

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Statický rozbor činnosti síťových struktur z netuhých hřebíků při vyztužování zeminy

Structure Analysis of Net Systems from Flexible Nails in Soil Reinforcement

Student:

Bc. Alžběta Šimáčková

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Alžběta Šimáčková**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: Statický rozbor činnosti sítových struktur z netuhých hřebíků při  
vyztužování zemin  
Structure Analysis of Net Systems from Flexible Nails in Soil  
Reinforcement

Zásady pro vypracování:

Úvod

Konstrukce sítové soustavy

Statická činnost sítové soustavy

Součinnost sítových soustav

Stabilizace - vyztužení svahu zářezu

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Hulla, Jozef; Turček, Peter. *Zakladanie stavieb*. Bratislava : Jaga group, 1998. ISBN 978-80-88905-05-2.  
Sawicki, Andrzej. *Mechanics of Reinforced Soil*. Rotterdam : A.A.Balkema, 2000. ISBN 90 5809330 1.  
Bakker, Jan, Klass. *Soil Retaining Structures*. Rotterdam : A.A.Balkema, 2000. ISBN 90 5809321 2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

## **Anotace**

Práce provádí analýzu činnosti síťové soustavy z netuhých zemních hřebíků, která má, podobně jako kořenová soustava vegetačního pokryvu, vyztužovat - stabilizovat zeminy. Jednotlivé kapitoly práce se zabývají: podmínkami vytvoření síťové soustavy; variantami uspořádání síťových soustav s ohledem na vyztužování zemin; statickou činností jednoho hřebíku, síťové soustavy a skupiny uspořádaných síťových soustav; praktickým aplikačním možnostem skupiny uspořádaných síťových soustav při vyztužování – stabilizaci zemního prostředí. Poslední kapitola práce uvádí silovou metodu řešení návrhu parametrů skupiny uspořádaných síťových soustav a jednoduchý příklad její aplikace při vyztužení – stabilizaci svahu zářezu v zemině.

## **Klíčová slova**

zemní hřebík, vyztužování zemin, síťové uspořádání hřebíků

## **Annotation**

The thesis analyses the ability of the net arrangement of flexible soil nails, that like the root system of the vegetation, reinforced - bind the soil in place. Particular chapters deal with: conditions for a net arrangement constitution; design variants of the net arrangement having regard to the reinforcement of soil; static work of a single nail, static work of net arrangement of nails and last combined static work of several nets; practical application of combined nets to reinforce soil - to bind the soil ground in place generally. The last chapter displays a balance force method to design the parameters of the soil nail nets and a simple example of its application for the soil reinforcement of slope cut in the soil ground.

## **Key notes**

soil nail, soil reinforcement, net arrangement of nails

## Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení .....	1
1 Úvod.....	2
2 Konstrukce síťové soustavy.....	4
3 Varianty uspořádání síťových soustav.....	7
3.1 Směrové uspořádání síťových soustav .....	7
3.2 Geometrie rozložení ústí hřebíků na volné ploše .....	7
4 Statická činnost síťové soustavy.....	10
4.1 Statická činnost zemního hřebíku v zeminách.....	10
4.2 Statická činnost dvou hřebíku – bodu křížení.....	11
4.3 Statická činnost síťové soustavy.....	13
4.4 Statická činnost skupiny síťových soustav .....	14
5 Aplikační možnosti vyztužování síťovými soustavami.....	15
5.1 Vyztužení zemního prostředí s předstihem.....	15
5.2 Následné vyztužování prostředí.....	16
6 Stabilizace svahu zářezu vyztužením síťovými soustavami.....	19
6.1 Metoda řešení.....	20
6.2 Návrh parametrů vyztužení zemin síťovými soustavami .....	21
6.3 Příklad.....	22
6.3.1 Řešení geometrie zářezu .....	22
6.3.2 Výpočet sil uvolněných výkopem zářezu .....	25
6.3.3 Výpočet sil stabilizujících svah zářezu .....	27
6.3.4 Výpočet tahové únosnosti hřebíku sítě .....	32
6.3.5 Výpočet délky hřebíku.....	33
7 Závěr .....	35
8 Seznam obrázků.....	36
9 Seznam tabulek .....	38
10 Seznam použité literatury .....	39

## Seznam použitého značení

A - průřezík  $y_T$  a  $y_s$

$F_{1h}=F_{2h}$  - únosnost hřebíku v tahu [kN]

$F_{kh}$  - síla v křížení dvou hřebíků [kN]

$F_{sz}$  - síla stabilizující zářez [kN]

$F_{us}$  - uvolněná síla [kN]

$F_\psi$  - tahová únosnost ve směru  $\psi$  [kN]

G - tíha [N]

H - hloubka zářezu [m]

N - newton

N - normála

Pa - pascal

Sa - zemní tlak [Pa]

T - smyková síla [kN]

a - rozteč ústí hřebíků [mm]

b- rozteč řad hřebíků [mm]

c- soudržnost [Pa]

e - výška etáže [m]

$k_0$  - součinitel zemního tlaku [-]

$l_h$  - délka hřebíku [m]

m - metr

mm - milimetr

$y_T$  - funkce profilu terénu

$y_s$  - funkce profilu svahu

$\alpha$  - úhel terénu [°]

$\alpha_s$  - úhel zářezu [°]

$\omega$  - úhel křížení dvou hřebíků [°]

$\psi$  - směrový úhel tahové únosnosti  $F_{\psi \neq 0}$  v ploše síťové roviny [°]

$\xi$  - kší - úhel plochy sítí od normály [°]

$\varphi$  - úhel vnitřního tření [°]

X - chí - úhel uvolněných sil [°]

$\gamma$  - objemová tíha zeminy [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

# 1 Úvod

Vyztužování zemin je dnes běžně rozšířená technologie, která je uplatňována v situacích, kdy je od zeminy požadována vyšší únosnost, než která jí je vlastní, nebo kdy je k dispozici méně únosná zemina, jejíž únosnost je potřeba zvýšit.

Standardní vyztužovací konstrukcí aplikovanou v zeminách jsou geomříže a geotextílie ze syntetických materiálů. Tyto jsou umísťovány do konstrukcí zemních násypů. Během ukládání zeminy jsou tyto pokládány na jednotlivé ukládané vrstvy zeminy, ze kterých je postupně konstrukce budována.



Obr. 1 - Pokládání geomříží

Další formou výztužní konstrukce jsou tyčové ocelové zemní hřebíky, kterými jsou vyztužovány svahy zářezů.



Obr. 2 - Instalace tuhých ocelových hřebíků

Pokusně se rovněž zkouší vyztužovat zeminy krátkými vlákny ze syntetických materiálů rozptýlenými v zemině. Tato forma výztužení se doposud neprosadila v praxi.



Dosavadní zkušenosti zatím jednoznačně neprokázaly očekávaný vyztužovací efekt, rovněž stav aplikační technologie nedosáhl potřebné úrovně pro masovou a spolehlivou aplikaci vláken v zemině.



Obr. 3 - Vlákna a vyztužení zeminy krátkými vlákny.

