodný jako surovinu do cementářských výrobků (za předpokladu správného složení strusky) [36].

Granulací se zpracuje 70 – 80 % veškerých vysokopecních strusek. Princip granulace strusky spočívá ve zkrápení odlévané vysokopecní strusky vodou prostřednictvím vysokotlakých trysek, které jsou umístěny v blízkosti vysoké pece tak, jak je znázorněno na obrázku 30. Tímto se docílí rychlého zchlazení a tuhnutí, po kterém dochází k fragmentaci strusky do podoby granulí. Tento postup chlazení vede k vyššímu podílu sklovité fáze, než by tomu bylo u pomalého chlazení, a také podpoře latentně hydraulického charakteru strusky, čehož se využívá v cementářském průmyslu. Cementářský průmysl běžně vyrábí cementy s vysokým obsahem vysokopecní strusky tzv. vysokopecní cementy [36,40].



Obrázek 30. Chlazení vysokopecní strusky vodou

Strusky se k úpravě zemin využívají v původním či předdrceném stavu. Předdrcením dochází ke zvýšení aktivity materiálu. Pro svou reakci se zeminou struska potřebuje tzv. aktivátor, což je zásaditá látka, která začne strusku rozpouštět. Za nejvhodnější aktivátor je považováno vápno či hořečnaté vápno. Po aplikaci v průběhu začínající krystalizace se vytvářejí hydratované sloučeniny, které napomáhají k tunutí a tvrdnutí směsi.

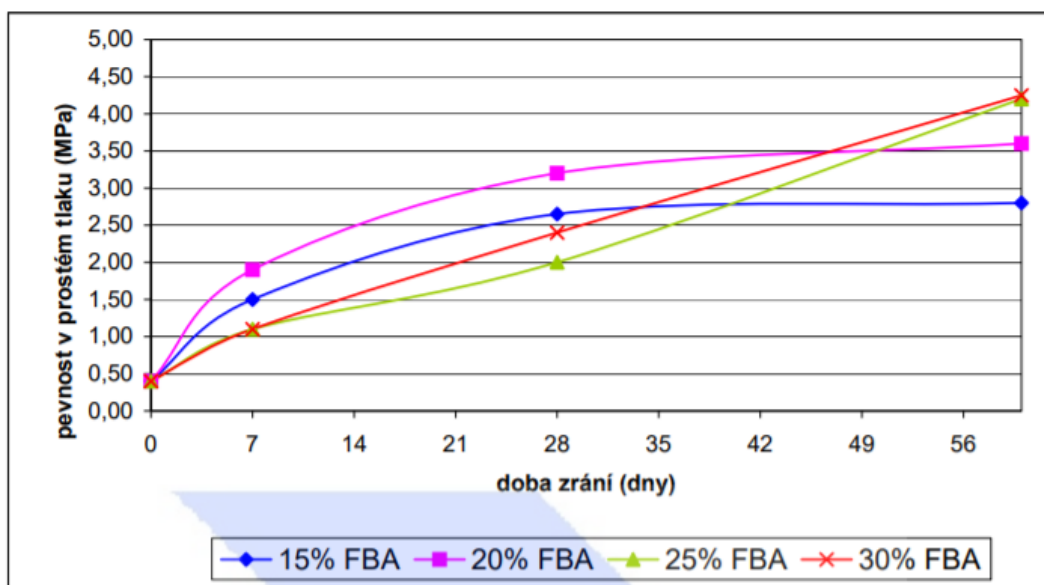
Struska granulovaná, popsána výše, se nejčastěji dává v rozmezí 8 – 20 % v závislosti na použitém druhu aktivátoru, předdrcená struska se používá v rozmezí od 8 – 15 %. Tento druh materiálu tuhne a tvrdne velice pomalu, což je výhodné, jelikož se tak značně prodlužuje doba zpracovatelnosti směsi [22]. Vysokopecní struska se v České republice k úpravě zemin nepoužívá. Většina produkce se zpracovává v cementárenském průmyslu pro výrobu struskových a struskoportlandských cementů [27].

Popílkvy

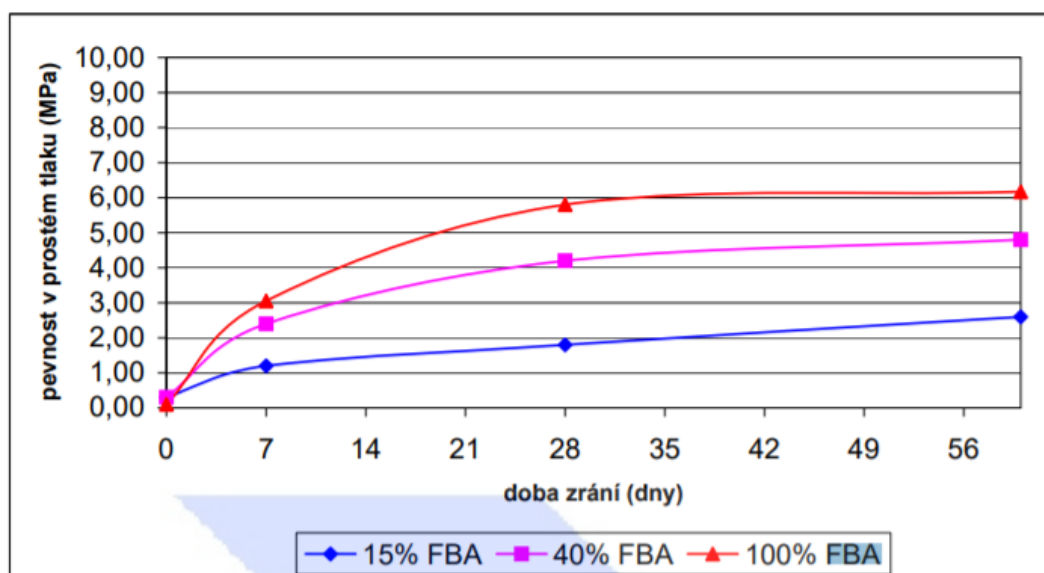
V elektrárnách, teplárnách a dalších provozech využívajících fluidní spalování fosilních paliv vznikají křemičito-hlinitanové nebo křemičito-siřičité popílkvy. Tyto popílkvy mají podobu jemného prášku o zrnitosti 0/0,2 mm, který je tvořen sklovitými kuličkami nebo skořápkami obsahující množství CaO v rozmezí od 5 do 35 %, což dodává popílkům schopnost reagovat s vodou a vytvářet sloučeniny, které mají vlastnosti pojiv.

Různý obsah CaO v popílcích lze kompenzovat přidáním vápna, které navíc ovlivňuje pH prostředí a iniciuje reakci. Následkem toho začnou stálé vápenné silikáty a alumináty krystalizovat a zvyšovat pevnost zeminy. Popílek lze používat v kombinaci s cementem, ovšem je vždy nutné nejprve dávkovat popílek a až následně cement. Dávkování popílku z fluidního spalování se nejčastěji pohybuje od cca 5 do 10 % za přítomnosti 1 až 2 % cementu nebo vápna [22].

Aplikací popílku dochází ke zvýšení pevnostních charakteristik směsi. Růst těchto vlastností závisí mimo jiné na plasticitě upravovaných zemin. Na níže přiložených grafech (Obrázek 31 a 32) lze vidět průběhy pevnosti v prostém tlaku, závislé na množství tohoto materiálu (popílku) v čase. Porovnáním obou grafů ověříme skutečnost, že pevnost na plasticitě závisí [27].

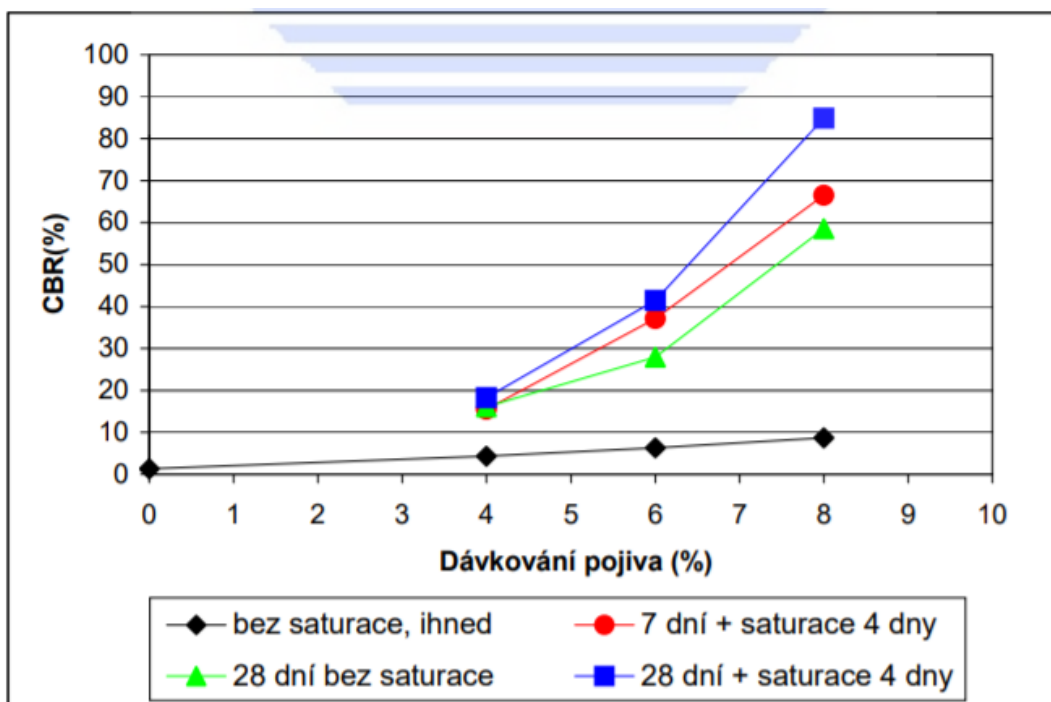


Obrázek 31. Závislost hodnoty pevnosti v prostém tlaku na době zrání jílu s nízkou plasticitou (CL) upravených popílkem (FBA) [27]

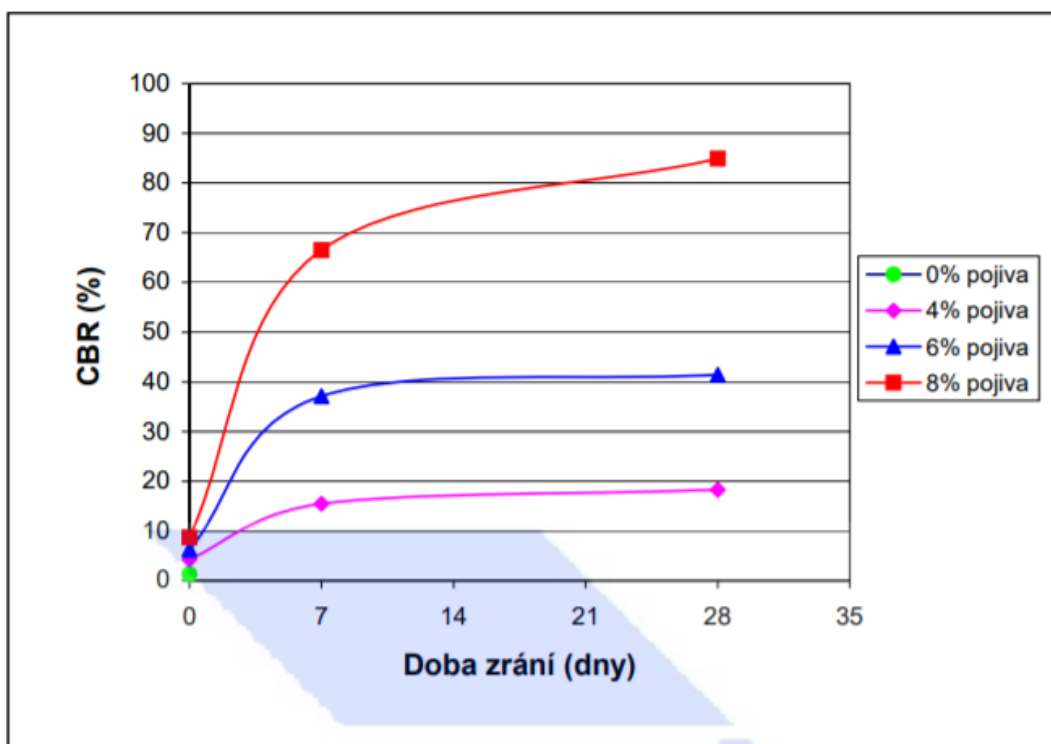


Obrázek 32. Závislost hodnoty pevnosti v prostém tlaku na době zrání jílu s vysokou plasticitou (CH) upravených popílkem (FBA) [27]

Kromě růstu pevnosti v prostém tlaku dochází ve směsi taktéž k růstu hodnot CBR. Tento růst je ovšem pomalejší než v případě vápna či cementu a je dán menším počtem volných kationtů Ca^{2+} v popílcích. Růst hodnot CBR ve směsi fluidních popílků z Třineckých železáren, vápna a sprašové hlíny je znázorněn na následujících dvou grafech (Obrázek 33 a 34).



Obrázek 33. Závislost hodnoty CBR zeminy (CI) upravené směsným pojivem (popílek/vápno 80:20 %) na saturaci vzorků, obsahu pojiva a době zrání [27,48]



Obrázek 34. Závislost hodnoty CBR po saturaci (4 dny) zeminy upravené pojivem (80 % popílku: 20 % vápna) na obsahu pojiva a době zrání [27,48]

Další materiály

Mezi materiály k úpravě zemin dále ředíme odprašky z rotačních pecí cementáren nebo umělé či přírodní pucolány. Tyto materiály se vyznačují pomalým tuhnutím, stejně jako tomu bylo například u strusky, a proto usnadňuje manipulaci na stavbě. Mechanické pevnosti nabývají svých hodnot pomalu, ale časem dosahují uspokojivých hodnot. Množství těchto pojiv pro úpravu zemin se nejčastěji pohybuje od 15 do 25 % v závislosti na upravované zemině [22].

2.9.3 Průkazní a kontrolní zkoušky

2.9.3.1 Průkazní zkoušky

Průkazními zkouškami se dle TP94 ověřuje shoda vlastností materiálů a výsledné směsi s požadavky ČSN a TP. Průkazní zkoušky mohou provádět pouze laboratoře s patřičnou způsobilostí. Tyto zkoušky se dělí na zkoušky jednotlivých materiálů [27]:

- Zkoušky zemin
- Zkoušky pojiv
- Zkoušky upravených zemin

2.9.3.1.1 Zkoušky zemin

Dle TP76 se za průkazní zkoušky sypanin považují výsledky geotechnického průzkumu pro dokumentaci stavby, jejichž rozsah pro budování násypového tělesa a aktivní zóny je uveden v ČSN 736133. V případě návrhu úpravy zemin pojivy se zjišťuje [27]:

- Zrnitost
- Vlhkost zeminy
- Číslo plasticity I_p
- Mineralogické a chemické složení zeminy
- Zhutnitelnost podle Proctor Standard
- Poměr únosnosti CBR a IBI
- Namrzavost

2.9.3.1.2 Průkazní zkoušky pojiv

Za průkazní zkoušky pojiv se považují doklady, které musí zhotovitel před zahájením prací doložit objednateli. Jedná se o Prohlášení o shodě vydané výrobcem/dovozcem, ES prohlášení o shodě, Prohlášení o vlastnostech a Prohlášení shody.

2.9.3.1.3 Upravené zeminy

Zeminy určené k úpravě musí být ověřeny/posouzeny zhotovitelem, zda odpovídají geotechnickému průzkumu. U těchto zemin se posuzuje zrnitost zeminy před dávkováním pojiva, vlhkost zeminy před dávkováním, číslo plasticity před dávkováním, vlhkost směsi po dávkování, zhutnitelnost po dávkování (Proctor Standard), bobtnavost po dávkování, zkouška IBI a dávkování pojiva (stanovení množství pojiva). U aktivní zóny se dále prokazuje objemová stálost upravené zeminy zkouškou bobtnání a namrzavost [27]. Požadované hodnoty průkazních zkoušek upravených zemin jsou v následující tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1. Průkazní zkoušky upravených zemin dle ČSN 73 6133 [27]

Vlastnost		Požadavek	Zkouška	Podmínky zkoušky
Zrnitost		kritéria použitelnosti podle tab. 1	ČSN CEN ISO/TS 17892-4	při mechanické úpravě
Číslo nestejnozrnnosti			Příloha A ČSN 73 6133	jen pro <i>S</i> nebo <i>G</i>
Max. objemová hmotnost (Proctor Standard)		deklarovaná hodnota	ČSN EN 13286-2	U zemin jemnozrnných nebo směsí zemin jemnozrnných a hrubozrnných kde lze zkoušku provést
Optimální vlhkost (dtto)				
CBR	aktivní zóna	podloží CBR P III 15 % P II 30 % P I 50 %	ČSN EN 13286-47	Platí i pro ztužující vrstvu vrstevnatého násypu. Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-10 až 14
	násyp a podloží násypu	deklarovaná hodnota min. 10 %		Pro účely kontrolních zkoušek. Zkouší se bezprostředně po zhotovení zkušebního úseku
Objemové změny (bobtnání)	aktivní zóna	max. 3%	ČSN EN 13286-47	lineární bobtnání při zkoušce CBR
Namrzavost	aktivní zóna	deklarovaná hodnota	zmitostní kritérium (obr.A.1 ČSN 736133)	V případě pochyb nebo pro zeminy upravené pojivy. Zkouška podle ČSN 72 1191.