Jmenovaná řešení vyztužování zeminy mají své hranice. Geomřížemi a geotextíliemi lze vyztužovat jen sypané konstrukce a nelze je aplikovat v zářezích. Tyčové elementy zeminu efektivně vyztuží jen za podmínky, je-li hustota jejich rozmístění vysoká, což zpravidla není splněno. Pokud je uvedená podmínka splněna, efekt vyztužení zeminy je omezen pouze na jeden směr.

Uvedená řešení vyztužování zemin nejsou mimořádné a neznámé technologie, ale jen velmi zjednodušeně napodobují to, co je v přírodě zcela běžné a všudypřítomné, kdy kořenové systémy rostlin a stromů spolehlivě trvale stabilizují přírodní i umělé svahy budované zeminou.

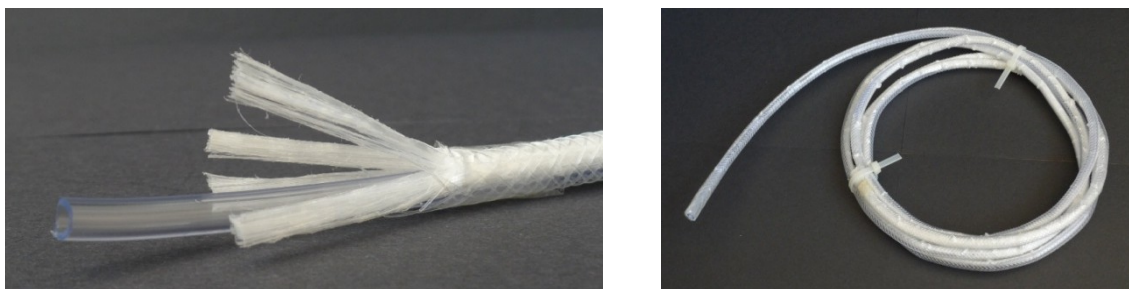


Obr. 4 - Kořenová síť stromu

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou činnosti soustavy síťové struktury z netuhých zemních hřebíků, která má, podobně jako kořenová soustava stromů, vyztužovat - stabilizovat zeminy.

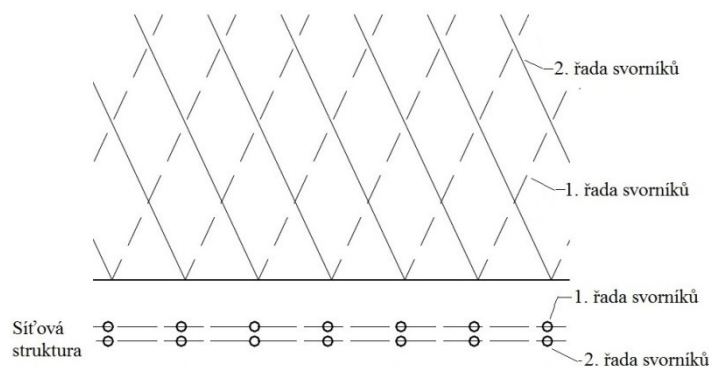
## 2 Konstrukce síťové soustavy

Konstrukce síťové soustavy napodobuje kořenovou soustavu stromů jak formou - ohebná poddajná síťová struktura z flexibilních zemních hřebíků s nezávislými prameny (viz Obr. 5), tak materiálem, kdy jsou hřebíky vyrobeny ze syntetických vláken.



Obr. 5 - Flexibilní zemní hřebík s nezávislými prameny

Síťová soustava je vytvořena ze dvou rovinných paralelních soustav. Obě soustavy leží těsně vedle sebe a navzájem se odlišují směrem orientace hřebíků. Při kolmém průmětu se obě soustavy hřebíků zobrazí jako síťová struktura (viz Obr. 6).

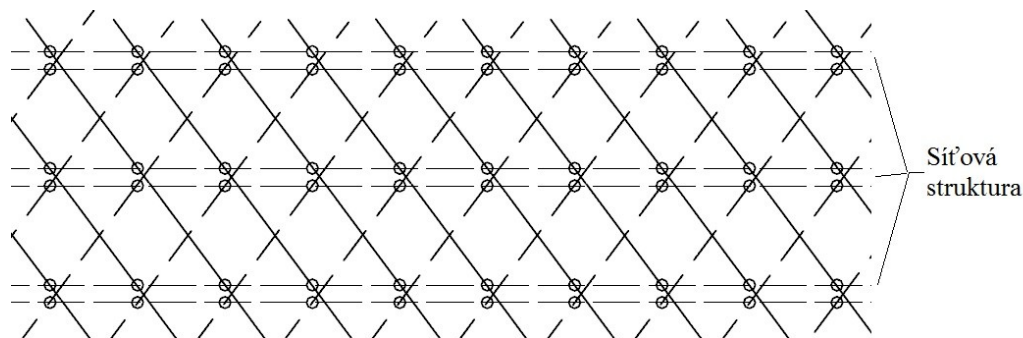


Obr. 6 - Vytvoření síťové soustavy

Podmínkou vytvoření sítě je, aby na každém hřebíku existovaly minimálně tři body křížení s hřebíky z protilehlé hřebíkové soustavy.

Vytvoření skutečné vazby v bodě křížení dvou hřebíků je dosaženo technologicky zainjektováním hřebíku v zemině vhodnou injektážní směsí.

Konstrukce flexibilního zemního hřebíku s nezávislými prameny (dvoupramenný, čtyřpramenný, šestipramenný) umožňuje i provedení zasíťování (vyztužení – stabilizaci) povrchu volné plochy vyztužovaného zemního tělesa, například povrchu svahu zářezu (viz Obr. 7), nebo volnými prameny může být zachycena geotextílie nebo geobuňky, chránící povrch plochy zářezu před klimatickými povětrnostními vlivy.



Obr. 7 - Zasíťování povrchové plochy svahu zářezu dvoupramenným flexibilním zemním hřebíkem

Praktická instalace flexibilního svorníku je možná s použitím soudobé techniky, která se používá pro instalaci tyčových ocelových hřebíků, nebo by bylo možno provádět vpichování hřebíku technikou, která je používána pro instalaci pásových vertikálních drénů.



a)



b)

Obr. 8 - Provádění vertikálního drénu

Koncepce flexibilního hřebíku umožňuje výrobu hřebíku v libovolné délce a jeho navinutí na cívku. Z cívky se na staveništi odvine požadovaná délka. Při provádění vrtů nehrozí poškození vrtného nástroje, dojde-li k navrtání již instalovaného hřebíku. Hřebík porušený vrtným nástrojem při instalaci dalšího hřebíku nemusí být vyřazen z činnosti.

Vyřazení z činnosti nastane jen tehdy, budou-li všechny prameny porušeny. Přerušení části úseku jednoho hřebíku neznamená jeho vyřazení z vyztužovací činnosti v síťové soustavě.

Volbu injektážní směsi k zainjektování hřebíku určuje charakter zeminy. Hřebíky v sypkých zeminách je vhodné injektovat cementovou směsí, plastické zeminy vápennou směsí.

Organické umělé hmoty, ze kterých je hřebík proveden, nevyžadují ochranu proti působení zemní vlhkosti, podzemní vodě, biologické a chemické agresivitě prostředí.

Vyztužovací síťová soustava z těchto hřebíků nepředstavuje podstatnou překážku pro provádění následných zásahů ve vyztuženém prostředí a ani nebude činit zásadní problémy při odstraňování a likvidaci vyztuženého prostředí.

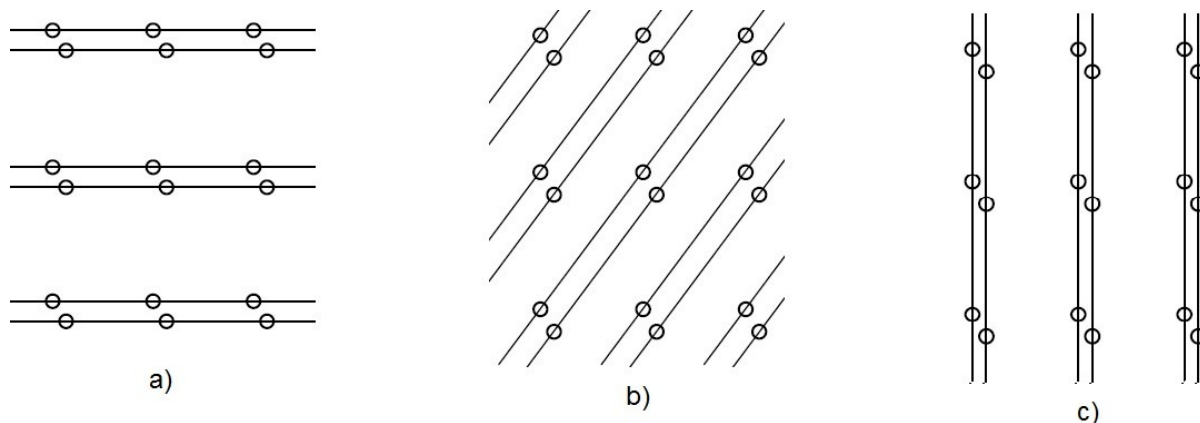
### 3 Varianty uspořádání síťových soustav

Uspořádání síťových soustav není geometricky, polohově ani prostorově omezeno vnějšími činiteli a nabízí se zde téměř nevyčerpatelná paleta řešení, která poskytuje prostor pro optimalizaci.

Geometrické uspořádání síťových soustav má dva základní volitelné parametry. Prvním volitelným parametrem je směrové uspořádání síťových soustav, druhým je geometrie rozložení ústí hřebíků na volné ploše svahu.

#### 3.1 Směrové uspořádání síťových soustav

Síťová soustava má formu plochy, kterou v prostoru obecně definují dva parametry směr a úklon. K definování směrového uspořádání síťové soustavy je vhodné zavést konstrukční parametr, který popisuje úklon průsečnice plochy síťové soustavy s volnou plochou, na které leží ústí hřebíků, od horizontální roviny. Dle hodnoty úklonu může být síťová soustava horizontální, ukloněná, nebo vertikální (viz Obr. 9).



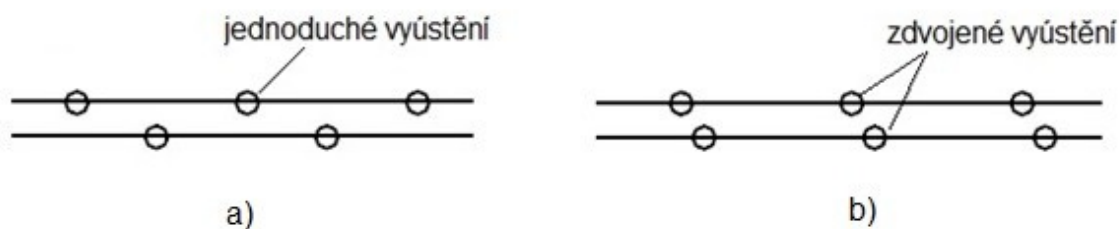
Obr. 9 - Úklon síťové soustavy

a) horizontální, b) ukloněná, c) vertikální

#### 3.2 Geometrie rozložení ústí hřebíků na volné ploše

Rozložení ústí hřebíků na volné ploše je možno provést několika variantami. Pro definování síťové soustavy je vhodné zavést další dva konstrukční parametry, které definují

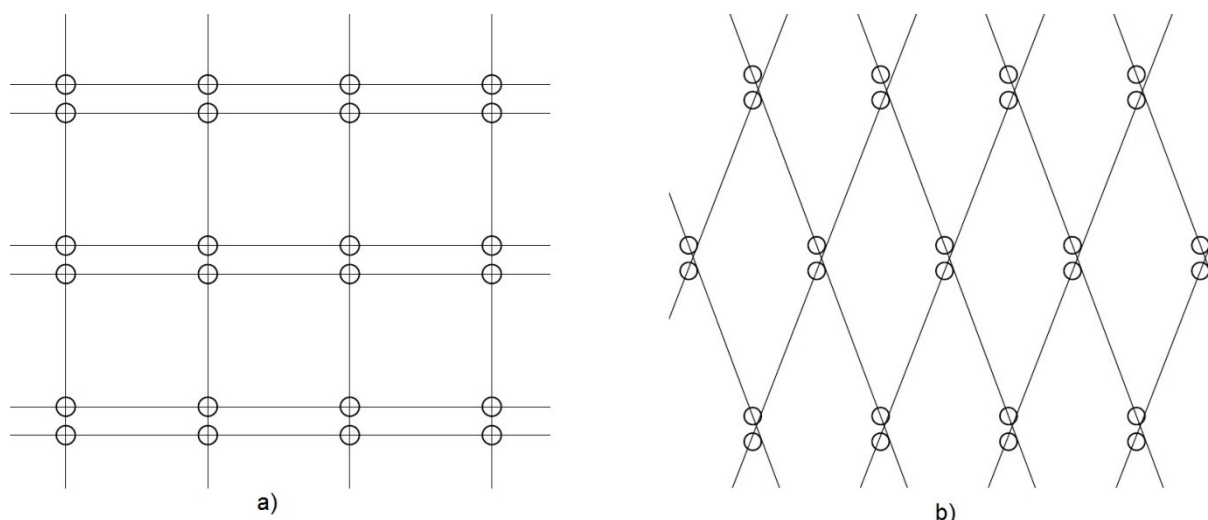
geometrii rozložení ústí hřebíků na volné ploše. První parametr z této skupiny určuje, zda v daném bodě volné plochy bude ústí jednoho nebo dvou hřebíků (viz Obr. 10).



Obr. 10 - Vyústění hřebíků

a) jednoduché vyústění, b) zdvojené vyústění

Druhý parametr určuje vzájemnou polohu dvou sousedních síťových soustav a je relevantní pouze pro variantu síťové soustavy se zdvojeným vyústěním (viz Obr. 11). Síťové soustavy se mohou vyskytovat ve dvou situacích. V první situaci zdvojená ústí sousedních síťových soustav zůstanou a budou uspořádány do čtvercové sítě. V druhé situaci zdvojená ústí sousedních síťových soustav budou navzájem posunuta o jednu polovinu délky rozteče dvou sousedních zdvojených ústí síťové soustavy a budou vytvářet kosočtverečnou síť (viz Obr. 11).