2.9.3.2 Kontrolní zkoušky

Kontrolní zkoušky se realizují převážně na upravené zemině. Jejich cílem je ověřit, zda se vlastnosti zemin shodují s průkaznými zkouškami a odpovídají projektové dokumentaci. Kontrolní zkoušky se provádí podle normy ČSN 73 6133 a TP94. Četnost kontrol a minimální požadavky jsou v tabulce 2 a 3. Kontrolními zkouškami upravených zemin rozumíme [27]:

- Dávkování pojiva
- Hloubka promísení
- Hrudkovitost zeminy
- Zkoušky pojiva

Kontrola dávkování pojiva je nutná při každé nové dodávce. Důvodem je, že pojivo s každou dodávkou může vykazovat určité odchylky v objemové hmotnosti, které se při objemovém dávkování projeví. Kontrola se provádí tak, že se nechá nadávkovat pojivo dávkovací technikou na známou plochu a následně se pojivo zváží. Jako kontrolní plochu je vhodné volit ocelové vaničky s vystouplými okraji, aby nedošlo ke stržení pojiva pojezdem dávkovacího stroje. Tato kontrola není řízena žádnou technickou normou.

U kontroly promísení se sleduje, zda byla dodržena projektem předepsaná hloubka. U zemin upravených vápnem, hydraulickými pojivy s obsahem vápna a zemin upravených vápennými popílky se zkouška provádí nástřikem roztoku fenolftalenu v kopané sondě. Zkouška se realizuje zespodu kopané sondy nahoru a sleduje se chemická reakce mezi upravenou zeminou a fenolftalenem. Tato chemická reakce je vizuálně ověřitelná, neboť zemina zřívá.

Hrudkovitost zeminy po zemní fréze se posuzuje vizuálně a je nutné ji opakovat po každém cyklu před finálním zhutněním. Maximální průměr hrudky zeminy před zhutněním by neměl být větší než 25 mm.

Zkoušky pojiva jsou důležité, jelikož vlivem nesprávné manipulace a dopravou může dojít k poškození, ke kterému se řadí například hydratace způsobená vlhkostí. Takovému pojivo nemusí dostatečně reagovat se zeminou nebo reaguje pomalu. Kontrolu kvality pojiva musí provádět výrobce, ovšem v případě pochybností na stavbě je nutné

odebrat vzorek pojiva z dávkovače, podrobit ho kontrolním zkouškám a následně výsledky kontrolní zkoušky porovnat s daty od výrobce [27].

Tabulka 2. Kontrolní zkoušky při úpravě zemin pojivy [27]

Vlastnost /Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost ^a
stejnóměrnost a hloubka promísení	zeminy upravované pojivy		TP 94	podloží násypu - 1x5000 m ² , násyp - 1x3000 m ² nebo 1x2000 m ³ , aktivní zóna - 1x2000 m ² nebo 1x1000 m ³ (v případě aktivní zóny složené ze dvou vrstev se kontroluje pouze vrstva spodní. Horní vrstva se kontroluje jako pláň), zemní pláň - 1x2000 m ²
dávkování pojiva	zeminy upravované pojivy	±10% od předepsaného množství	TP 94	1 x 5000 m ² nebo při každé nové dodávce
hrudkovitost	zeminy upravované pojivy	průměr hrudky - max. 25 mm	TP 94	po každém cyklu úpravy
zkoušky pojiva	zeminy upravované pojivy	parametry stanovené výrobcem	TP 94	1x 10000 m ³

Tabulka 3. Kontrolní zkoušky čerstvé směsi upravených zemin [27]

Vlastnost		Požadavek	Četnost ^{1), 3)}
Minimální vlhkost ¹⁾		$W_{0,90}$	1 x na 10 000 m ³
IBI min.	aktivní zóna	min. deklarovaná hodnota	1 x na 10 000 m ³
	násyp	min. 10 %	1 x na 10 000 m ³
¹⁾ Podle ČSN EN 14 227-10, ČSN EN 14 227-11, ČSN EN 14 227-12, ČSN EN 14 227-13, ČSN EN 14227-14 ³⁾ Uvedené údaje tabulky platí pro homogenní poměry. Při změně materiálu se musí provést všechny zkoušky. Při změně konzistence se stanoví pouze vlhkost.			

Na čerstvě upravené zemině provádíme kontrolní zkoušky dle následujících tabulek (Tabulka 4 a 5). Tyto zkoušky se liší, jedná-li se o zemní pláň a těleso. Výsledkem zkoušek na upravené zemině je charakterizování daného úseku a případné odhalení slabých míst s nedostatečnou kvalitou zpracování [27].

Tabulka 4. Kontrolní zkoušky na zemní pláni pro zeminy upravené podle ČSN 73 6133 [27]

Vlastnost /Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost
Modul přetvárnosti $E_{def, 2}$ ^a	CBR > 15% (PIII)	45 MPa ^b	ČSN 72 1006	1 x na 100 bm dopravního pásu, popř. 1x na 1000 m ² ostatních ploch
	CBR > 30% (PII)	60 MPa		
	CBR > 50% (PI)	90 MPa		
^a Prokázání minimálních hodnot CBR pro uvedené typy podloží vozovek nemusí zaručit dosažení požadovaného modulu přetvárnosti ^b Pro vozovky s dopravním zatížením třídy VI nebo s návrhovou úrovní porušení D2 platí min. 30 MPa				

Tabulka 5. Kontrolní zkoušky při provádění a po dokončení zemního tělesa z upravených zemín dle ČSN 73 6133 [27]

Vlastnost / Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost ^a
Vlhkost	jemnozrnné zeminy	odchylky od w_{opt} -5% až +3%	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 x 1250 m ² nebo 500 m ³
Míra zhutnění dle objemové hmotnosti (parametr D)	podloží násypu	92% PS	ČSN 72 1006	1 x 4000 m ² nebo 1500 m ³ a při každé změně sypaniny u homogenní sypaniny nejméně 3 x denně
	násyp z jemnozrnných (F) nebo písčitých zemín (SW, SP, SF) nebo popílku	95% PS		
	aktivní zóna / zemní pláň	100% PS		
Minimální vlhkost	zeminy upravené	$w_{0,90}$	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 x 10000 m ³ nebo 1 x denně
CBR	ztužující vrstva vrstevnatého násypu	min. 15%	ČSN EN 13286-47	
IBI	aktivní zóna	min. deklarovaná hodnota		
	násyp podloží násypu	min. 10% min. 10%		

^a Jsou-li uvedena 2 kritéria četnosti zkoušek, musí být splněno kritérium přísnější

3 Početní část

V této části se budu věnovat návrhu a statickému posouzení dálničního tělesa. Výstavby této dopravní komunikace jsem se přímo účastnil během povinné praxe. Na této praxi jsem byl svědkem mnoha konstrukčních a realizačních problémů během výstavby armovaného násypu, což mi dalo nový pohled na danou problematiku. Praxe mi také dala zkušenosti s realizací takovýchto staveb. V následujícím výpočtu se věnuji jednomu konkrétnímu příčnému řezu, u kterého jsem navrhnul vlastní způsob vyztužení. Vstupní parametry zemin a podloží byly převzaty z reálného IG průzkumu.

3.1 Návrh a statický výpočet armovaného násypu

3.1.1 Úvod do početní části

Předmětem návrhu vyztužení a statického výpočtu posouzení stability je příčný řez dálničního násypu na dálnici D6. Toto dálniční těleso se nachází na 41,200 až 41,750 km ve směru z Prahy na Karlovy Vary. Těleso je zbudováno ze zemin vytěžených ze zářezů při výstavbě přilehlých úseků a je vyztuženo vyztužnými geomřížemi v rozsahu od 41,240 – 41,360 a 41,580 – 41,680 km. Cílem výpočtu je navrhnout a staticky posoudit jiný přístup k vyztužení, než je realizovaný na této stavbě.

3.1.2 Podklady pro návrh a posouzení

3.1.2.1 Projektové podklady

- Příčný řez, zpráva podrobného GTP stavby

3.1.2.2 Normy a předpisy

- ČSN EN 1997-1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla. 1 EU/ČR: ÚNMZ, 2006
- ČSN EN 14475: Provádění speciálních geotechnických prací – Vyztužené zemní konstrukce. 1. EU/ČR: ÚNMZ, 2006
- ČSN EN 1998-1: Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby. 1. EU/ČR: ÚNMZ, 2006
- ČSN 73 6133: Návrh a provádění tělesa pozemních komunikací. 1. EU/ČR: ÚNMZ, 2010
- TP97: Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací. 1. Praha: SG GEOTECHNIKA, a.s., 2008

3.1.3 Softwarová podpora

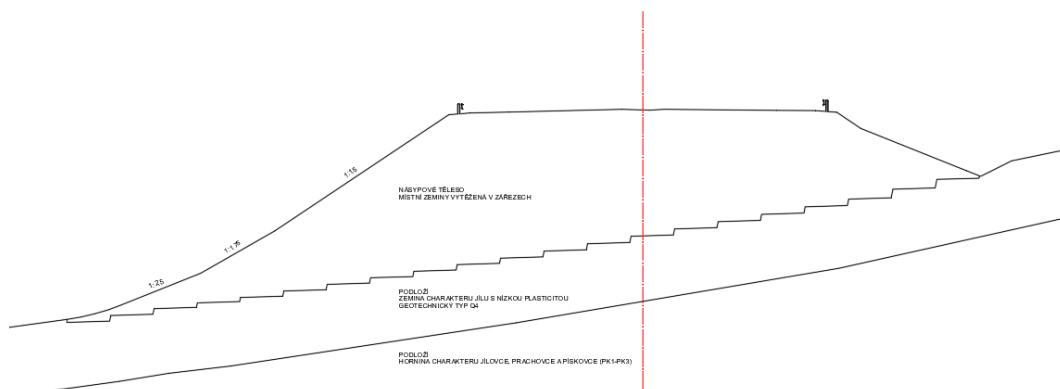
Statické posouzení návrhu je provedeno za pomoci programu GEO5. Během výpočtu je řešena rovnováha sil (a momentů) podél uvažované smykové plochy, přičemž kritická smyková plocha (s nejmenším stupněm bezpečnosti) je nalezena iteračním postupem.

Program Stabilita svahu je obecně určen k výpočtu vrstevnatého zemního tělesa. Pomyslná smyková plocha může být v programu řešena jako kruhová (Bishopova, Fellenius/Petersonova, Spencerova, Janbova, Morgenstern – Pricova, Šachuňancova či ITF metoda), nebo polygonální (Sarmova, Spencerova, Janbova, Morgenstern – Pricova, Šachuňancova či ITF metoda). Dále lze program stabilita svahu využívat k výpočtu zářezů a kotvených opěrných konstrukcí.

3.1.4 Vstupní parametry

3.1.4.1 Geometrie konstrukce

Předmětem návrhu a posouzením je příčný řez v km 41,320 s výškou 14,5 m a sklonem 1:1,5 v horní části násypového tělesa, 1:1,75 ve střední části a 1:2,5 v dolní části. Geometrie svahu je na následujícím obrázku (Obrázek 35).



Obrázek 35. Schéma příčného řezu

3.1.4.2 Výztužné geomříže

Tento výztužný materiál zajišťuje stabilitu násypového tělesa. Do konstrukce byly navrženy jednoosé geomříže Miragrid GX 55/30 a Miragrid GX 160/30. Tyto výztužné materiály jsou vyrobeny z vysoce pevného polyesteru PET a jsou chráněny černým polymerním povlakem. Mechanické parametry těchto geomříží jsou následující (Tabulka 6).

Tabulka 6. Mechanické parametry geomříží

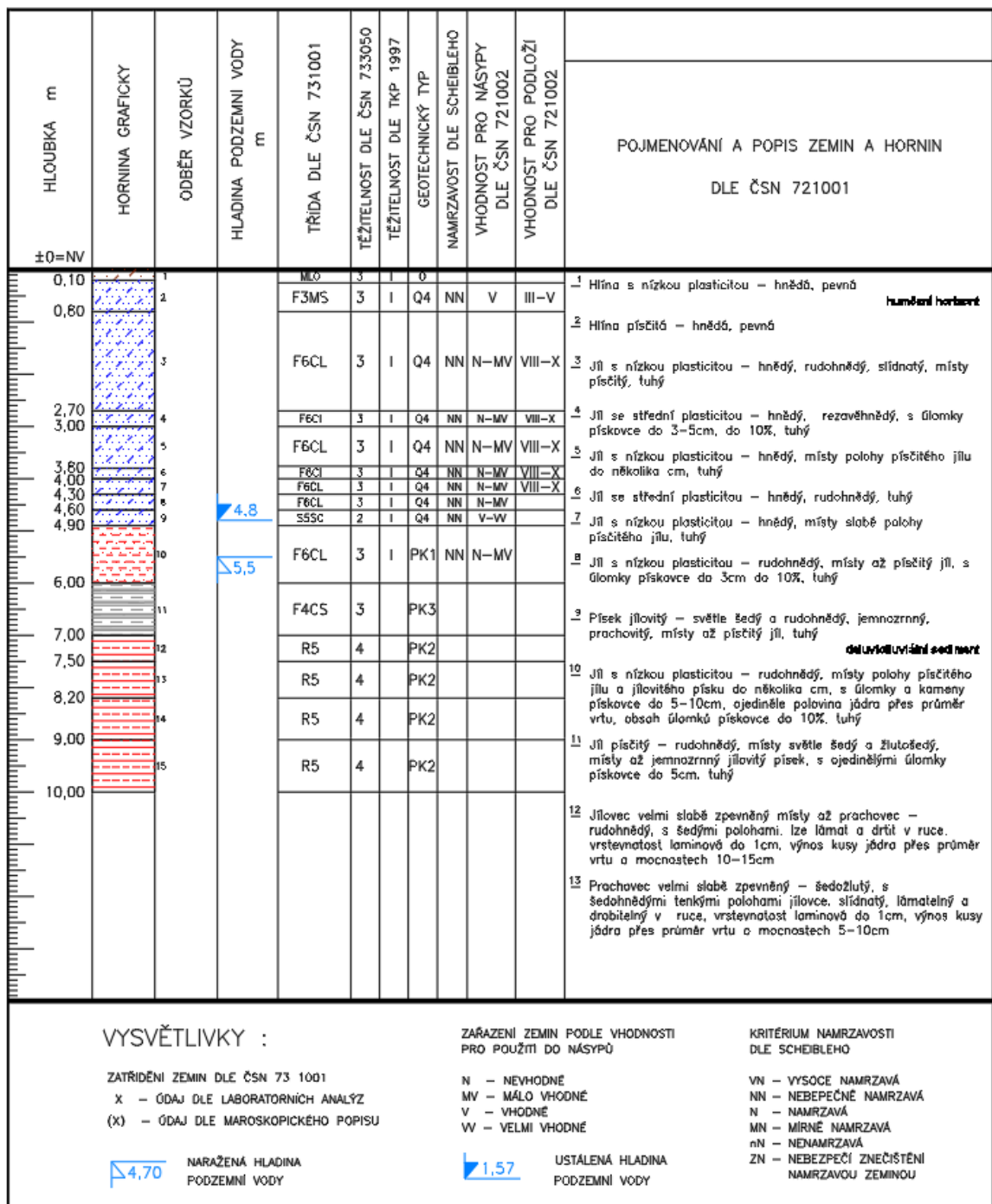
		Miragrid GX55/30	Miragrid GX160/30	
	Symbol	Hodnota	Hodnota	Jednotky
Charakteristická krátkodobá pevnost	T_k	58	168	kN/m
Tolerance	ΔT_k	-2,9	-8	kN/m
Součinitel creepu	F_c	1,56	1,56	-
Součinitel vlivu prostředí	F_d	1,05	1,05	-
Součinitel poškození při instalaci	F_{id}	1,1	1,08	-
Výpočtová pevnost	T_d	30,6	90,4	kN/m

3.1.4.3 Interakce mezi zemínou a výztuhou

Vyztužení zeminy výztužnými prvky vyžaduje řádné mechanické spolupůsobení mezi geomříží a zemínou. Tato interakce je do výpočtu vnesena skrze interakční součinitel C , jehož hodnota je standardně uvažována jako 0,8.