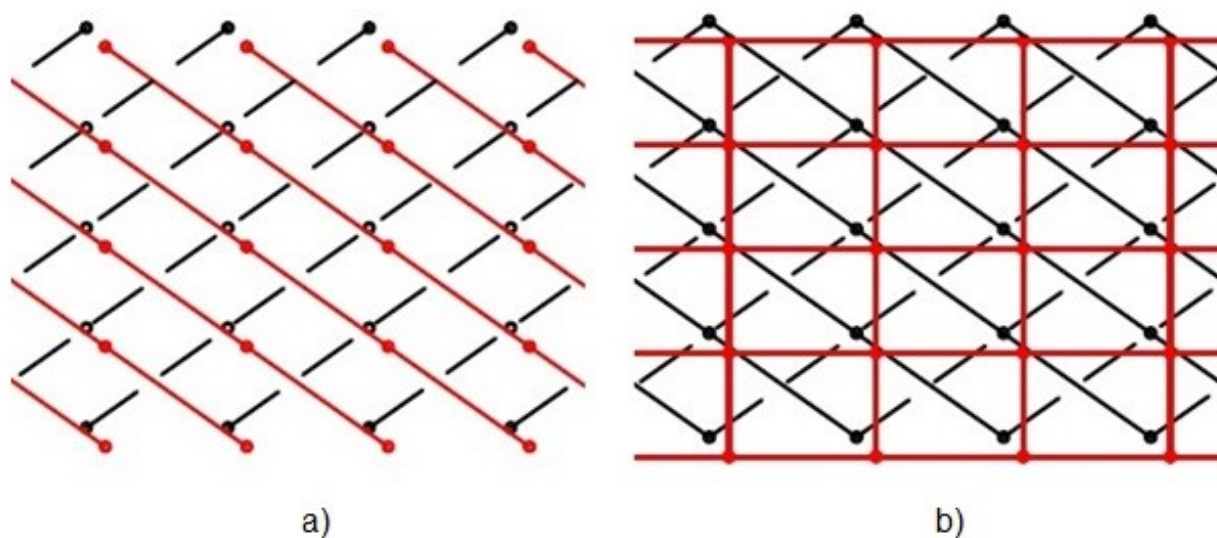
Obr. 11 - Poloha dvou sousedních síťových soustav

a) čtvercová síť ústí hřebíků, b) kosočtverečná síť ústí hřebíků



Geometrie rozložení ústí hřebíků na volné ploše předurčuje varianty řešení vzájemného propojení vystupujících částí hřebíků z vyztuženého zemního prostředí. Propojené hřebíky vytváří na volné ploše další síť, která vyztužuje zeminu na volné ploše.

Řešení vyztužující sítě volné plochy je dále podmíněno počtem pramenů jednoho hřebíku. Obrázek č. 12 uvádí schéma zasítování volné plochy pro horizontální uspořádání, zdvojené čtvercové vyústění dvou konstrukčních variant hřebíků. Varianta a) uvádí zasítování volné plochy dvoupramenným hřebíkem, varianta b) uvádí zasítování volné plochy čtyřpramenným hřebíkem.



Obr. 12 - Zasítování povrchu volné plochy

Ukázka zasítování povrchu volné plochy pro horizontální uspořádání, zdvojené čtvercové vyústění dvou konstrukčních variant hřebíků. Varianta a) uvádí zasítování volné plochy dvoupramenným hřebíkem, varianta b) čtyřpramenným hřebíkem.

Obecně z dalších kombinací rozložení ústí hřebíků lze pro příslušnou konstrukci více pramenného hřebíku navrhnout podobná řešení zasítování volné plochy.

## 4 Statická činnost síťové soustavy

Statická činnost síťové soustavy má za cíl účinně působit proti vzniku a rozvoji porušení prostředí smykem na všech potencionálních plochách porušení, což znamená uměle podpořit a zvýšit smykové pevnostní parametry prostředí do té míry, že k porušení smykem nedojde.

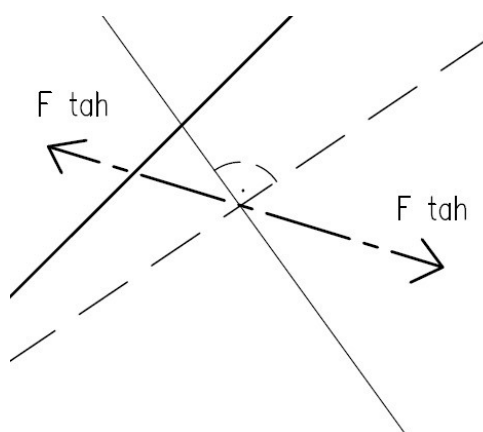
Druhý cíl činnosti síťové soustavy je vytvořit v kombinaci s prostředí umělou strukturu, která bude schopna stabilizovat okolní zóny prostředí. Tento cíl nelze dosáhnout jedinou soustavou, ale vhodnou aplikací několika soustav vhodně uspořádaných.

Statická činnost síťové soustavy je komplexním procesem, který tvoří následující dílčí jevy. Výchozí elementární úroveň tvoří statická činnost jednoho hřebíku, následnou druhou úrovní je plošná struktura síťové soustavy tvořená hřebíky a body křížení hřebíků. Poslední úrovní je statická činnost uspořádaného souboru několika síťových soustav.

### 4.1 Statická činnost zemního hřebíku v zeminách

Základním prvkem vyztužovací síťové soustavy je hřebík a dvě formy jeho činnosti.

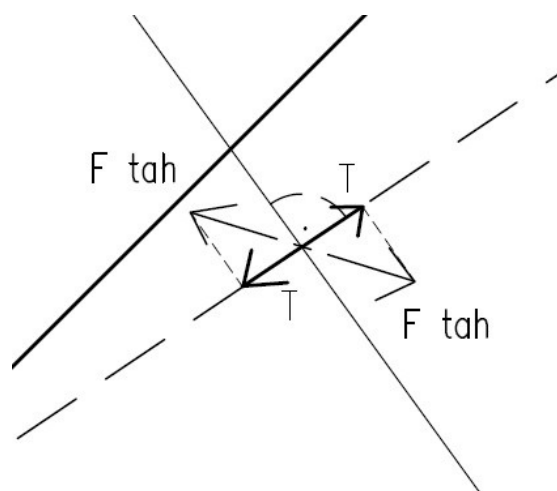
- přímý přenos a zachycení tahových sil a napětí v axiálním směru; závisí na tahové únosnosti hřebíku



Obr. 13 - Přímý přenos zachycení tahových sil

- nepřímý přenos a zachycení smykových sil a napětí v směrech odkloněných od axiální osy hřebíku; proměnlivá, závisí na úhlu odklonu plochy od axiální osy hřebíku





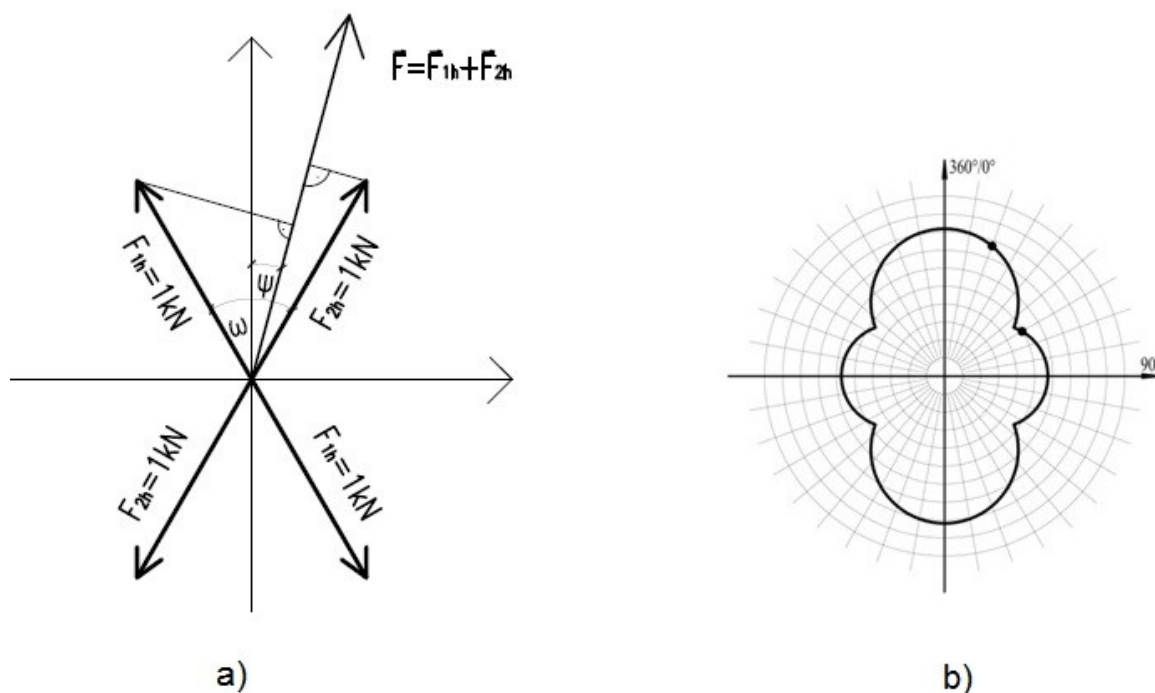
Obr. 14 - Nepřímý přenos zachycení tahových sil

Přímý přenos a zachycení tahových sil a napětí v axiálním směru se projevuje udělením, eventuálně zvýšením soudržnosti zemině ve směru osy hřebíku.

Nepřímý přenos a zachycení smykových sil a napětí ve směrech odkloněných od axiální osy hřebíku se projeví současně dvěma formami zvýšení pevnostních parametrů zeminy udělením nebo zvýšením soudržnosti zeminy v příslušném směru a přírůstkem tangenty úhlu, při které zůstává zemina v daném bodě stabilní, tj. dojde ke zvýšení hodnoty úhlu vnitřního tření vyztužené zeminy.

## 4.2 Statická činnost dvou hřebíků – bodu křížení

Vyztužovací činnost síťové soustavy je dána kombinací elementární činnosti (tahové únosnosti) dvou hřebíků v bodě jejich křížení.



Obr. 15 - Statická činnost dvou hřebíků

a) schéma statické kombinované činnosti dvou hřebíků, b) polární diagram tahové únosnosti bodu křížení síťové soustavy

Následující vztahy uvádí obecné řešení vektorového součtu silového působení dvou křížících se hřebíků.

$$\vec{F} = \vec{F}_{1h} + \vec{F}_{2h}$$

$$F_{\psi=0} = 2 \cdot F_h \cdot \cos \frac{\omega}{2}$$

$$F_{\psi \neq 0} = F_{\psi=0} \cdot \cos \psi$$

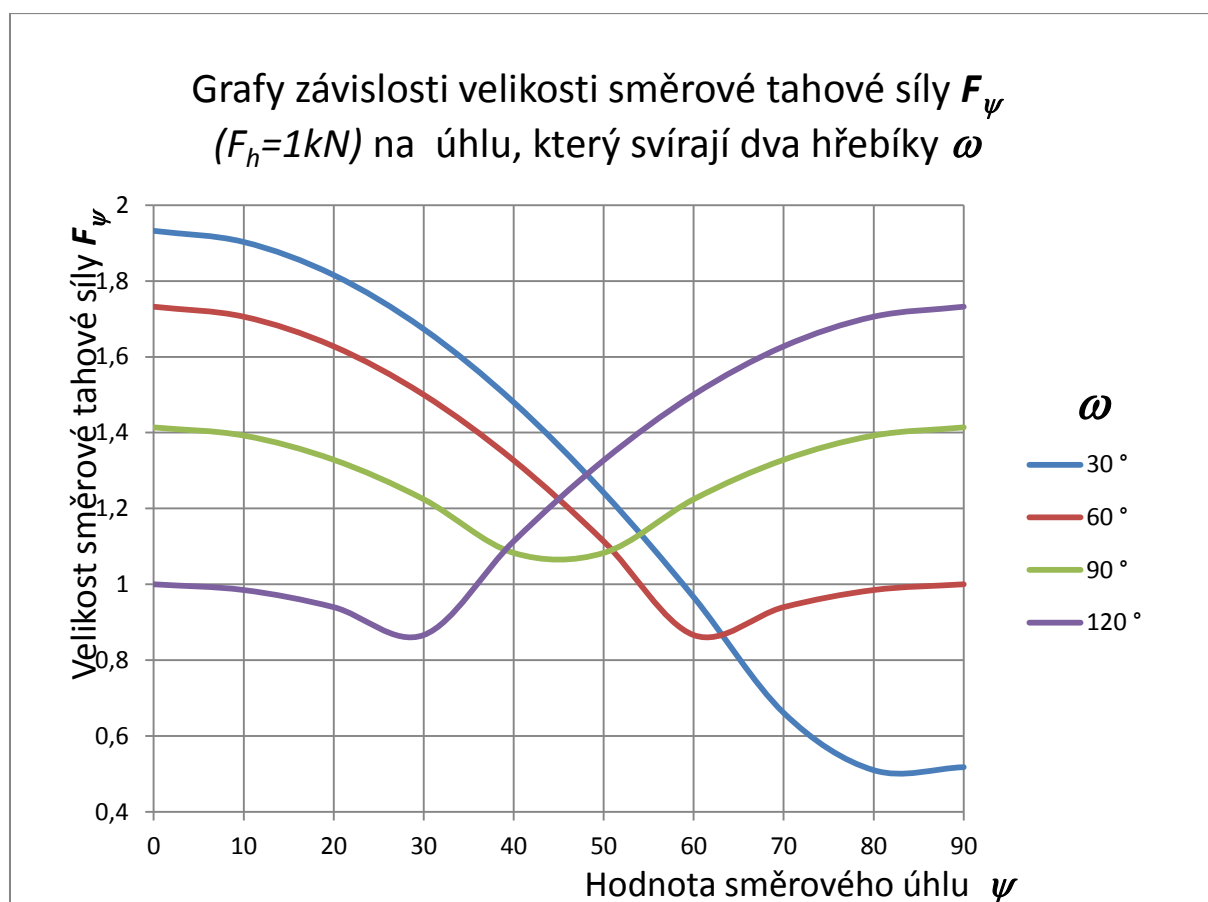
$F_{1h}=F_{2h}$  - únosnost hřebíku v tahu