3.1.4.4 Parametry zemin v podloží

V zájmovém úseku bylo provedeno několik geologických vrtů. Díky těmto vrtům mohl být sestaven podrobný geologický řez dotčeným územím. Rozbor jednoho vrtu je na následujícím obrázku (Obrázek 36). Do výpočtu byly použity parametry zemin v podloží na základě IG průzkumu (Tabulka 7).



Obrázek 36. Dokumentace geologického vrtu

Tabulka 7. Charakteristické parametry zemin v podloží

Geotechnický typ		Q4	PK1 – PK3
Objemová tíha	γ [kN.m ⁻³]	19,0	20,0
Úhel vnitřního tření	Φ_{ef} [°]	19,0	28,0
Soudržnost	C_{ef} [kPa]	12,0	20,0

3.1.4.5 Zazubení

Násypové těleso bude zazubeno do původního terénu v celém rozsahu příčného řezu tak jak je znázorněné na schématu příčného řezu.

3.1.4.6 Parametry násypového tělesa

Násypové těleso je tvořeno z místních zemin získaných při budování zářezu na trase komunikace. Dle IG průzkumu jsou do výpočtu uvažovány následující mechanické parametry zemin (Tabulka 8).

Tabulka 8. Charakteristické parametry zemin násypového tělesa

Objemová tíha	γ [kN.m ⁻³]	19,0
Úhel vnitřního tření	Φ_{ef} [°]	26
Soudržnost	C_{ef} [kPa]	0,0

3.1.4.7 Podzemní voda

Do výpočtu je podzemní voda zahrnuta na základě IG průzkumu. Hladina podzemní vody je uvažována v hloubce 4,8 m pod úrovní původního terénu.

3.1.4.8 Zatížení od dopravy

Zatížení proměnné (dopravou) se na základě normy ČSN 736133 v České republice uvažuje jako rovnoměrné zatížení povrchu vozovky $q = 10$ kPa (charakteristická hodnota). Pro posouzení stability násypu se v souladu s normou ČSN EN 1997 upravuje nepříznivě působící proměnné zatížení součinitelem spolehlivosti $\gamma_{sd} = 1,3$.

3.1.4.9 Přírodní seismická

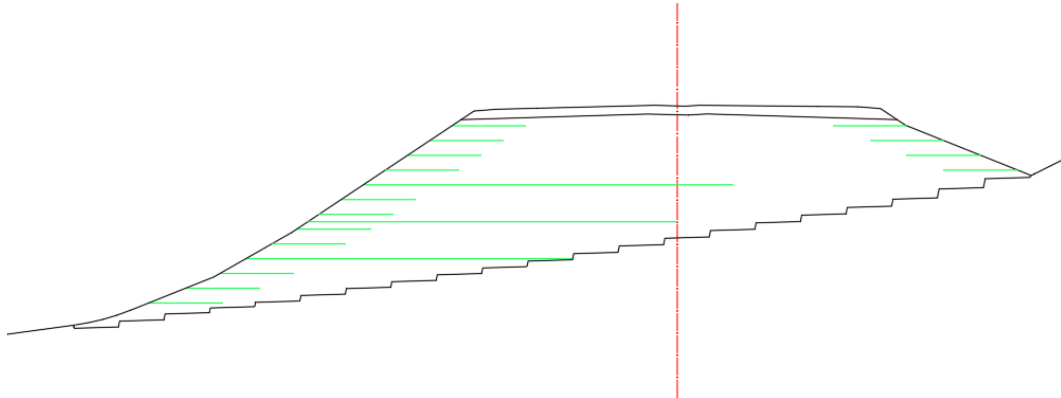
Dle EC8 se vybudovaná konstrukce nenachází v seismické oblasti, a proto účinky seismicity nebyly do výpočtu zahrnuty.

3.1.4.10 Návrhový přístup

Geotechnická konstrukce je prostřednictvím programu GEO5 posouzena s parciálními součiniteli bezpečnosti dle Návrhového přístupu 3.

3.1.5 Návrh vyztužení tělesa

Dálniční těleso bylo navrhováno a podrobováno stabilitním výpočtům hned několikrát. Vyztužení bylo doplněno či prodlouženo vždy na základě předchozího výpočtu a zobrazení smykové plochy. Tímto způsobem bylo dosaženo finálního návrhu vyztužení tělesa (Obrázek 37).

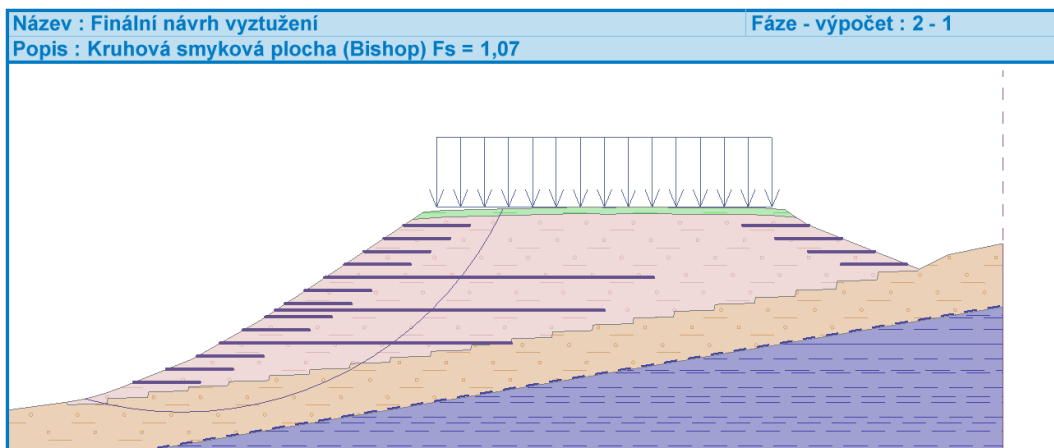


Obrázek 37. Finální návrh vyztužení

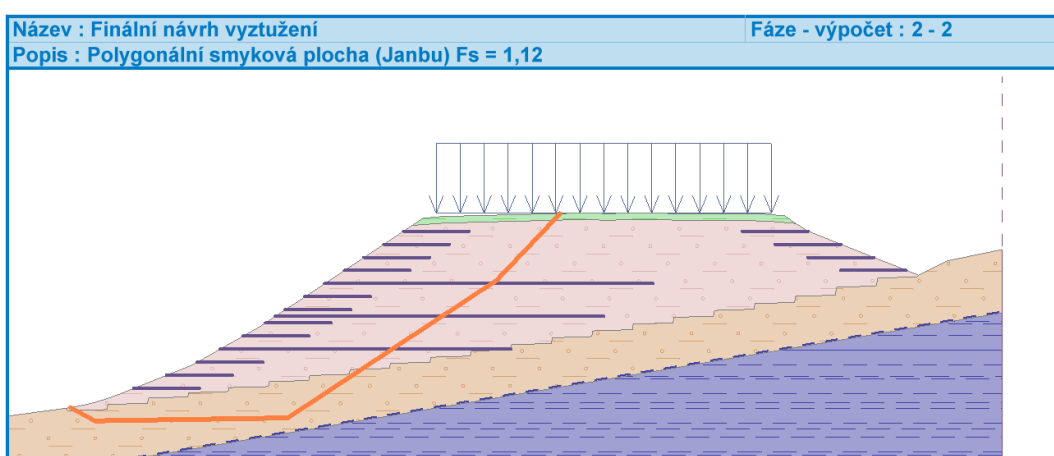
Finální návrh je tvořen při pohledu ve směru staničení v levé části 11 kusy 5 metrů dlouhými geomřížemi typu GX55/30 a 3 kusy 25 metrů dlouhými geomřížemi typu GX160/30. Pravá část je vyztužena čtyřmi kusy pětimetrových geomříží typu GX55/30. Poslední vrstva výztuh je umístěna 1 m pod korunou násypu. Každá vrstva je vertikálně vzdálená 1 m, až na jednu výjimku, kterou je střední 25 metrů dlouhá geomříž. Tato geomříž půlí vzdálenost mezi pětimetrovými geomřížemi a je tedy vzdálená 0,5 m od spodní a vrchní výztuhy.

3.1.6 Posouzení návrhu programem GEO5

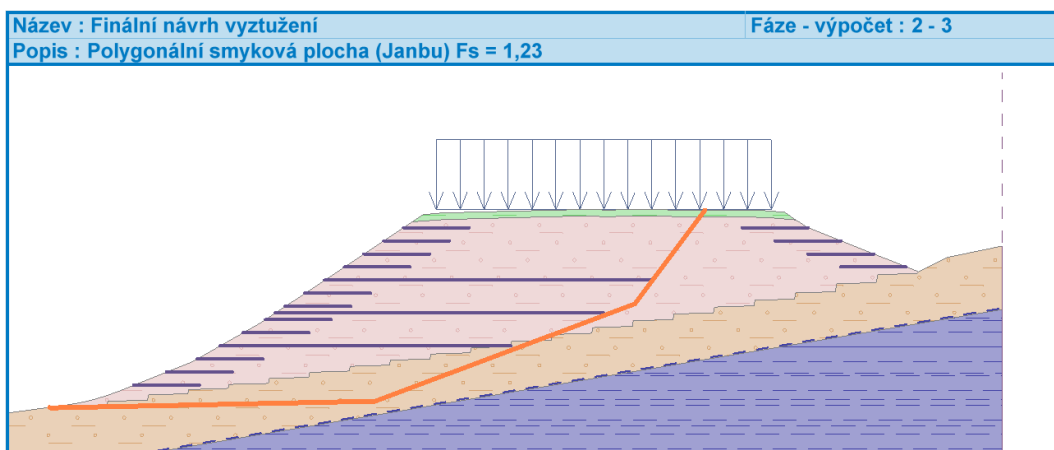
Na základě výše uvedených vstupních parametrech jsou níže zobrazeny výsledky stabilitního výpočtu (Obrázek 38 – 45). Kompletní výpočet této úlohy je přílohou tohoto dokumentu. První stabilitní výpočet byl proveden metodou Bishop. Stupeň stability v tomto případě byl programem vypočten na 1,07 (Fs).



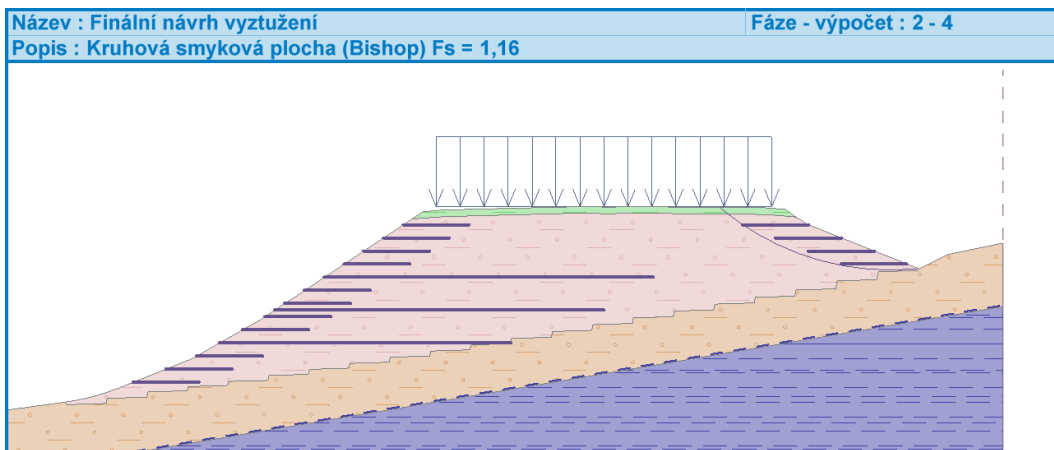
Obrázek 38. Kruhová smyková plocha (Bishop) $F_s = 1,07$



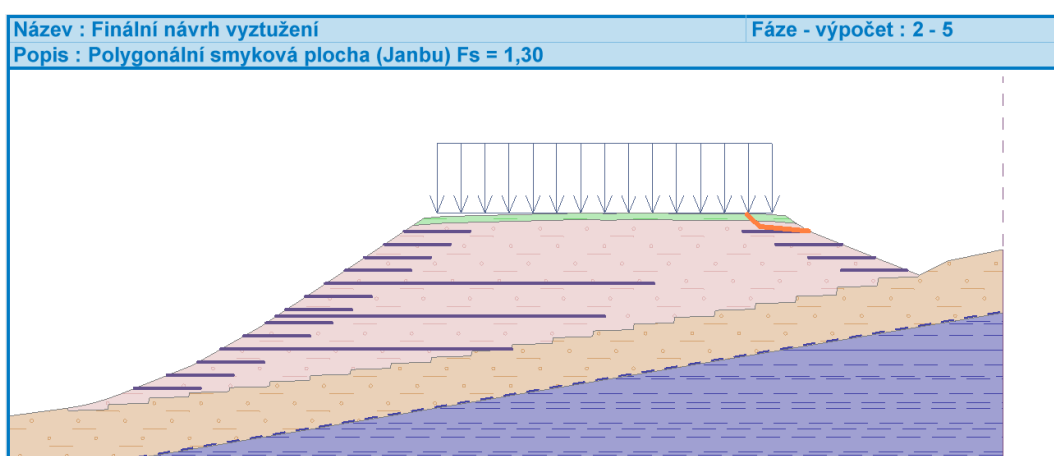
Obrázek 39. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,12$



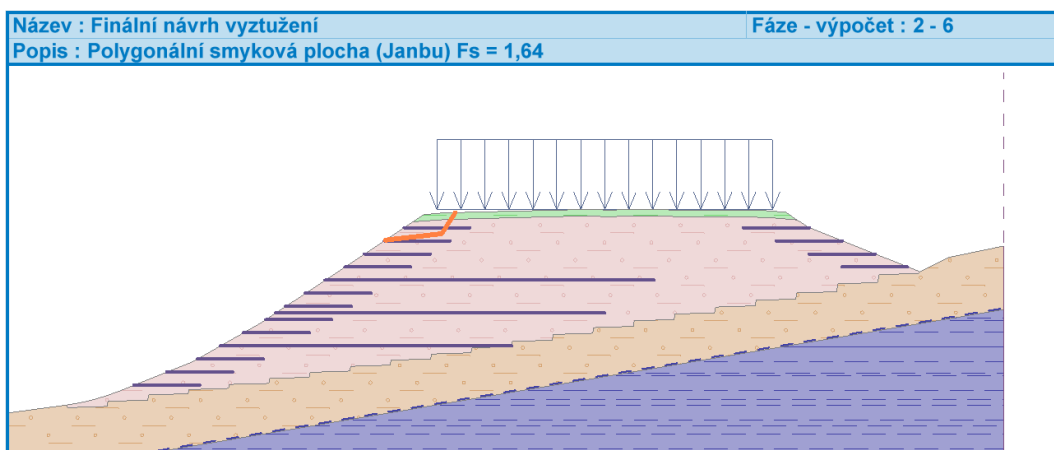
Obrázek 40. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,23$



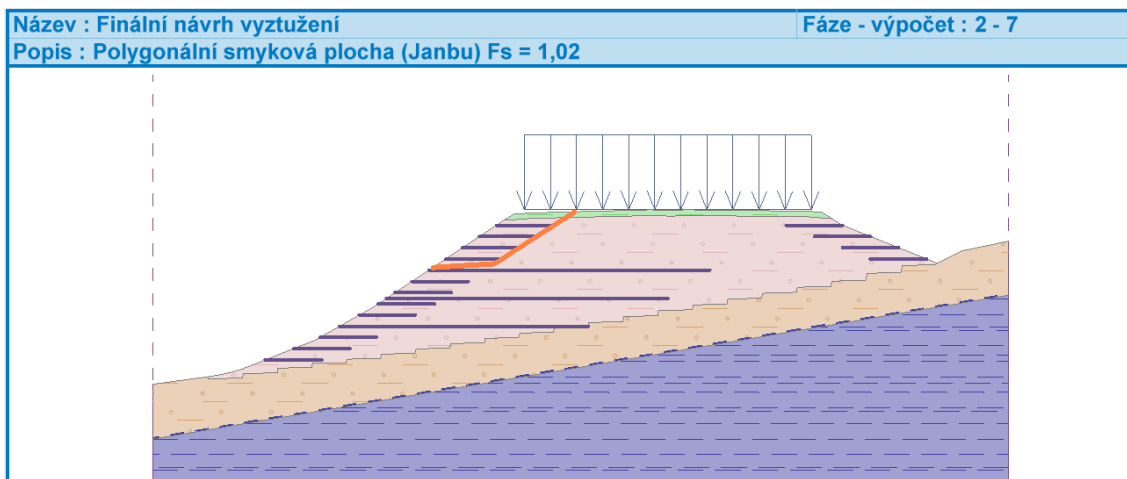
Obrázek 41. Kruhová smyková plocha (Bishop) $F_s = 1,16$