$F_{\psi}$  - tahová únosnost ve směru  $\psi$

$\omega$  - úhel křížení dvou hřebíků

$\psi$  - směrový úhel tahové únosnosti  $F_{\psi \neq 0}$  v ploše síťové roviny

Grafy na Obr. 16 přináší výsledky parametrických výpočtů směrové tahové únosnosti v ploše síťové statické činnosti bodu křížení dvou hřebíků v závislosti na úhlu jejich křížení soustavy. Jednotlivé grafy jsou rozvinutým polárním diagramem a umožňují odečtení směrové tahové únosnosti bodu křížení dvou hřebíků. Výpočty jsou provedeny pro tahovou únosnost hřebíku 1kN (jednotková hodnota únosnosti).



Obr. 16 - Graf výsledků parametrických výpočtů směrové tahové únosnosti

K stanovení směrové únosnosti bodu křížení pro jinou hodnotu tahové únosnosti hřebíku je potřeba hodnotu odečtenou z grafu násobit hodnotou tahové únosnosti hřebíku.

### 4.3 Statická činnost síťové soustavy

Statická činnost vyztužovací síťové soustavy je odvozená od vyztužovací činnosti hřebíku. Rozdíl je pouze v rozšíření dimenzí vyztužení zeminy. Zatímco jednotlivé hřebíky zachycují tahové síly pouze v směru podélné osy, síťová soustava zachycuje tahové síly v celé ploše sítě.

Kromě zachycení a přenosu tahových sil síťová soustava zachycuje a přenáší s různou intenzitou smykové síly a napětí na všech rovinách odkloněných od roviny (plochy) sítě.

Obě formy činnosti síťové soustavy se přenáší do parametrů smykové pevnosti zemin a zvyšují soudržnost a úhel vnitřního tření zeminy.

#### **4.4 Statická činnost skupiny síťových soustav**

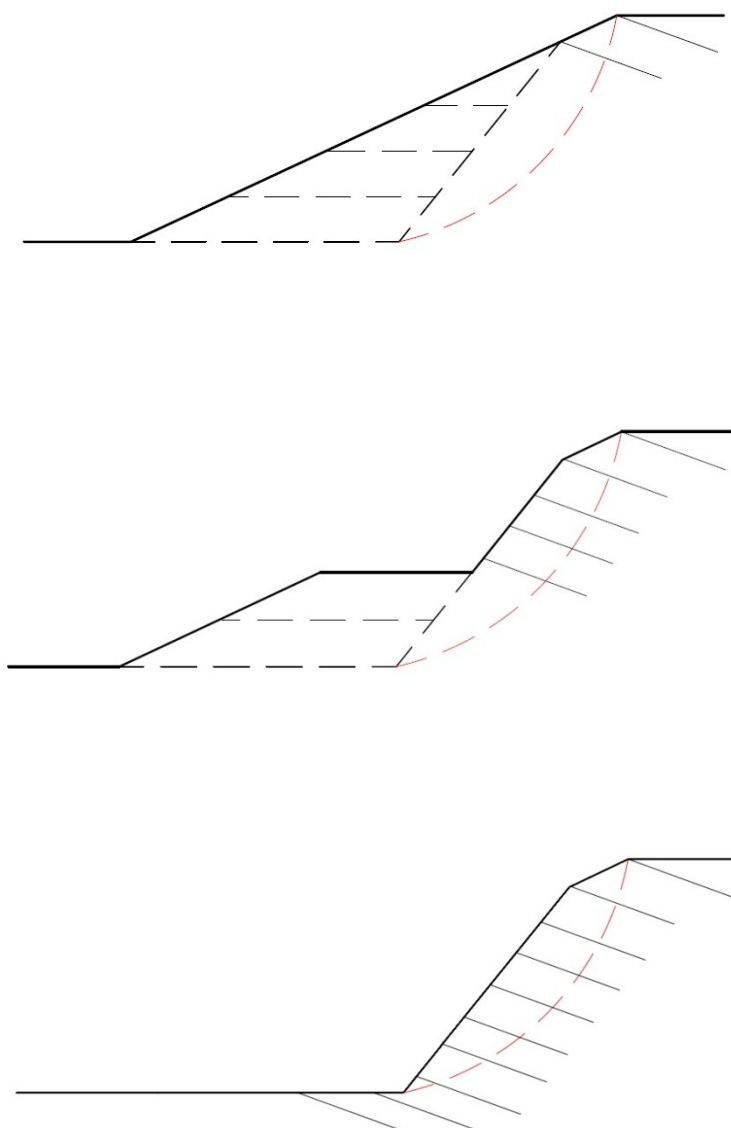
Statická činnost skupiny síťových soustav je dána integrací činností dílčích síťových soustav a efekt zvyšování smykových parametrů zeminy a silového působení hřebíků implementuje prostorově do všech směrů na celou vyztuženou oblast.

## 5 Aplikační možnosti vyztužování síťovými soustavami

Aplikační možnosti vyztužování síťovými soustavami lze rozdělit dle geotechnických okolností do dvou skupin.

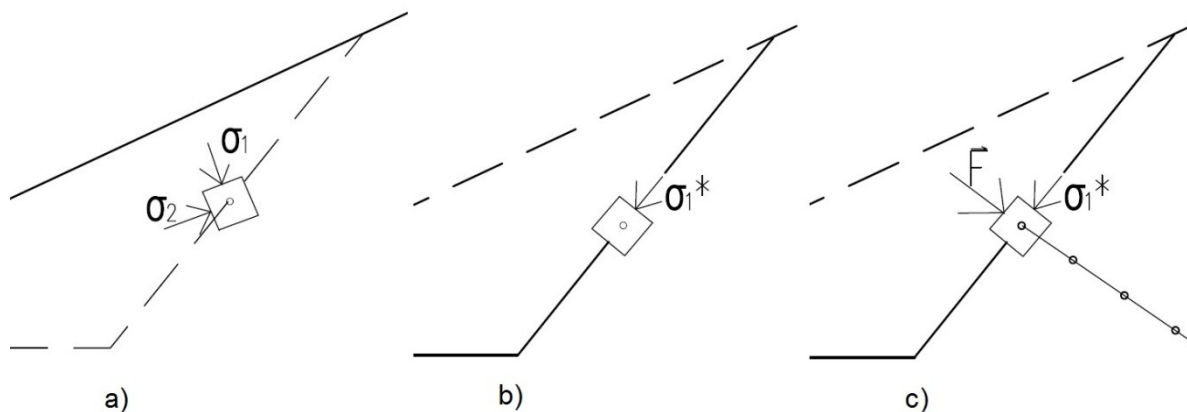
První forma aplikací prostředí vyztužuje s předstihem před zahájením výkopových prací, kdy prostředí není narušeno ztrátou smykové pevnosti. Druhá forma aplikací vyztužuje prostředí, kdy ke ztrátě došlo a je potřeba ztrátu smykové pevnosti prostředí uměle obnovit.

### 5.1 Vyztužení zemního prostředí s předstihem



Obr. 17 - Schéma vyztužování zemin s předstihem

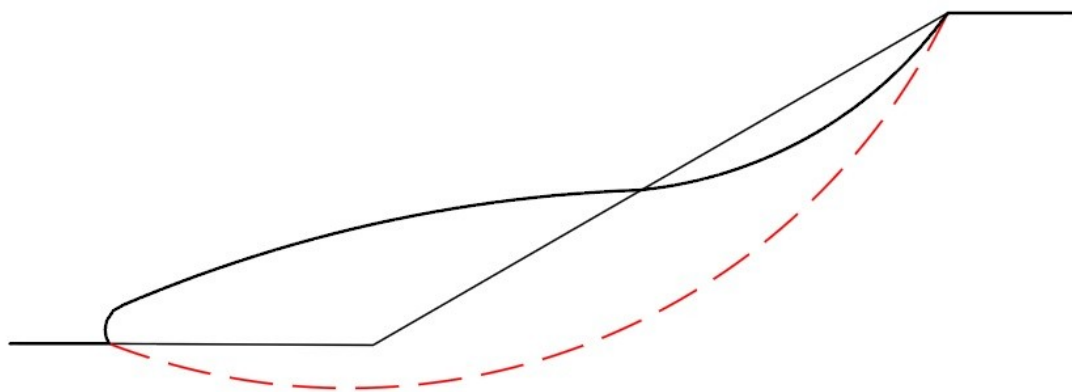
Cílem vyztužení zemin v této variantě je zachovat, nebo zamezit změně napěťového stavu – minimalizovat změnu deviátoru napětí (smykových napětí), ke které dochází při odtěžování zeminy při výkopových pracích (viz Obr. 18)

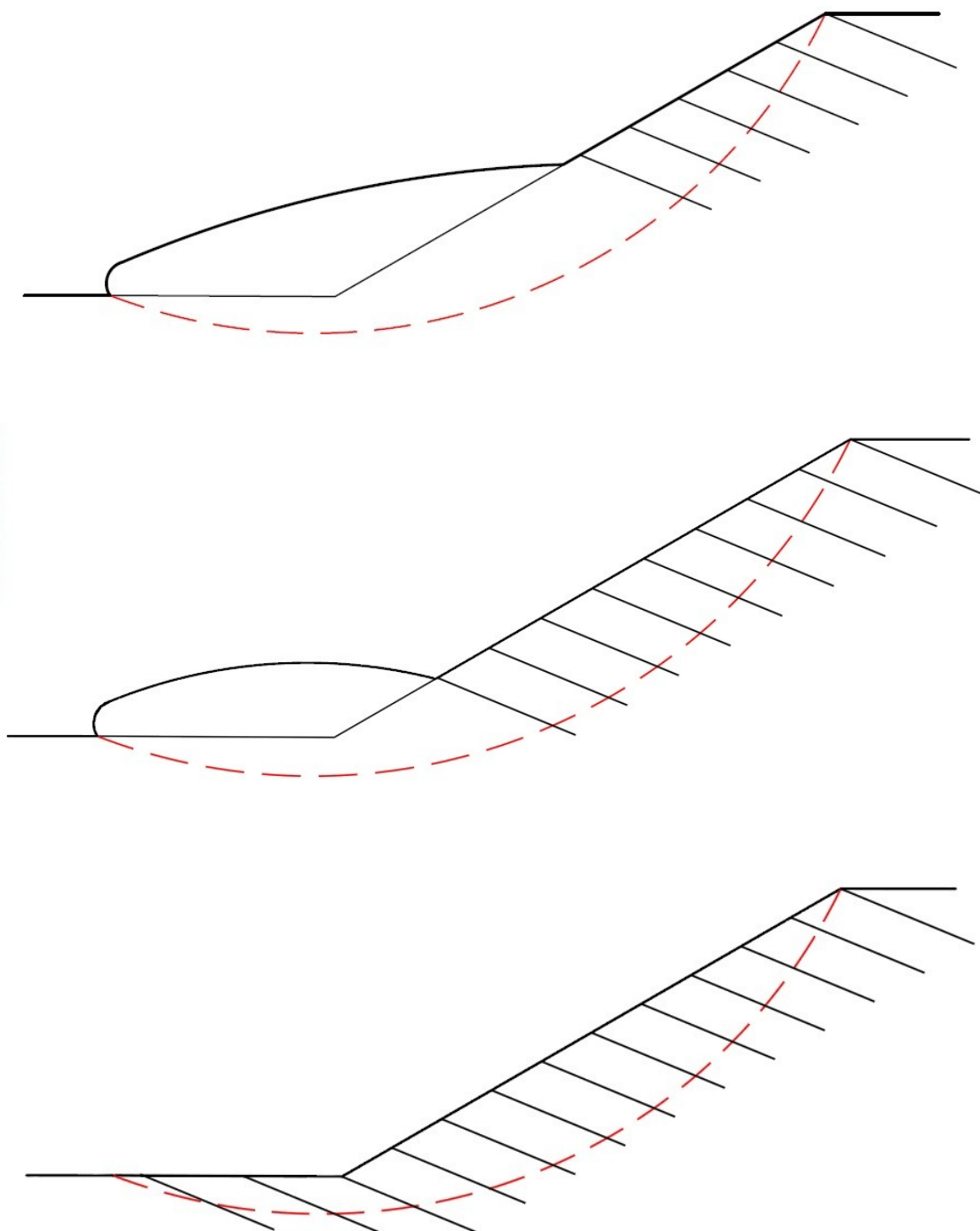


Obr. 18 - Schéma uvolnění napětí při provádění hloubení

Situace na Obr. 18 a) uvádí stav primární napjatosti ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  - hlavní napětí) na ploše svahu zářezu před zahájením hloubení zářezu. Obrázek b) uvádí stav indukované napjatosti po odtěžení a situace c) uvádí stav napjatosti za situace, bude-li zemina s předstihem vyztužena síťovou soustavou ze zemních hřebíků.

## 5.2 Následné vyztužování prostředí





Obr. 19 - Schéma následného vyztužování zemin

V tomto případě, kdy již nastal stav ztráty stability prostředí v důsledku překročení smykové pevnosti zemin, síťové soustavy mají za cíl nahradit hodnoty snížení smykové pevnosti prostředí, ke kterému následkem porušení už došlo a zajistit trvalou stabilitu svahu po jeho sanaci.