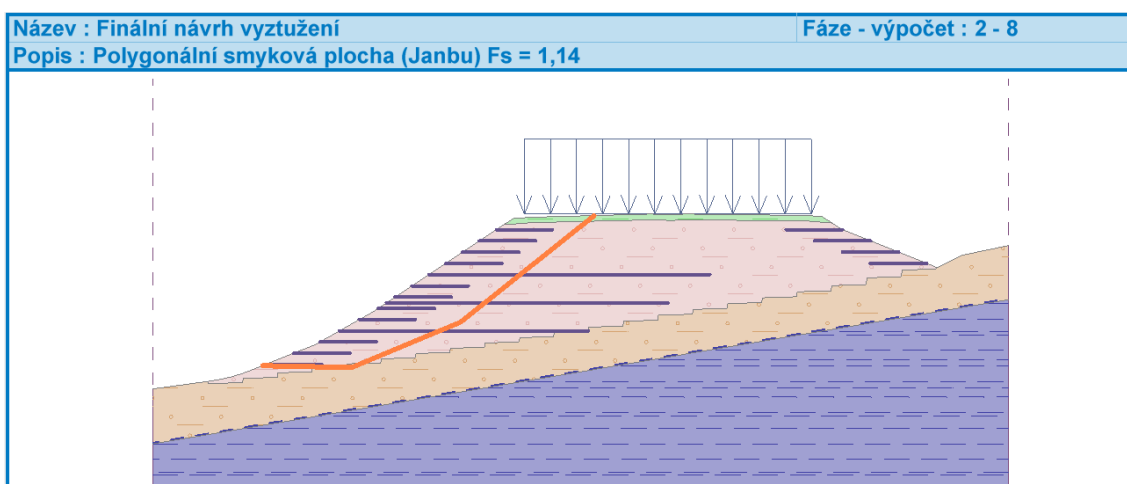
Obrázek 42. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,30$



Obrázek 43. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,64$



Obrázek 44. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,02$

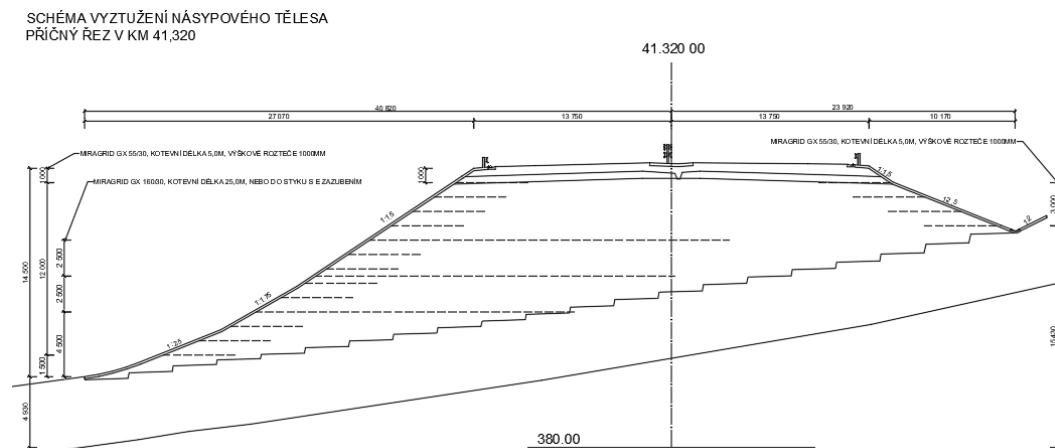


Obrázek 45. Polygonální smyková plocha (Janbu) $F_s = 1,14$

3.1.7 Závěr početní části 1

V této početní části bylo navrženo a posouzeno vyztužení příčného řezu násypového tělesa (Obrázek 46). Maximální svislá výška tělesa je 14,5 m. Charakteristiky zemin v podloží násypu a charakteristiky zemin z nichž je těleso vybudované jsou převzaty z IG průzkumu. Stabilita tělesa je zajištěna dvěma typy výztužných jednoosých geomříží Miragrid GX 55/30 a Miragrid GX 160/30. Tyto geomříže jsou umístěny ve výškových roztečích po 1000 mm.

Kotevní délka geomříže Miragrid GX 55/30 je 5 metrů od líce svahu, zatímco kotevní délka geomříže Miragrid GX 160/30 je 25 metrů od líce, nebo do kontaktu s rostlým terénem. Detailní rozmístění po výšce je znázorněno na schématu. Při ukládání výztuh je nutné, aby výztuhy byly kladeny kolmo na osu komunikace. Součástí tohoto posouzení armovaného násypového tělesa je i kompletní výstup z programu GEO5. Tento výstup je součástí této bakalářské práce jako Příloha 1.



Obrázek 46. Schéma vyztužení násypového tělesa

3.2 Urychlení konsolidace silničního násypu

3.2.1 Úvod do početní části

Předmětem této početní části je návržení svislých geodrénnů v konkrétním staničení na silničním okruhu kolem Prahy. Konkrétně se jedná o stavbu č.512 D1 – Jesenice – Vestec. V místě projekt předpokládá se zbudováním silničního násypu s výškou 6 m z materiálů vytěžených v trase komunikace. Cílem tohoto výpočtu je návržení svislých geosyntetických drénů tak, aby bylo zaručeno, že po 3 měsících od vybudování násypu dojde k dosednutí podloží o méně jak 10 mm.

3.2.2 Podklady pro návrh

3.2.2.1 Projektové podklady

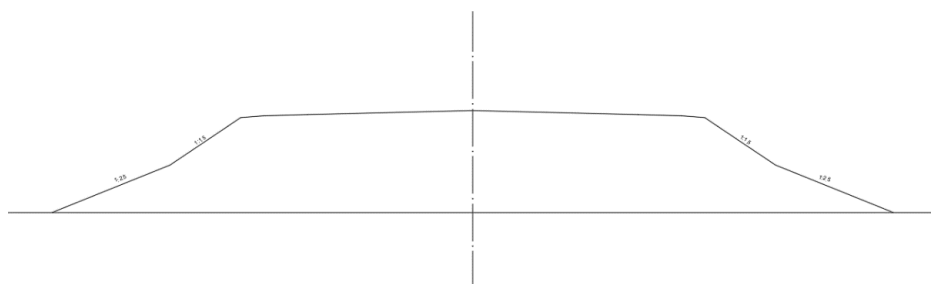
- Podrobný geotechnický průzkum v digitální formě (Sdružení Mott MacDonald - PUDIS, 30.10. /2007)

3.2.3 Geotechnické poměry

Geologické složení je patrné z podélného řezu a geologických dokumentů vrtů, jež je součástí podrobného geotechnického průzkumu. Svrchní část zeminy je tvořena antropogenními navážkami o mocnosti 0,6 m. Pod touto vrstvou se nachází pleistocenní eolicko - deluviální sedimenty (EO – DE) tvořené jíly F4/CS. Následující vrstvou je vrstva fluviálních sedimentů nejistého stáří (pravděpodobně pleistocén) tvořená písčitymi hlíny MS/F3. Horninový podklad je tvořen rozloženými proterozoickými prachovitými břidlicemi třídy R6, které postupně s hloubkou přecházejí až do třídy R3. Hladina podzemní vody se pohybuje bezprostředně pod povrchem.

3.2.4 Vstupní parametry

3.2.4.1 Geometrie násypového tělesa



Obrázek 47. Geometrie násypového tělesa

Sklon svahů násypového tělesa v tomto příčném řezu jsou navrženy dle ČSN 73 6133 a to ve dvou výškových stupních. První stupeň je ve sklonu 1:2,5 s výškou 3 m. Druhý stupeň se stejnou výškou má sklon 1:1,5. Výška násypu, která je charakterizovaná jako výškový rozdíl mezi hranou koruny pozemní komunikace a patní čarou násypového svahu, je 6 m.

3.2.4.2 Vertikální geodrény

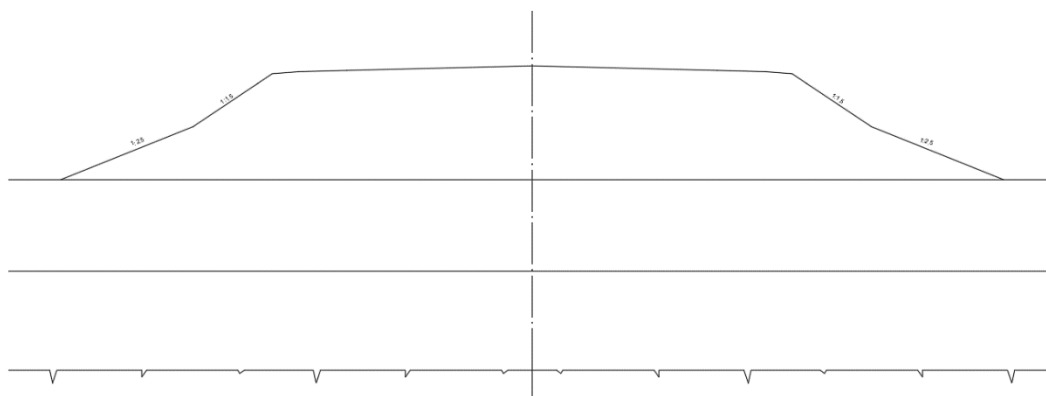
Pro tento návrh budou použity vertikální geodrény Colbondrain CX1000 od společnosti Colbond Geosynthetics. Jedná se o kompozit polyesterové filtrační netkané textilie a prostorového drenážního jádra z polyesterových vláken. Šířka geodrény je 100 mm a síla 3,6 mm.

3.2.4.3 Materiály násypu

Násypové těleso je tvořeno z místních zemin získaných při budování zářezu na trase komunikace s objemovou tíhou $\gamma = 21,09 \text{ kN.m}^{-3}$.

3.2.4.4 Podloží násypu

Podloží násypu je ve výpočtu uvažováno ve dvou vrstvách viz Obrázek 48. První vrstva nacházející se nad skalním podložím, které je ve výpočtu uvažováno jako nestlačitelné a nepropustné, má mocnost 5,6 m. Tato vrstva fluviačních sedimentů nejistého stáří (pravděpodobně pleistocén) je tvořena písčitymi hlínami MS/F3. Druhou vrstvou nacházející bezprostředně pod násypovým tělesem je vrstva pleistocenních eolicko-deluviálních sedimentů (EO – DE) tvořených jíly CS/F4 s mocností 5,2 m. Konkrétní charakteristiky zemin jsou v tabulce 9.



Obrázek 48. Schéma násypového tělesa a podloží

Tabulka 9. Charakteristiky zemín

Charakteristika	CS/F4	MS/F3	Jednotky
γ	21,67	21,09	[kN.m ⁻³]
γ_{sat}	21,79	21,22	[kN.m ⁻³]
E_{oed}	12,84	16,05	[MPa]
C_{ef}	50,00	35,00	[kPa]
Φ_{ef}	25,00	25,10	[°]
c_v	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	[m ² .s ⁻¹]
c_h	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	[m ² .s ⁻¹]

3.2.4.5 Hladina podzemní vody

Hladina podzemní vody je uvažována v úrovni terénu.

3.2.5 Výpočty

3.2.5.1 Výpočet celkového sedání

Pro výpočet celkového sedání pod násypem byl použit sumační postup s uvážením strukturální pevnosti (Rovnice 2). Při konsolidaci bude docházet k drénování zeminy pouze vzhůru, neboť báze je nepropustná. Výpočet byl proveden v ose tělesa, kde Rovnice 1 (Kézdiho rovnice) svislého přitížení je ve tvaru:

Rovnice 1. Kézdiho rovnice

$$\sigma_z = \frac{2\sigma_{oL}}{\pi} \left(\beta + \frac{b}{a} \delta \right)$$

Rovnice 2. Celkové sedání – sumační postup

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z,i} - m_i \cdot \sigma_{or,i}}{E_{oed,i}} \cdot h_i$$

Tabulka 10. Výpočet sedání v ose násypu sumačním postupem

i	h _i	z _i	X _z	z _r	γ _{su}	σ _{z_{0i}}	m*σ _{z_{0i}}	α	β	σ	σ _{zi}	S _i
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[kN.m-3]	[kPa]	[kPa]	[rad]	[rad]	[rad]	[kPa]	[mm]
1	0,5	0,25	1,00	0,25	11,79	2,95	0,59	1,55	1,56	0,01	126,3	4,9
2	0,5	0,75	1,00	0,75	11,79	8,85	1,77	1,52	1,54	0,02	125,8	4,8
3	0,5	1,25	1,00	1,25	11,79	14,74	2,95	1,49	1,52	0,04	125,3	4,8
4	0,5	1,75	1,00	1,75	11,79	20,64	4,13	1,45	1,51	0,05	124,7	4,7
5	0,5	2,25	1,00	2,25	11,79	26,54	5,31	1,42	1,49	0,07	124,2	4,6
6	0,5	2,75	1,00	2,74	11,79	32,43	6,49	1,39	1,47	0,08	123,7	4,6
7	0,5	3,25	0,99	3,22	11,79	38,33	7,67	1,36	1,45	0,10	123,1	4,5
8	0,5	3,75	0,99	3,69	11,79	44,23	8,85	1,33	1,43	0,11	122,6	4,4
9	0,5	4,25	0,98	4,15	11,79	50,12	10,02	1,30	1,42	0,12	122,0	4,4
10	0,7	4,85	0,96	4,67	11,79	57,20	11,44	1,26	1,40	0,13	121,4	6,0
11	0,5	5,45	0,95	5,17	11,22	61,17	12,23	1,23	1,38	0,15	120,7	3,4
12	0,5	5,95	0,94	5,57	11,22	66,78	13,36	1,21	1,37	0,16	120,2	3,3
13	0,5	6,45	0,92	5,94	11,22	72,39	14,48	1,19	1,35	0,16	119,7	3,3
14	0,5	6,95	0,91	6,31	11,22	78,01	15,60	1,17	1,34	0,17	119,2	3,2
15	0,5	7,45	0,89	6,65	11,22	83,62	16,72	1,15	1,33	0,18	118,7	3,2
16	0,5	7,95	0,88	6,98	11,22	89,23	17,85	1,13	1,32	0,19	118,2	3,1
17	0,5	8,45	0,86	7,30	11,22	94,84	18,97	1,11	1,30	0,19	117,7	3,1
18	0,5	8,95	0,85	7,61	11,22	100,45	20,09	1,09	1,29	0,20	117,3	3,0
19	0,5	9,45	0,84	7,90	11,22	106,07	21,21	1,08	1,28	0,20	116,8	3,0
20	0,5	9,95	0,82	8,18	11,22	111,68	22,34	1,06	1,27	0,21	116,4	2,9
21	0,6	10,5	0,81	8,48	11,22	117,85	23,57	1,05	1,26	0,21	115,9	3,5
											Σ	82,6

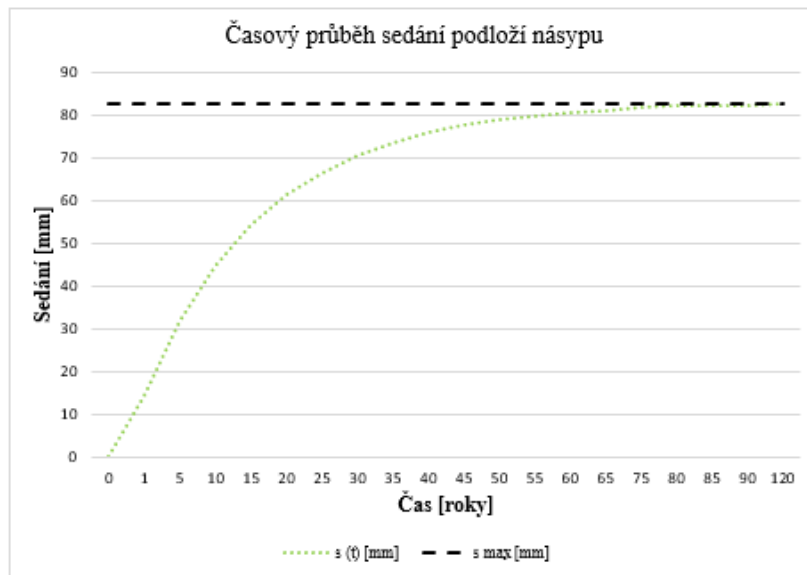
Výsledné sedání podloží v ose násypu sumačním postupem činí 82,6 mm.

3.2.5.2 Výpočet časového průběhu sedání

Postup výpočtu následujících hodnot v tabulce 11. je uveden v příloze 2, včetně použitých rovnic.

Tabulka 11. Výpočet časového průběh sedání

Čas t	Čas t	T	N	U	s (t)
[roky]	[s]	[-]	[-]	[-]	[mm]
1	31536000	0,0230	0,0567	0,1711	14,1
5	157680000	0,1149	0,2835	0,3825	31,6
10	315360000	0,2298	0,5670	0,5397	44,6
15	473040000	0,3447	0,8506	0,6537	54,0
20	630720000	0,4596	1,1341	0,7392	61,1
25	788400000	0,5745	1,4176	0,8036	66,4
30	946080000	0,6894	1,7011	0,8521	70,4
35	1103760000	0,8044	1,9847	0,8886	73,4
40	1261440000	0,9193	2,2682	0,9161	75,7
45	1419120000	1,0342	2,5517	0,9368	77,4
50	1576800000	1,1491	2,8352	0,9524	78,7
55	1734480000	1,2640	3,1187	0,9642	79,7
60	1892160000	1,3789	3,4023	0,9730	80,4
65	2049840000	1,4938	3,6858	0,9797	81,0
75	2365200000	1,7236	4,2528	0,9885	81,7
80	2522880000	1,8385	4,5364	0,9913	81,9
85	2680560000	1,9534	4,8199	0,9935	82,1
90	2838240000	2,0683	5,1034	0,9951	82,2
120	3784320000	2,7578	6,8045	0,9991	82,6



Obrázek 49. Graf časového průběhu sedání podloží násypu

3.2.5.3 Urychlení konsolidace

Stanovení roztečí svislých geodrnů pro urychlení konsolidace bylo provedeno pomocí rovnice prof. Kjellmana (Rovnice 3). Ekvivalentní drenážní průměr D byl vyřešen numerickým řešením Kjellmanovy rovnice, neboť analytické řešení není možné. Doba konsolidace t byla v cíli tohoto výpočtu stanovena na 90 dní a do výpočtu byla dosazena v sekundách. Požadovaný stupeň konsolidace U_h ve vodorovném směru viz. Rovnice 3. Délka hrany (rozteč) trojúhelníka (S) je pro trojúhelníkovou síť $= D/1,05$.

Rovnice 3.

$$(1-U) = (1-U_v) \cdot (1-U_h)$$

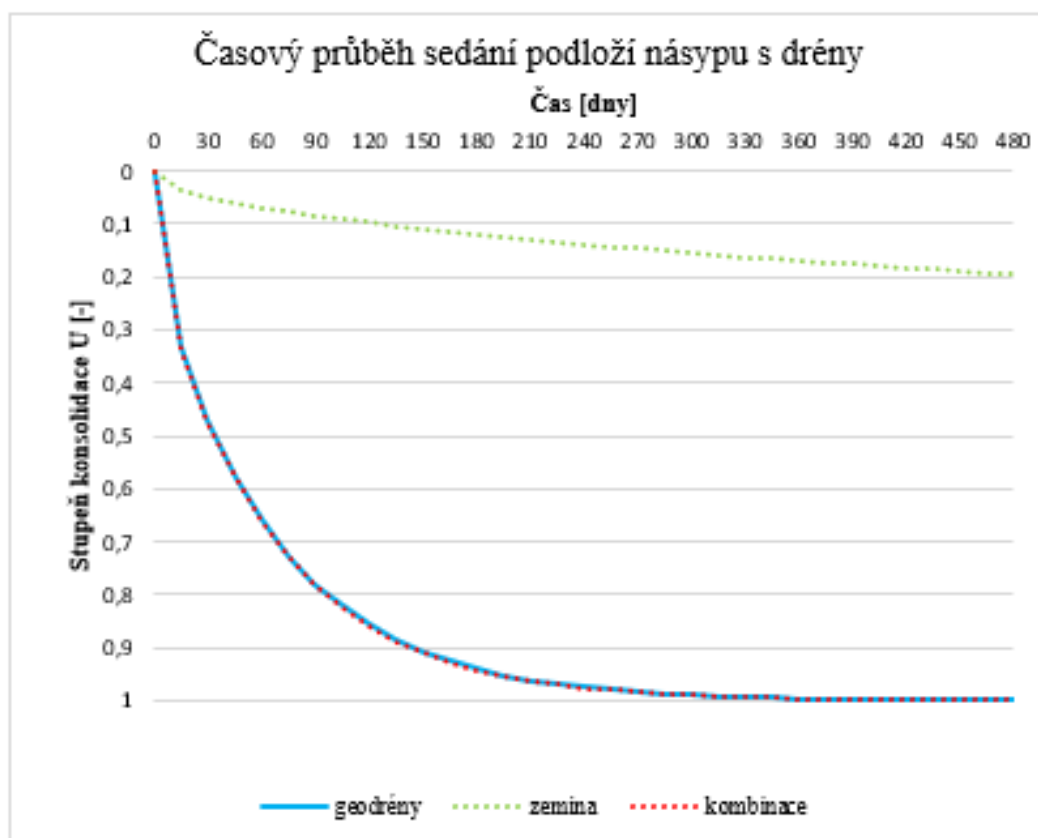
Rovnice 4. Rovnice prof. Kjellmana pro urychlení konsolidace

$$t = \frac{D^2}{8c_h} \left[\ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1-U_h}$$

Numerické řešení Rovnice 3 bylo provedeno za pomoci funkce řešiče programem Microsoft Excel. Výsledkem bylo stanovení drenážního průměru $D = 1,12$ m, tj. rozteč svislých drnů $S = D/1,05 = 1,1$ m.

Tabulka 12. Časový průběh sedání podloží s drény

Čas				Časový faktor		Stupeň konsolidace			N _h	N _v	N _{komb.}
[s]	[dny]	[měsíce]	[roky]	T _h geodrény	T _v zemina	U _h geodrény	U _v zemina	U komb.			
1296000	15	0,5	0,042	0,08777	0,00094	0,33429	0,03667	0,33609	0,21656	0,00233	0,21890
2592000	30	1,0	0,083	0,17554	0,00189	0,47254	0,04955	0,47506	0,43313	0,00466	0,43779
3888000	45	1,5	0,125	0,26331	0,00283	0,57646	0,06021	0,57942	0,64969	0,00699	0,65669
5184000	60	2,0	0,167	0,35108	0,00378	0,65910	0,06940	0,66227	0,86626	0,00932	0,87558
6480000	75	2,5	0,208	0,43885	0,00472	0,72551	0,07756	0,72869	1,08282	0,01165	1,09448
7776000	90	3,0	0,250	0,52662	0,00567	0,77896	0,08495	0,78203	1,29939	0,01398	1,31337
9072000	105	3,5	0,292	0,61439	0,00661	0,82200	0,09175	0,82488	1,51595	0,01631	1,53227
10368000	120	4,0	0,333	0,70216	0,00756	0,85666	0,09808	0,85931	1,73252	0,01864	1,75116
11664000	135	4,5	0,375	0,78993	0,00850	0,88457	0,10403	0,88697	1,94908	0,02097	1,97006
12960000	150	5,0	0,417	0,87770	0,00944	0,90705	0,10966	0,90919	2,16565	0,02330	2,18895
14256000	165	5,5	0,458	0,96548	0,01039	0,92515	0,11501	0,92704	2,38221	0,02563	2,40785
15552000	180	6,0	0,500	1,05325	0,01133	0,93972	0,12013	0,94138	2,59878	0,02796	2,62674
16848000	195	6,5	0,542	1,14102	0,01228	0,95146	0,12503	0,95291	2,81534	0,03029	2,84564
18144000	210	7,0	0,583	1,22879	0,01322	0,96091	0,12975	0,96217	3,03191	0,03262	3,06453
19440000	225	7,5	0,625	1,31656	0,01417	0,96852	0,13430	0,96960	3,24847	0,03495	3,28343
20736000	240	8,0	0,667	1,40433	0,01511	0,97465	0,13871	0,97558	3,46504	0,03729	3,50233
22032000	255	8,5	0,708	1,49210	0,01606	0,97959	0,14298	0,98038	3,68160	0,03962	3,72122
23328000	270	9,0	0,750	1,57987	0,01700	0,98356	0,14712	0,98424	3,89817	0,04195	3,94012
24624000	285	9,5	0,792	1,66764	0,01794	0,98676	0,15115	0,98734	4,11473	0,04428	4,15901
25920000	300	10,0	0,833	1,75541	0,01889	0,98934	0,15508	0,98983	4,33130	0,04661	4,37791
27216000	315	10,5	0,875	1,84318	0,01983	0,99142	0,15891	0,99183	4,54786	0,04894	4,59680
28512000	330	11,0	0,917	1,93095	0,02078	0,99309	0,16265	0,99343	4,76443	0,05127	4,81570
29808000	345	11,5	0,958	2,01872	0,02172	0,99443	0,16631	0,99472	4,98099	0,05360	5,03459
31104000	360	12,0	1,000	2,10649	0,02267	0,99552	0,16988	0,99576	5,19756	0,05593	5,25349
32400000	375	12,5	1,042	2,19426	0,02361	0,99639	0,17339	0,99659	5,41412	0,05826	5,47238
33696000	390	13,0	1,083	2,28203	0,02456	0,99709	0,17682	0,99726	5,63069	0,06059	5,69128
34992000	405	13,5	1,125	2,36980	0,02550	0,99766	0,18019	0,99780	5,84725	0,06292	5,91017
36288000	420	14,0	1,167	2,45757	0,02644	0,99812	0,18349	0,99823	6,06382	0,06525	6,12907
37584000	435	14,5	1,208	2,54534	0,02739	0,99848	0,18674	0,99858	6,28038	0,06758	6,34796
38880000	450	15,0	1,250	2,63311	0,02833	0,99878	0,18993	0,99886	6,49695	0,06991	6,56686
40176000	465	15,5	1,292	2,72089	0,02928	0,99902	0,19307	0,99908	6,71351	0,07224	6,78575
41472000	480	16,0	1,333	2,80866	0,03022	0,99921	0,19616	0,99926	6,93008	0,07457	7,00465



Obrázek 50. Časový průběh sedání násypu s drény

3.2.6 Závěr početní části 2

V této početní části bylo vypočteno celkové sedání 6 m vysokého násypového tělesa na okruhu Prahy a následné navržení roztečí geosyntetických drenů v trojúhelníkové síti. Celkové sedání, které bylo sumačním postupem vypočítané na 82,6 mm v ose tělesa, je třeba brát konzervativně, neboť ve výpočtu bylo zjednodušeně uvažována doba nekonečně malá (přetížení podloží začne působit najednou) výstavby. Pro splnění podmínky maximálního 10 mm dosednutí tělesa po 3 měsících od vybudování je dle výpočtu nutno geosyntetické drény Colbondrain CX1000 aplikovat s roztečí 1,1 m v trojúhelníkové síti. Kompletní postup výpočtu je uveden v příloze 2.

4 Závěr

Snahou této bakalářské práce bylo co nejvíce přiblížit metody zlepšování základových zemin, ať už metody vyžadující přísun jiných materiálů, nebo metody zvyšující mechanické vlastnosti základových zemin bez nutnosti aplikace jiných materiálů. Tato práce popisuje metody zlepšování zemin hojně i okrajově využívané.

V praxi má zlepšování zemin stále větší uplatnění. Důvodů, proč je na vzestupu, je mnoho, ale mezi ty nejzásadnější patří snaha o využívání místních materiálů, ale také téma dnes hojně ve společnosti rezonující, a tím je ekologie. Ekologie dopadá na stavební průmysl velkou měrou, neboť stavebnictví je považováno za jednoho z velkých producentů odpadu.

Z tohoto důvodu se domnívám, že je potřeba ve výzkumu chování zemin a zlepšování základových zemin dále postupovat. Zejména výzkum poživ druhotného původu považuji za téma, které má potenciál, neboť množství kvalitních materiálů není neomezený.

V poslední části této práce jsem se věnoval praktickým návrhům využívajícím dvě metody popsané v rešeršní části. V prvním výpočtu bylo navrženo a posouzeno armované násypové těleso, které bylo vyztuženo geosyntetikou. V druhém výpočtu bylo analyzováno celkové sedání silničního násypového tělesa a navržení svislých geodrénů.

Přehled použité literatury

- [1] TURČEK, P., Hulla, J., Barták, J., Vaniček, I., Masopust, J., Rozsypal, A., 2005. Zakládání staveb. JAGA Bratislava. Bratislava. 302 s. ISBN: 80-8076-023-3
- [2] MASOPUST, J. 2018. Navrhování základových a pažicích konstrukcí, 2. vydání. Informační centrum CKIT. 368 s. ISBN: 9788088265122
- [3] KOŘÍNEK, R. Mechanika hornin a zemin [Online]. [Citace: 10.03.20]. Dostupné z <<http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-12.pdf>>
- [4] Dynamické zhutňování DC [online]. [Citace: 11.03.20]. Dostupné z <<https://menard.cz/zlepseni-podlozi/technologie/dynamicke-zhutnovani-dc/>>
- [5] Řičica, J. 2018. Zatřídění metod zlepšování základové půdy. Zakládání staveb, a.s. ročník XXX. strany 2-5
- [6] Růžička, M. Hloubkové zlepšování zemin vibračními technologiemi [Online]. [Citace: 13.03.20]. Dostupné z <http://www.soletanche.cz/upload/Hloubkove_zlepsovani_zemin.pdf>
- [7] Orientační posouzení některých charakteristik zemin [Online]. [Citace: 13.03.20]. Dostupné z <http://geologie.vsb.cz/CviceniInzenyrskaGeologie/KAPITOLY/9_Orientacni%20char/9%20kap_orient_char_v13ma.htm>
- [8] Microblasting [Online]. [Citace: 16.03.20]. Dostupné z <<http://62.129.205.139/en/microblasting/>>
- [9] Číhal, B. Zlepšování základové půdy [Online]. [Citace: 16.03.20]. Dostupné z <https://www.stavebniklub.cz/33/zlepsovani-zakladove-pudyuniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z3dRVU9fcvs6Kindv2nJSZ0/>
- [10] Skulinová, D., Peřina, Z. Základové konstrukce [Online]. [Citace: 23.03.20]. Dostupné z <<http://fast10.vsb.cz/perina/ps1/zakladove-konstrukce.html>>
- [11] Masopust, J. 2015. Zakládání staveb 1. České vysoké učení technické v Praze. Praha. 163 s. ISBN: 978-80-01-05837-4
- [12] Janíček, A. Drenážní systémy [Online]. [Citace: 24.03.20]. Dostupné z <<http://fast10.vsb.cz/science/seminar2003/pics/20.pdf>>
- [13] Motyčka, Z. Renesance metody zmrazování [Online]. [Citace: 24.03.20]. Dostupné z <<http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/22.pdf>>
- [14] Horák, V. Podzemní stavby [Online]. [Citace: 24.03.20]. Dostupné z <<http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BF06-Podzemni%20stavby/oporypodzemn%C3%AD2.pdf>>
- [15] Miča, L. Vyztužování podloží geosyntetiky [Online]. [Citace: 31.03.20]. Dostupné z

- <https://www.vutbr.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=1301&publikace_id=14369>
- [16] Zlepšování zemin. In: Katedra geotechniky, Fakulta stavební, ČVUT. [Online]. [Citace: 31.03.20]. Dostupné z <<http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2011/12/prednaska-11.pdf>>
- [17] Rubišarová, H., Kresta, F. Možnost využití rozptýlené výztuže při úpravě vlastností zemin. In: ABS Portal. [Online]. 17.7.2009. [Citace: 31.03.20]. Dostupné z <<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/geotechnika/moznost-vyuziti-rozptylene-vyztuze-pri-uprave-vlastnosti-zemin.>>
- [18] Výztužná vlákna, NAMFLEX®. In: CIUR a.s. [Online]. [Citace: 31.03.20]. Dostupné z <<https://www.ciur.cz/files/news/19/namflex.jpg>>
- [19] Holý, M. Použití geosyntetik pro zlepšení únosnosti podloží a konstrukčních vrstev silničních a inženýrských staveb. In: ABS Portal. [Online]. 15.2.2017. [Citace: 1.4.2020]. Dostupné z <<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/geotechnika/pouziti-geosyntetik-pro-zlepsovani-unosnosti-podlozi-a-konstrukcnich-vrstev-silnicnich-a-inzenyrskych-staveb>>
- [20] Vaníček, I. Vyztužování zemin. In: Geosyntetika ve stavební praxi. [Online]. 8.2.2005. [Citace: 1.4.2020]. Dostupné z <<https://www.igs.cz/images/prednasky/2005/vaniceki-2005.pdf>>
- [21] Vaníček, M., Vaníček, J. Svislé geodrény. [Online]. [Citace: 5.4.2020]. Dostupné z <<http://www.geosyntetika.cz/files/download/stavitel-svisle-geodreny.pdf>>
- [22] Vrbová, E. 2008. Stabilizace zemin. Praha. Diplomová práce. ČVUT. Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Ivan Vaníček, DrSc.
- [23] Král, J. Zpevnování málo vhodných zemin hydraulickými pojivy technologií kontinuálního mísení zeminými frézami. [Online]. [Citace: 14.04.20]. Dostupné z <https://zakladani.cz/casopis/archiv/3_01/casbody06.htm>
- [24] Šefránková, R. 2017. Úprava zemin v podloží vozovek. Brno. Bakalářská práce. VÚT. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D. [Online]. Dostupné z <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=155908>
- [25] Anorganická pojiva. In: Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VSB. [Online]. [Citace 16.04.20]. Dostupné z <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#vzdvanopno>
- [26] Wikipedia: Otevřená encyklopedie: Hydroxid vápenatý [Online]. c2019 [Citováno 19.04.20]. Dostupný z

- <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydroxid_v%C3%A1penat%C3%BD&oldid=17658737>
- [27] Kresta, F. Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP94, Úprava zemin. Ministerstvo dopravy, Obor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2013. Dostupné z <http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_94.pdf>
- [28] Výroba cementu, Ebeton. [Online]. [Citace:28.04.20]. Dostupné z <<http://www.ebeton.cz/pojmy/vyroba-cementu>>
- [29] Vinklérová, K. Bílý beton. [Online]. [Citace:28.04.20]. Dostupné z <http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/TBG_Metrostav_ST03.pdf>
- [30] Schode, Hans-Werner. Vlastnosti směšného pojiva ve srovnání s vápnem a cementem. Strase+Autobahn. 2006. [Online]. [Citace:28.04.20]. Dostupné z <<https://adoc.tips/vlastnosti-smsneho-pojiva-ve-srovnani-s-vapnem-a-cementem.html>>
- [31] Šturala, K. 2001. Silunit – nové pojivo pro stabilizaci zemin. Beton TKS. strana 19
- [32] Sotorník, J. Zkušenosti s novými pojivy Doropost a Dorosol. 2006. [Online]. [Citace:29.04.20]. Dostupné z <<http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-novymi-pojivy-doropost-a-dorosol/>>
- [33] Zlepšování a stabilizace zemin, Lesostav s.r.o. [Online]. [Citace:04.05.20]. Dostupné z <<http://www.lesostav.cz/stabilizace-zemin/>>
- [34] Speciální hydraulická pojiva, Cemex, [Online]. Dostupné z <<https://www.cemex.cz/specialni-hydraulicka-pojiva>>
- [35] Švarcová, M. 2019. Dvoufázový systém stabilizace podloží vozovek. Brno. Bakalářská práce. VÚT. Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D. [Online]. Dostupné z <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=185659>
- [36] Šedina, J. 2018. Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za studena. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D. Dostupné z <<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82820/F1-D-2019-Sedina-Jakub-Disertacni%20prace%20Sedina%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- [37] Energosádovec, SiloTransport, [Online]. [Citace:06.05.20]. Dostupné z <<https://www.silotransport.cz/energoadovec>>
- [38] Energosádovec, ČEZ energetické produkty, [Online]. [Citace:06.05.20]. Dostupné z <<http://www.cezep.cz/cs/vedlejsi-energeticke-produkty/energoadovec>>

- [39] Příspěvatelé Wikipedie, Struska [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 9. 03. 2020, 09:09 UTC, [Citace:06.05.2020] Dostupné z <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Struska&oldid=18241062>>
- [40] Vysokopecní struska, Ebeton, [Online]. [Citace:06.05.20]. Dostupné z <<http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokopecni-struska>>
- [41] Kašpárek, J., Škopán, M. Regulation of vibrating roller parameters in process of compacting cohesive and noncohesive soils, 2006, [Online]. [Citace:15.05.20]. Dostupné z <<https://www.engmech.cz/improc/2006/Kasperek-152-PT.pdf>>
- [42] Integrated versus nonintegrated geocomposites for vertical drainage, Colbondrain, [Online]. Dostupné z <https://enka-solutions.com/media/2908/tn-eng-cx1000_integrated-versus-non-integrated-geocomposites_05-2015.pdf>
- [43] Petrografie [Online]. Dostupné z <http://petrol.sci.muni.cz/mikroskopie/atlas_mineralu/ettringit.pdf>
- [44] Vaníček, I.: Stabilizace zemin a specifikace charakteristických hodnot geotechnických parametrů. Sborník příspěvků Zakládání staveb Brno 2016. Brno. Česká geotechnická společnost Českého svazu stavebních inženýrů, Praha. ISBN 978-80-87920-04-6.
- [45] Hogentogler, C.A. 1973. Engineering properties of soil. McGraw-Hill Book Co.
- [46] Bollens Q., Verbrugge J.C. 2005. Time dependent evolution of shear strength of a silty soil treated with lime. Proceedings of TREMTI 2005, Paris
- [47] Rogers C.D.F., Glendinning S., Dixon N. 1996. Lime Stabilisation. Thomas Telford Publishing London
- [48] Kresta F. 2006. EKOTREG Třinec, průkazní zkoušky zeminy zlepšené pojivem. Závěrečná zpráva.- Stavební geologie – Geotechnika.as.

Seznam norem a technických podmínek

ČSN EN ISO 10318-1	Geosyntetika – Část 1: Termíny a definice
ČSN EN 459-1 ED.3	Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody
ČSN EN 197-1 ED.2	Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
ČSN EN 14227-1	Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem
ČSN 73 6133	Navrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací
ČSN EN 1997-1	Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla
ČSN EN 14475	Provádění speciálních geotechnických prací - Vyztužené zemní konstrukce
ČSN EN 1998-1	Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby
TP 94	Úprava zemin
TP 97	Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací
TP 76A	Geotechnický průzkum pro PK, Zásady geotechnického průzkumu

Příloha č. 1

Statické posouzení armovaného násypového tělesa

Výstup z programu GEO5

Výpočet stability svahu**Vstupní data****Projekt**

Akce : Návrh vyztužení násypového tělesa
 Část : Výpočet na příčném řezu 41,320
 Vypracoval : Pavol Časnocha
 Datum : 12.05.2020

Nastavení

(zadané pro aktuální úlohu)

Stabilitní výpočty

Výpočet zemětřesení : Standard
 Metodika posouzení : výpočet podle EN 1997
 Návrhový přístup : 3 - redukce zatížení GEO, STR a materiálu

Součinitele redukce zatížení (F)					
Trvalá návrhová situace					
		Stav STR		Stav GEO	
		Nepříznivé	Příznivé	Nepříznivé	Příznivé
Stálé zatížení :	$\gamma_G =$	1,35 [-]	1,00 [-]	1,00 [-]	1,00 [-]
Proměnné zatížení :	$\gamma_Q =$	1,50 [-]	0,00 [-]	1,30 [-]	0,00 [-]
Zatížení vodou :	$\gamma_w =$			1,00 [-]	

Součinitele redukce materiálu (M)		
Trvalá návrhová situace		
Součinitel redukce úhlu vnitřního tření :	$\gamma_\phi =$	1,25 [-]
Součinitel redukce efektivní soudržnosti :	$\gamma_c =$	1,25 [-]
Součinitel redukce neodv. smykové pevnosti :	$\gamma_{cu} =$	1,40 [-]

Rozhraní

Číslo	Umístění rozhraní	Souřadnice bodů rozhraní [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		31,24	19,53	32,07	20,08	33,07	20,16
		33,57	20,20	36,32	20,27	44,32	20,47
		45,82	20,42	46,32	20,41	47,32	20,47
		55,32	20,39	58,07	20,37	59,57	20,25
		60,42	19,68				
2		5,00	5,58	5,98	5,75	6,95	5,97
		7,90	6,25	8,84	6,60	14,48	8,85
		19,73	11,85	31,22	19,51	31,24	19,53
		33,07	19,66	33,57	19,70	36,32	19,77
		44,32	19,97	45,82	19,92	46,32	19,91
		47,32	19,97	55,32	19,89	58,07	19,87
		60,42	19,68	60,69	19,50	61,27	19,12
		68,77	16,12	69,66	15,76	69,77	15,72



Pouze pro nekomerční využití



1

Číslo	Umístění rozhraní	Souřadnice bodů rozhraní [m]					
		x	z	x	z	x	z
3		0,00	4,90	5,00	5,58	5,00	5,37
		8,01	5,46	8,09	5,85	11,09	5,94
		11,17	6,34	14,17	6,43	14,23	6,75
		17,23	6,84	17,29	7,13	20,29	7,22
		20,36	7,59	23,36	7,68	23,44	8,06
		26,43	8,15	26,51	8,52	29,51	8,61
		29,58	8,99	32,58	9,08	32,66	9,46
		35,66	9,55	35,73	9,92	38,73	10,01
		38,81	10,42	41,81	10,51	41,90	10,94
		44,90	11,03	44,98	11,47	47,98	11,56
		48,07	11,99	51,07	12,08	51,15	12,51
		54,15	12,60	54,24	13,03	57,24	13,12
		57,32	13,55	60,32	13,64	60,42	14,11
		63,42	14,20	63,54	14,80	66,54	14,89
66,66	15,50	69,66	15,59	69,77	15,72		
71,95	16,81	76,12	17,68				
4		0,00	0,00	76,12	12,85		

Parametry zemin - efektivní napjatost

Číslo	Název	Vzorek	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	γ [kN/m ³]
1	Aktivní zóna		33,00	1,00	19,00
2	Násyp Q3,Q7		26,00	0,00	19,00
3	G4 - F6-CL		19,00	12,00	19,00
4	PK2 - R5		28,00	20,00	20,00

Parametry zemin - vztlak

Číslo	Název	Vzorek	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	n [-]
1	Aktivní zóna		19,00		
2	Násyp Q3,Q7		19,00		



Pouze pro nekomerční využití



2

Číslo	Název	Vzorek	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	n [-]
3	G4 - F6-CL		19,00		
4	PK2 - R5		20,00		

Parametry zemín**Aktivní zóna**

Objemová tíha : $\gamma = 19,00$ kN/m³
 Napjatost : efektivní
 Úhel vnitřního tření : $\varphi_{ef} = 33,00^\circ$
 Soudržnost zeminy : $c_{ef} = 1,00$ kPa
 Obj.tíha sat.zeminy : $\gamma_{sat} = 19,00$ kN/m³

Násyp Q3,Q7

Objemová tíha : $\gamma = 19,00$ kN/m³
 Napjatost : efektivní
 Úhel vnitřního tření : $\varphi_{ef} = 26,00^\circ$
 Soudržnost zeminy : $c_{ef} = 0,00$ kPa
 Obj.tíha sat.zeminy : $\gamma_{sat} = 19,00$ kN/m³

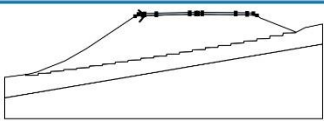

G4 - F6-CL

Objemová tíha : $\gamma = 19,00$ kN/m³
 Napjatost : efektivní
 Úhel vnitřního tření : $\varphi_{ef} = 19,00^\circ$
 Soudržnost zeminy : $c_{ef} = 12,00$ kPa
 Obj.tíha sat.zeminy : $\gamma_{sat} = 19,00$ kN/m³

PK2 - R5

Objemová tíha : $\gamma = 20,00$ kN/m³
 Napjatost : efektivní
 Úhel vnitřního tření : $\varphi_{ef} = 28,00^\circ$
 Soudržnost zeminy : $c_{ef} = 20,00$ kPa
 Obj.tíha sat.zeminy : $\gamma_{sat} = 20,00$ kN/m³

Přiřazení a plochy

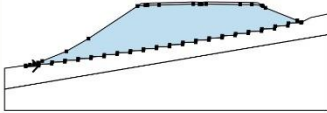
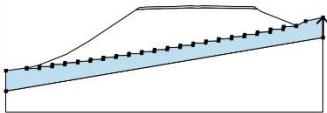
Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
1		33,07	19,66	33,57	19,70	Aktivní zóna 
		36,32	19,77	44,32	19,97	
		45,82	19,92	46,32	19,91	
		47,32	19,97	55,32	19,89	
		58,07	19,87	60,42	19,68	
		59,57	20,25	58,07	20,37	
		55,32	20,39	47,32	20,47	
		46,32	20,41	45,82	20,42	
		44,32	20,47	36,32	20,27	
		33,57	20,20	33,07	20,16	



Pouze pro nekomerční využití

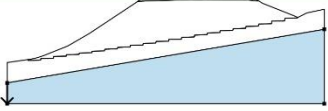


3

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
2		32,07	20,08	31,24	19,53	Násyp Q3,Q7
		5,00	5,37	8,01	5,46	
		8,09	5,85	11,09	5,94	
		11,17	6,34	14,17	6,43	
		14,23	6,75	17,23	6,84	
		17,29	7,13	20,29	7,22	
		20,36	7,59	23,36	7,68	
		23,44	8,06	26,43	8,15	
		26,51	8,52	29,51	8,61	
		29,58	8,99	32,58	9,08	
		32,66	9,46	35,66	9,55	
		35,73	9,92	38,73	10,01	
		38,81	10,42	41,81	10,51	
		41,90	10,94	44,90	11,03	
		44,98	11,47	47,98	11,56	
		48,07	11,99	51,07	12,08	
		51,15	12,51	54,15	12,60	
		54,24	13,03	57,24	13,12	
		57,32	13,55	60,32	13,64	
		60,42	14,11	63,42	14,20	
		63,54	14,80	66,54	14,89	
		66,66	15,50	69,66	15,59	
		69,77	15,72	69,66	15,76	
		68,77	16,12	61,27	19,12	
60,69	19,50	60,42	19,68			
58,07	19,87	55,32	19,89			
47,32	19,97	46,32	19,91			
45,82	19,92	44,32	19,97			
36,32	19,77	33,57	19,70			
33,07	19,66	31,24	19,53			
31,22	19,51	19,73	11,85			
14,48	8,85	8,84	6,60			
7,90	6,25	6,95	5,97			
5,98	5,75	5,00	5,58			
3		76,12	12,85	76,12	17,68	G4 - F6-CL
		71,95	16,81	69,77	15,72	
		69,66	15,59	66,66	15,50	
		66,54	14,89	63,54	14,80	
		63,42	14,20	60,42	14,11	
		60,32	13,64	57,32	13,55	
		57,24	13,12	54,24	13,03	
		54,15	12,60	51,15	12,51	
		51,07	12,08	48,07	11,99	
		47,98	11,56	44,98	11,47	
		44,90	11,03	41,90	10,94	
		41,81	10,51	38,81	10,42	
		38,73	10,01	35,73	9,92	
		35,66	9,55	32,66	9,46	
		32,58	9,08	29,58	8,99	

Pouze pro nekomerční využití

4

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
4		29,51	8,61	26,51	8,52	PK2 - R5
		26,43	8,15	23,44	8,06	
		23,36	7,68	20,36	7,59	
		20,29	7,22	17,29	7,13	
		17,23	6,84	14,23	6,75	
		14,17	6,43	11,17	6,34	
		11,09	5,94	8,09	5,85	
		8,01	5,46	5,00	5,37	
		5,00	5,58	0,00	4,90	
		0,00	0,00			
		0,00	0,00	0,00	-5,00	
		76,12	-5,00	76,12	12,85	

Přítížení

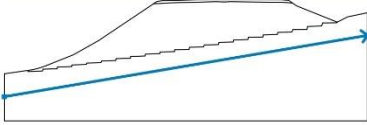
Číslo	Typ	Působení	Umístění z [m]	Počátek x [m]	Délka l [m]	Šířka b [m]	Sklon α [°]	Velikost q, q ₁ , f, F q ₂	jednotka
1	pásové	proměnné	na povrchu	x = 33,07	l = 25,50		0,00	10,00	kN/m ²

Názvy přítížení

Číslo	Název
1	Zatížení dopravou

Voda

Typ vody : HPV

Číslo	Umístění HPV	Souřadnice bodů HPV [m]			
		x	z	x	z
1		0,00	0,10	76,12	12,95

Tahová trhlina

Tahová trhlina není zadána.

Zemětřesení

Se zemětřesením se nepočítá.

Nastavení výpočtu fáze

Návrhová situace : trvalá

Výsledky (Fáze budování 2)**Výpočet 1 (fáze 2)****Kruhová smyková plocha**

Pouze pro nekomerční využití



5

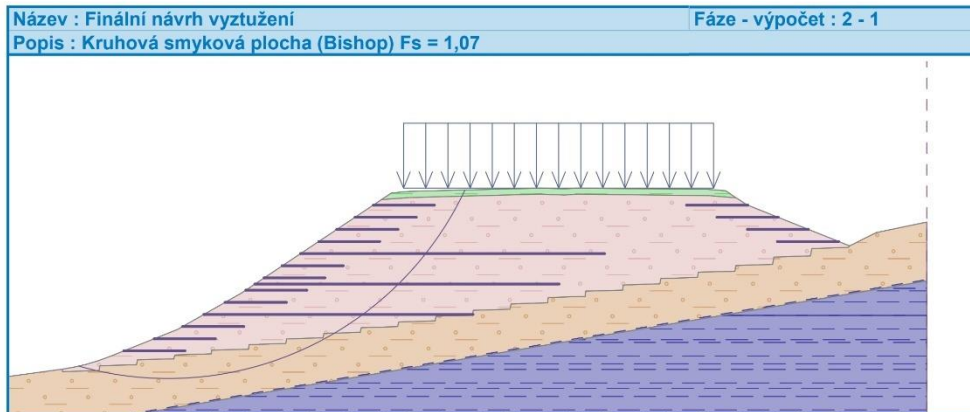
Parametry smykové plochy					
Střed :	x =	13,68 [m]	Úhly :	$\alpha_1 =$	-15,79 [°]
	z =	31,82 [m]		$\alpha_2 =$	64,79 [°]
Poloměr :	R =	27,01 [m]			
Smyková plocha po optimalizaci.					

Únosnosti výztuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	90,40
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	90,40
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	90,40
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Bishop)Sumace aktivních sil : $F_a = 1358,64$ kN/mSumace pasivních sil : $F_p = 1457,29$ kN/mMoment sesouvající : $M_a = 36696,92$ kNm/mMoment vzdorující : $M_p = 39361,34$ kNm/m

Využití : 93,2 %

Stabilita svahu VYHOVUJE

Pouze pro nekomerční využití



6

Výpočet 2 (fáze 2)**Polygonální smyková plocha**

		Souřadnice bodů smykové plochy [m]							
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
5,23	5,62	7,09	4,59	21,76	4,83	37,66	15,33	42,43	20,38
42,45	20,42								

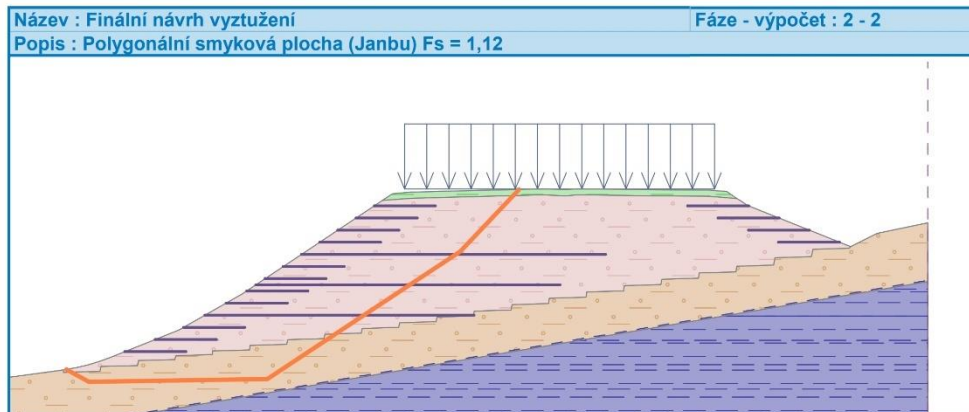
Smyková plocha po optimalizaci.

Únosnosti výztuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	90,40
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	90,40
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	90,40
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 89,3 %

Stabilita svahu VYHOVUJE**Výpočet 3 (fáze 2)****Polygonální smyková plocha**

Pouze pro nekomerční využití



7

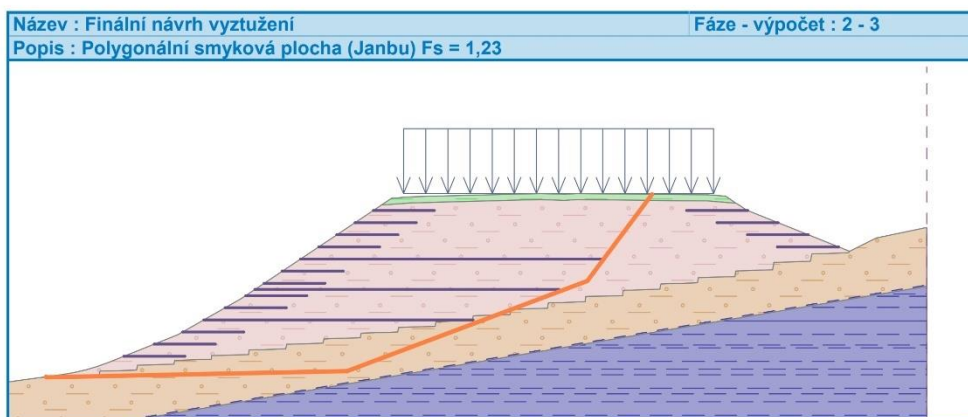
Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
3,63	5,39	3,73	5,35	28,41	5,86	48,17	13,27	53,51	20,41
Smyková plocha po optimalizaci.									

Únosnosti výtuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	2,95
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	0,00
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 81,6 %

Stabilita svahu VYHOVUJE**Výpočet 4 (fáze 2)****Kruhová smyková plocha**

Parametry smykové plochy					
Střed :	x =	67,64 [m]	Úhly :	$\alpha_1 =$	-40,25 [°]
	z =	35,80 [m]		$\alpha_2 =$	5,98 [°]
Smyková plocha po optimalizaci.					



Pouze pro nekomerční využití



8

Parametry smykové plochy

Poloměr :	R =	20,18 [m]
Smyková plocha po optimalizaci.		

Únosnosti výtuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	0,00
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Bishop)

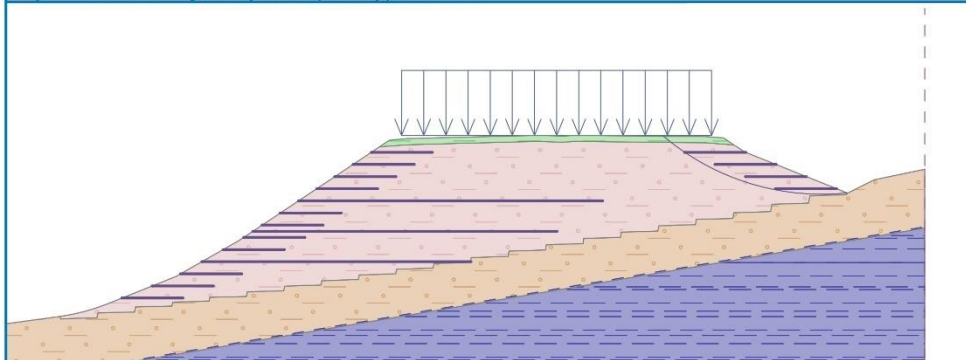
Sumace aktivních sil : $F_a = 181,03$ kN/mSumace pasivních sil : $F_p = 209,71$ kN/mMoment sesouvající : $M_a = 3653,19$ kNm/mMoment vzdorující : $M_p = 4231,93$ kNm/m

Využití : 86,3 %

Stabilita svahu VYHOVUJE

Název : Finální návrh vyztužení

Fáze - výpočet : 2 - 4

Popis : Kruhová smyková plocha (Bishop) $F_s = 1,16$ 

Výpočet 5 (fáze 2)

Polygonální smyková plocha

Pouze pro nekomerční využití

9

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
56,64	20,38	56,65	20,37	57,60	19,43	61,34	19,09		
Smyková plocha po optimalizaci.									

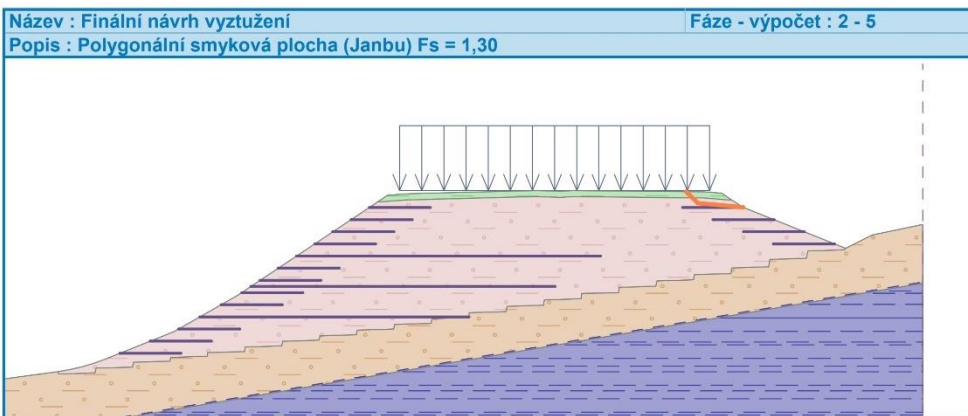
Únosnosti výtuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	0,00
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 77,0 %

Stabilita svahu VYHOVUJE



Výpočet 6 (fáze 2)

Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
29,14	18,13	33,43	18,62	34,46	20,22				
Smyková plocha po optimalizaci.									

Únosnosti výtuh



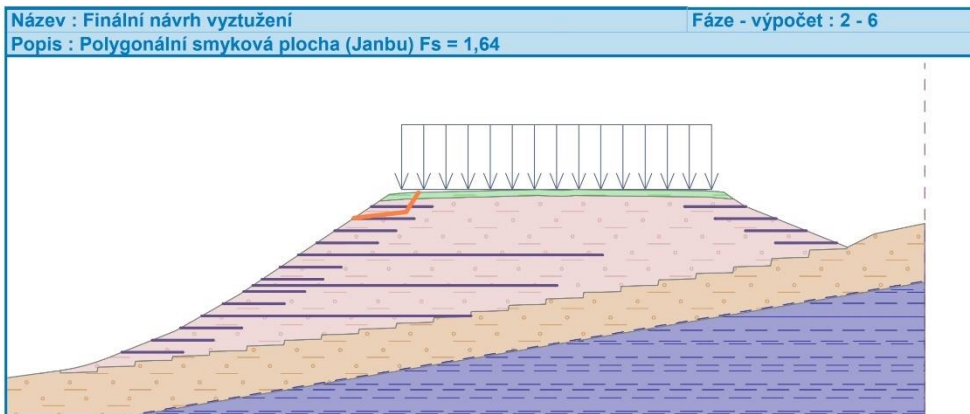
Pouze pro nekomerční využití



Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	25,10
14	0,00
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 61,1 %

Stabilita svahu VYHOVUJE

Pouze pro nekomerční využití



11

Výsledky (Fáze budování 2)**Výpočet 7 (fáze 2)****Polygonální smyková plocha**

Souřadnice bodů smykové plochy [m]							
x	z	x	z	x	z	x	z
24,92	15,31	24,97	15,32	30,40	15,66	37,53	20,30
Smyková plocha po optimalizaci.							

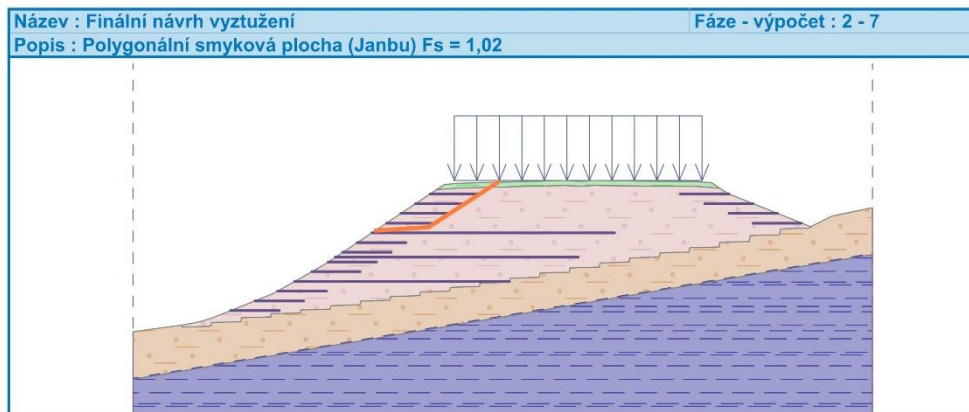
Únosnosti výztuh

Výztuha Únosnost [kN/m]

1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,97
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	0,00
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 98,0 %

Stabilita svahu VYHOVUJE**Výpočet 8 (fáze 2)****Polygonální smyková plocha**

Pouze pro nekomerční využití



1

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
9,80	6,98	17,71	6,80	27,39	10,85	39,21	20,29	39,25	20,34

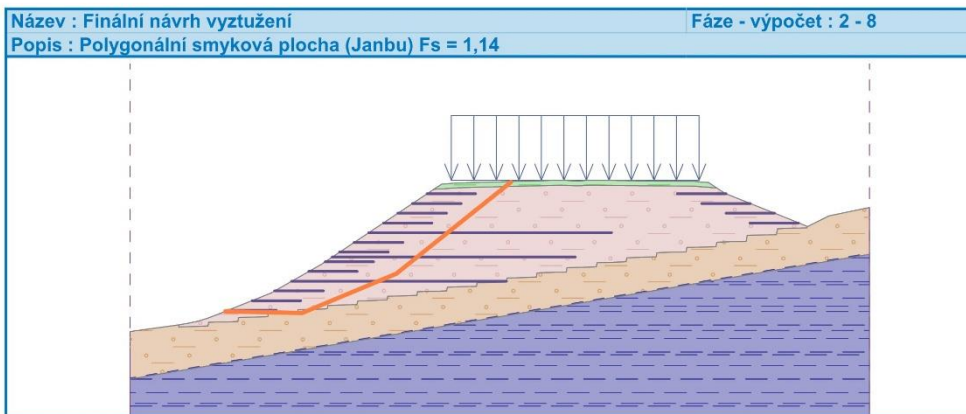
Smyková plocha po optimalizaci.

Únosnosti výtuh

Výztuha	Únosnost [kN/m]
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	90,40
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	90,40
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	90,40
15	0,00
16	0,00
17	0,00
18	0,00

Posouzení stability svahu (Janbu)

Využití : 87,9 %

Stabilita svahu VYHOVUJE

Pouze pro nekomerční využití



2

Příloha č. 2

Urychlení konsolidace silničního náspu

Výstup z Microsoft Excel

Celkové sedání podloží

Výpočet celkového sedání podloží pod násypem bude vypočítán sumačním postupem s uvažováním strukturální pevnosti

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z,i} - m_i \cdot \sigma_{or,i}}{E_{oed,i}} \cdot h_i$$

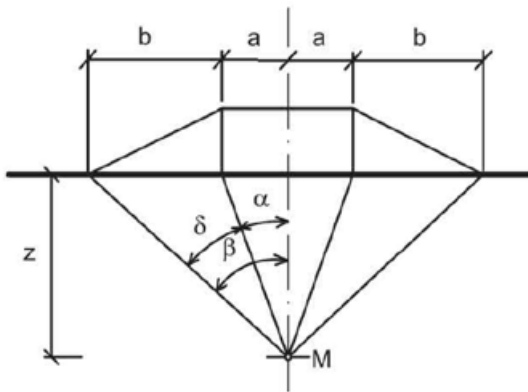
kde

s	celkové sedání
h_i	mocnost i - té vrstvy zeminy v podloží
$E_{oed,i}$	edometrický modul i - té vrstvy zeminy v podloží
$\sigma_{z,i}$	svislé přitížení v i - té vrstvě zeminy v podloží
m_i	součinitel strukturální pevnosti zeminy v i - té vrstvě
n	počet vrstev zeminy v podloží, kde $\sigma_{z,i} > m_i \cdot \sigma_{or,i}$

Výpočet napětí od přitížení lichoběžníkovým zatížením v ose (Kézdi, 1964)

$$\sigma_z = \frac{2\sigma_{oL}}{\pi} \left(\beta + \frac{b}{a} \delta \right)$$

kde označení β, δ, a a b jsou vyznačeny na obrázku



Vliv hlouky nestlačitelné vrstvy

Stanovení součinitele X_2

$$\kappa_2 = 1 - e^{\left(\frac{z_{ic}}{z} \ln 0,25 + \ln 0,8\right)}$$

kde

z_{ic} hloubka nestlačitelné vrstvy pod základovou spárou
 z hloubka pod základovou spárou

Stanovení náhradní hloubky z_r

$$z_r = \chi_2 \cdot z_{ic}$$

Stanovení geostatického napětí na nasyceném podloží

$$\sigma_{or} = \gamma_{su} \cdot z$$

Stanovení objemové tíhy zeminy pod hladinou vody

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Napětí od přitížení

$$\sigma_{ol} = \gamma \cdot \text{výška násypu}$$

Převod mezi modulem ddeformace a modulem edometrickým

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta}$$

$$\beta = 1 - \frac{2 \nu^2}{1 - \nu}$$

Objemová hmotnost nasycené zeminy

$$\rho_{sat} = (1-n)\rho_s + n \cdot \rho_w$$

Ojemová tíha

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Vstupní parametry

Geometrie násypu	
a =	14,75 [m]
b =	12 [m]
z =	10,8 [m]
z_{ic} =	10,8 [m]
h_{nat} =	6 [m]

Materiál násypu	
γ =	21,09 kN.m ⁻³

Výpočty

$$\sigma_{ol} = 126,54 \text{ [kPa]}$$

Podloží násypu	
Vrstva 1 CS/F4	
$E_{oed} =$	12,84 [Mpa]
$\gamma =$	21,67 [kN.m ⁻³]
$\gamma_{sat} =$	21,7936 [kN.m ⁻³]
$m =$	0,2 [-]
$c_v =$	8,5E-08 [m ₂ .s ⁻¹]
$E_{def} =$	8 [Mpa]
$\nu =$	0,35 [-]
$\beta =$	0,62 [-]
$n =$	32,8 [%]
$\rho_s =$	2755 [kg.m ⁻³]
$\rho_{sat} =$	2179,36 [kg.m ⁻³]

Vrstva 2 MS/F3	
$E_{oed} =$	16,0493827 [Mpa]
$\gamma =$	21,09 [kN.m ⁻³]
$\gamma_{sat} =$	21,22394 [kN.m ⁻³]
$m =$	0,2 [-]
$c_v =$	8,5E-08 [m ₂ .s ⁻¹]
$E_{def} =$	10 [Mpa]
$\nu =$	0,35 [-]
$\beta =$	0,62 [-]
$n =$	36,3 [%]
$\rho_s =$	2762 [kg.m ⁻³]
$\rho_{sat} =$	2122,394 [kg.m ⁻³]

Obecné

$\gamma_w =$	10 [kN.m ⁻³]
$g =$	10 [m*s ⁻²]
$\rho_w =$	1000 [kg.m ⁻³]

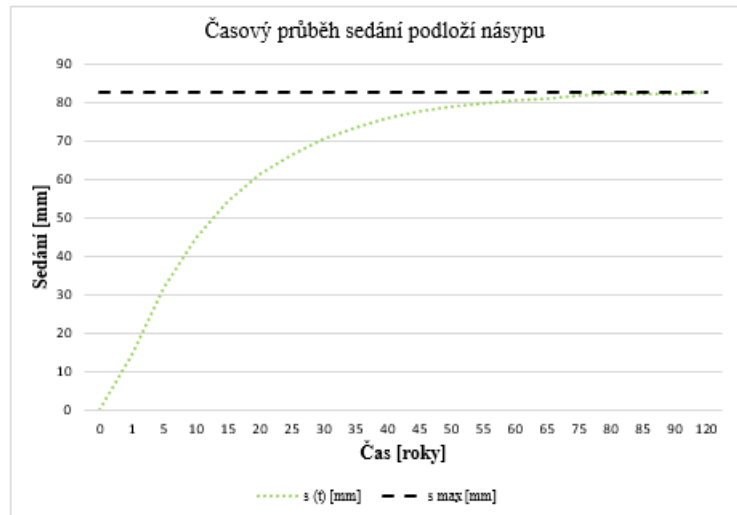
Výpočet konsolidačního sedání pod středem násypu

i	h _i	z _i	X _z	z _r	γ _{su}	ε _{ori}	m*ε _{ori}	α	β	σ̄	σ _{zi}	S _i
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[kN.m ⁻³]	[kPa]	[kPa]	[rad]	[rad]	[rad]	[kPa]	[mm]
1	0,5	0,25	1,00	0,25	11,79	2,95	0,59	1,55	1,56	0,01	126,3	4,9
2	0,5	0,75	1,00	0,75	11,79	8,85	1,77	1,52	1,54	0,02	125,8	4,8
3	0,5	1,25	1,00	1,25	11,79	14,74	2,95	1,49	1,52	0,04	125,3	4,8
4	0,5	1,75	1,00	1,75	11,79	20,64	4,13	1,45	1,51	0,05	124,7	4,7
5	0,5	2,25	1,00	2,25	11,79	26,54	5,31	1,42	1,49	0,07	124,2	4,6
6	0,5	2,75	1,00	2,74	11,79	32,43	6,49	1,39	1,47	0,08	123,7	4,6
7	0,5	3,25	0,99	3,22	11,79	38,33	7,67	1,36	1,45	0,10	123,1	4,5
8	0,5	3,75	0,99	3,69	11,79	44,23	8,85	1,33	1,43	0,11	122,6	4,4
9	0,5	4,25	0,98	4,15	11,79	50,12	10,02	1,30	1,42	0,12	122,0	4,4
10	0,7	4,85	0,96	4,67	11,79	57,20	11,44	1,26	1,40	0,13	121,4	6,0
11	0,5	5,45	0,95	5,17	11,22	61,17	12,23	1,23	1,38	0,15	120,7	3,4
12	0,5	5,95	0,94	5,57	11,22	66,78	13,36	1,21	1,37	0,16	120,2	3,3
13	0,5	6,45	0,92	5,94	11,22	72,39	14,48	1,19	1,35	0,16	119,7	3,3
14	0,5	6,95	0,91	6,31	11,22	78,01	15,60	1,17	1,34	0,17	119,2	3,2
15	0,5	7,45	0,89	6,65	11,22	83,62	16,72	1,15	1,33	0,18	118,7	3,2
16	0,5	7,95	0,88	6,98	11,22	89,23	17,85	1,13	1,32	0,19	118,2	3,1
17	0,5	8,45	0,86	7,30	11,22	94,84	18,97	1,11	1,30	0,19	117,7	3,1
18	0,5	8,95	0,85	7,61	11,22	100,45	20,09	1,09	1,29	0,20	117,3	3,0
19	0,5	9,45	0,84	7,90	11,22	106,07	21,21	1,08	1,28	0,20	116,8	3,0
20	0,5	9,95	0,82	8,18	11,22	111,68	22,34	1,06	1,27	0,21	116,4	2,9
21	0,6	10,5	0,81	8,48	11,22	117,85	23,57	1,05	1,26	0,21	115,9	3,5
Σ												82,6

Výpočet časového průběhu sedání

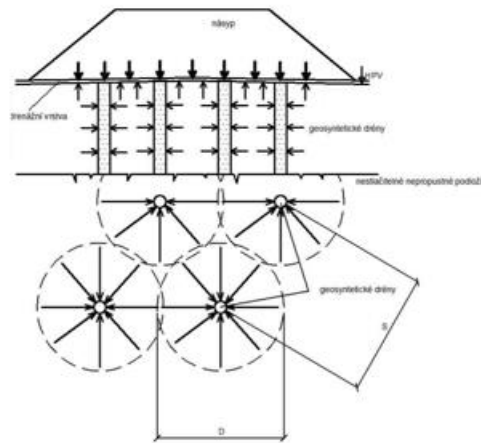
Čas t	Čas t	T	N	U	s (t)
[roky]	[s]	[-]	[-]	[-]	[mm]
1	31536000	0,0230	0,0567	0,1711	14,1
5	157680000	0,1149	0,2835	0,3825	31,6
10	315360000	0,2298	0,5670	0,5397	44,6
15	473040000	0,3447	0,8506	0,6537	54,0
20	630720000	0,4596	1,1341	0,7392	61,1
25	788400000	0,5745	1,4176	0,8036	66,4
30	946080000	0,6894	1,7011	0,8521	70,4
35	1103760000	0,8044	1,9847	0,8886	73,4
40	1261440000	0,9193	2,2682	0,9161	75,7
45	1419120000	1,0342	2,5517	0,9368	77,4
50	1576800000	1,1491	2,8352	0,9524	78,7
55	1734480000	1,2640	3,1187	0,9642	79,7
60	1892160000	1,3789	3,4023	0,9730	80,4
65	2049840000	1,4938	3,6858	0,9797	81,0
75	2365200000	1,7236	4,2528	0,9885	81,7
80	2522880000	1,8385	4,5364	0,9913	81,9
85	2680560000	1,9534	4,8199	0,9935	82,1
90	2838240000	2,0683	5,1034	0,9951	82,2
120	3784320000	2,7578	6,8045	0,9991	82,6

Čas t [roky]	s (t) [mm]	s max [mm]
0	0	82,6398
1	14,1	82,6398
5	31,6	82,6398
10	44,6	82,6398
15	54,0	82,6398
20	61,1	82,6398
25	66,4	82,6398
30	70,4	82,6398
35	73,4	82,6398
40	75,7	82,6398
45	77,4	82,6398
50	78,7	82,6398
55	79,7	82,6398
60	80,4	82,6398
65	81,0	82,6398
75	81,7	82,6398
80	81,9	82,6398
85	82,1	82,6398
90	82,2	82,6398
120	82,6	82,6398



Celkové sedání = 82,6 [mm]

Urychlení konsolidace svislými drény



Vstupní parametry

Čas pro konsolidaci =	3 [měsíce] 0,25 [roky] 90 [dny] 2160 [hodiny] 129600 [minuty] 7776000 [sekundy]	Součinitel konsolidace – vodorovný směr – $C_v =$	0,000000085 [m, s^{-1}]	$S_{lim} =$	10 [mm]
-----------------------	--	---	-----------------------------	-------------	---------

Stanovení potřebného stupně konsolidace

$$U = (s_c - s_{lim}) / s_c$$

Drenážní průměr

$$D = n \cdot d$$

Časový faktor pro svislou konsolidaci při drénování podložky vzhůru

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

Stupeň svislé konsolidace U_v

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} + \frac{1}{25} e^{-25N} + \dots \right), \text{ kde } N = \frac{\pi^2 \cdot c_v \cdot t}{4H^2}$$

Výpočet stupně konsolidace ve vodorovném směru

$$(1-U) = (1-U_v) \cdot (1-U_h)$$

Ekvivalentní průměr geosyntetického drénu - přepočítání obvodu obdélníku na kruh

Geodrén

Šířka = 100 [mm]
Síla = 3,6 [mm]
Obvod□ = 207,2 [mm]
Obvod○ = 207,2 [mm]

Výpočty

Ekvivalentní průměr $d =$ 65,95 [mm] 0,06595 [m]
 $U =$ 0,878992917 [-]
 $T_v =$ 0,005666667 [-]

Stupeň svislé konsolidace

$N =$ 0,01398194 [-]
 $U_v =$ 0,084946355 [-]
 $U_c =$ 0,084946355 [-]
 $U_h =$ 0,867759575 [-]

Dosazení do vzorce a následné vyřešení numericky

$$t = \frac{D^2}{8c_h} \left[\ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1-U_h}$$

kde

t = doba konsolidace
 D = průměr drenovaného válce zeminy - pro trojúhelníkovou síť = 1,05 * délka strany trojúhelníka (S)
 C_h = součinitel konsolidace zeminy ve vodorovném směru
 d = ekvivalentní průměr geodrénu
 U_h = požadovaný stupeň konsolidace ve vodorovném směru

Numerické řešení (při změně zadání je nutno aktualizovat řešení)

$t =$ 7776000 [s] = 7776000
 $D =$ 1,120308699 [m]

Stanovené délky strany trojúhelníka S

$$S = D/1,05$$

$S =$ 1,1 [m]

Casový průběh sedání podloží s drény

Čas				Časový faktor		Stupeň konsolidace			N _h	N _v	N _{komb.}
[s]	[dny]	[měsíce]	[roky]	T _h geodrény	T _v zemina	U _h geodrény	U _v zemina	U komb.			
1296000	15	0,5	0,042	0,08777	0,00094	0,33429	0,03667	0,33609	0,21656	0,00233	0,21890
2592000	30	1,0	0,083	0,17554	0,00189	0,47254	0,04955	0,47506	0,43313	0,00466	0,43779
3888000	45	1,5	0,125	0,26331	0,00283	0,57646	0,06021	0,57942	0,64969	0,00699	0,65669
5184000	60	2,0	0,167	0,35108	0,00378	0,65910	0,06940	0,66227	0,86626	0,00932	0,87558
6480000	75	2,5	0,208	0,43885	0,00472	0,72551	0,07756	0,72869	1,08282	0,01165	1,09448
7776000	90	3,0	0,250	0,52662	0,00567	0,77896	0,08495	0,78203	1,29939	0,01398	1,31337
9072000	105	3,5	0,292	0,61439	0,00661	0,82200	0,09175	0,82488	1,51595	0,01631	1,53227
10368000	120	4,0	0,333	0,70216	0,00756	0,85666	0,09808	0,85931	1,73252	0,01864	1,75116
11664000	135	4,5	0,375	0,78993	0,00850	0,88457	0,10403	0,88697	1,94908	0,02097	1,97006
12960000	150	5,0	0,417	0,87770	0,00944	0,90705	0,10966	0,90919	2,16565	0,02330	2,18895
14256000	165	5,5	0,458	0,96548	0,01039	0,92515	0,11501	0,92704	2,38221	0,02563	2,40785
15552000	180	6,0	0,500	1,05325	0,01133	0,93972	0,12013	0,94138	2,59878	0,02796	2,62674
16848000	195	6,5	0,542	1,14102	0,01228	0,95146	0,12503	0,95291	2,81534	0,03029	2,84564
18144000	210	7,0	0,583	1,22879	0,01322	0,96091	0,12975	0,96217	3,03191	0,03262	3,06453
19440000	225	7,5	0,625	1,31656	0,01417	0,96852	0,13430	0,96960	3,24847	0,03495	3,28343
20736000	240	8,0	0,667	1,40433	0,01511	0,97465	0,13871	0,97558	3,46504	0,03729	3,50233
22032000	255	8,5	0,708	1,49210	0,01606	0,97959	0,14298	0,98038	3,68160	0,03962	3,72122
23328000	270	9,0	0,750	1,57987	0,01700	0,98356	0,14712	0,98424	3,89817	0,04195	3,94012
24624000	285	9,5	0,792	1,66764	0,01794	0,98676	0,15115	0,98734	4,11473	0,04428	4,15901
25920000	300	10,0	0,833	1,75541	0,01889	0,98934	0,15508	0,98983	4,33130	0,04661	4,37791
27216000	315	10,5	0,875	1,84318	0,01983	0,99142	0,15891	0,99183	4,54786	0,04894	4,59680
28512000	330	11,0	0,917	1,93095	0,02078	0,99309	0,16265	0,99343	4,76443	0,05127	4,81570
29808000	345	11,5	0,958	2,01872	0,02172	0,99443	0,16631	0,99472	4,98099	0,05360	5,03459
31104000	360	12,0	1,000	2,10649	0,02267	0,99552	0,16988	0,99576	5,19756	0,05593	5,25349
32400000	375	12,5	1,042	2,19426	0,02361	0,99639	0,17339	0,99659	5,41412	0,05826	5,47238
33696000	390	13,0	1,083	2,28203	0,02456	0,99709	0,17682	0,99726	5,63069	0,06059	5,69128
34992000	405	13,5	1,125	2,36980	0,02550	0,99766	0,18019	0,99780	5,84725	0,06292	5,91017
36288000	420	14,0	1,167	2,45757	0,02644	0,99812	0,18349	0,99823	6,06382	0,06525	6,12907
37584000	435	14,5	1,208	2,54534	0,02739	0,99848	0,18674	0,99858	6,28038	0,06758	6,34796
38880000	450	15,0	1,250	2,63311	0,02833	0,99878	0,18993	0,99886	6,49695	0,06991	6,56686
40176000	465	15,5	1,292	2,72089	0,02928	0,99902	0,19307	0,99908	6,71351	0,07224	6,78575
41472000	480	16,0	1,333	2,80866	0,03022	0,99921	0,19616	0,99926	6,93008	0,07457	7,00465

[dny]	geodřeny	zemina	kombinace
0	0	0	0
15	0,33429	0,03667	0,33609
30	0,47254	0,04955	0,47506
45	0,57646	0,06021	0,57942
60	0,65910	0,06940	0,66227
75	0,72551	0,07756	0,72869
90	0,77896	0,08495	0,78203
105	0,82200	0,09175	0,82488
120	0,85666	0,09808	0,85931
135	0,88457	0,10403	0,88697
150	0,90705	0,10966	0,90919
165	0,92515	0,11501	0,92704
180	0,93972	0,12013	0,94138
195	0,95146	0,12503	0,95291
210	0,96091	0,12975	0,96217
225	0,96852	0,13430	0,96960
240	0,97465	0,13871	0,97558
255	0,97959	0,14298	0,98038
270	0,98356	0,14712	0,98424
285	0,98676	0,15115	0,98734
300	0,98934	0,15508	0,98983
315	0,99142	0,15891	0,99183
330	0,99309	0,16265	0,99343
345	0,99443	0,16631	0,99472
360	0,99552	0,16988	0,99576
375	0,99639	0,17339	0,99659
390	0,99709	0,17682	0,99726
405	0,99766	0,18019	0,99780
420	0,99812	0,18349	0,99823
435	0,99848	0,18674	0,99858
450	0,99878	0,18993	0,99886
465	0,99902	0,19307	0,99908
480	0,99921	0,19616	0,99926