Podle účelu ze síťových soustav lze konstruovat opěrné stabilizační konstrukce analogické gravitačním zdem, nebo obecně zpevňovat – zvyšovat únosnost a stabilitu prostředí.

Pokud budou síťové soustavy konstruovány z hřebíků ze syntetických materiálů, pak bude umožněno opakovaně znovu vyztužit jimi již jednou vyztužené prostředí, jestliže se časem zjistí, že nebylo dosaženo požadovaného stabilizačního efektu, a je nutno učinit dodatečná opatření.

Síťová soustava ze syntetických hřebíků také nepředstavuje žádnou překážku pro následné aktivity ve vyztuženém prostředí.

Syntetický materiál je spolehlivou zárukou dlouhodobé životnosti vyztužení ve vlhkém prostředí, pod hladinou podzemních vod a v agresivních podmínkách.

Stálost syntetických materiálů nedává důvod k obavám, že prostředí jimi bude kontaminováno, důležité je pouze zajistit, aby byly trvale chráněny před slunečním ultrafialovým zářením a vysokými teplotami, které jediné mohou vést k jejich degradaci a následné zkáze.



## **6 Stabilizace svahu zářezu vyztužením síťovými soustavami**

Vhodnou praktickou aplikací síťových soustav, jak plyne z předchozích kapitol, je jejich užití při řešení stabilizace svahů zářezů v zeminách.

Předpokládejme, že povrch reliéfu terénu je tvořen zeminou na celou výšku zářezu. Dále úklon terénu je determinován smykovými pevnostními parametry materiálu a odpovídá stavu labilní rovnováhy, tj. stupeň stability je o něco málo větší než jedna (např. 1,05). Stabilita úklonu terénu je určena smykovými pevnostními parametry zemin a přibližně stavem geostatické napjatosti, která se při provedení výkopu zářezu zásadním způsobem změní. Změna nastává především v oblasti prostředí přiléhající k svahu zářezu (odkaz na Obr. 18). Pro tento nový napěťový stav smyková pevnost prostředí nebude dostatečná a prostředí se poruší smykem, což se projeví sesutím svahu (viz Obr. č. 20).



Obr. 20 - Sesuvu zářezu v zemině

Vyztužením oblasti svahu zářezu uspořádanou skupinou síťových soustav z hřebíků se ovlivní dvě hlavní příčiny vedoucí ke ztrátě stability svahu. Statická činnost uspořádané skupiny síťových soustav z hřebíků zajistí příznivější napěťový stav v oblasti prostředí přiléhající k svahu zářezu a zabrání značnému poklesu normálových sil na plochách usmyknutí. Přítomnost hřebíků uměle doplní a zvýší hodnoty smykových pevnostních parametrů prostředí.

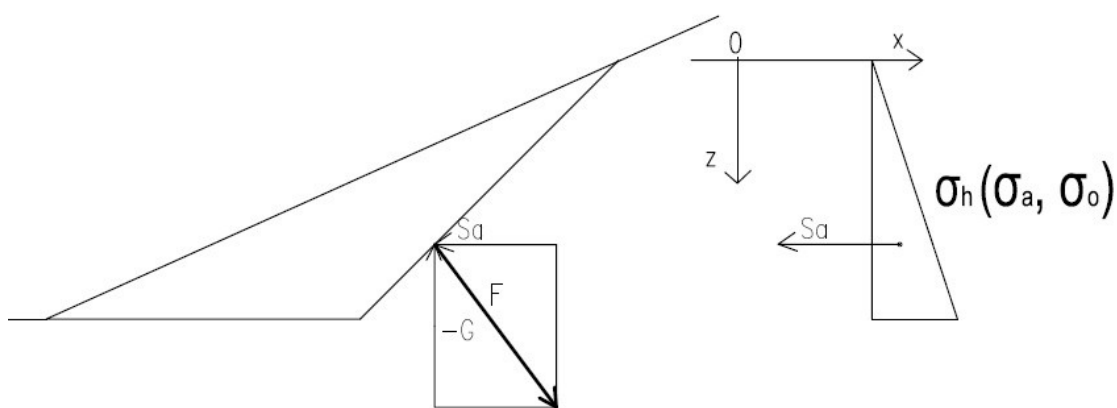
Návrh stabilizace svahu zářezu uspořádanou skupinou síťových soustav z hřebíků zohledňuje obě formy její statické činnosti.

## 6.1 Metoda řešení

Návrh řešení stabilizace svahu zářezu uspořádanou skupinou síťových soustav z hřebíků dle výše jmenovaných forem činnosti předurčuje pro tento návrh použití metody silové rovnováhy. Parametry skupiny síťových soustav z hřebíků ovlivňují napěťový stav v prostředí a modifikují smykové pevnostní parametry prostředí, což jsou jednoznačně silové okrajové podmínky, které jsou zapotřebí k provedení výpočtu.

Řešení deformační metodou je rovněž možné, nicméně je mnohem náročnější a přesahuje požadavky, jež jsou kladeny na diplomové práce.

Ovlivnění napěťového stavu v bodě prostředí vychází z předpokladu, že reakce od hřebíku zachytí síly indukované v tělese svahu zářezu v důsledku výkopu zářezu (odlehčení) a dále stabilizuje příslušný zemní tlak mobilizovaný provedením výkopu zářezu. Hodnota velikosti tohoto zemního tlaku bude ležet v intervalu mezi aktivním ( $\alpha_a$ ) a klidovým ( $\alpha_0$ ) tlakem (viz Obr. č. 21)



Obr. 21 - Zachycení sil od odlehčení a zemního tlaku.

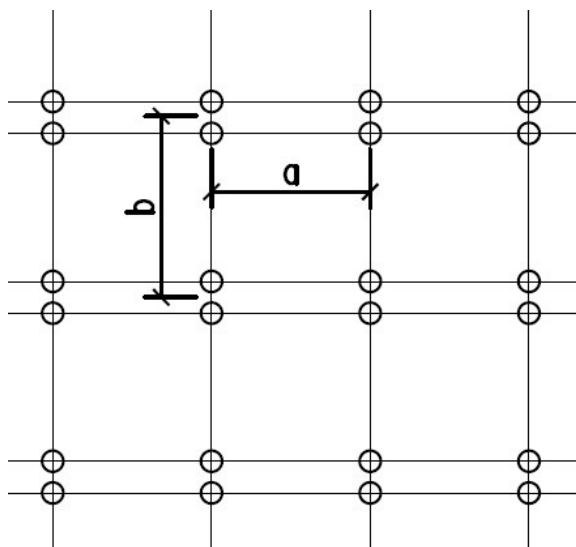
Modifikace smykových pevnostních parametrů, tj. soudržnosti a úhlu vnitřního tření prostředí je projednána v Kapitole č. 4. Základem řešení je v tomto případě stanovení hodnoty příspěvku k stávajícím hodnotám parametrů smykové pevnosti prostředí od přítomnosti skupiny síťových soustav z hřebíků v bodech, které se nachází na kritických smykových plochách, nebo ve směrech působení maximálních smykových napětí.

## 6.2 Návrh parametrů vyztužení zemin sít'ovými soustavami

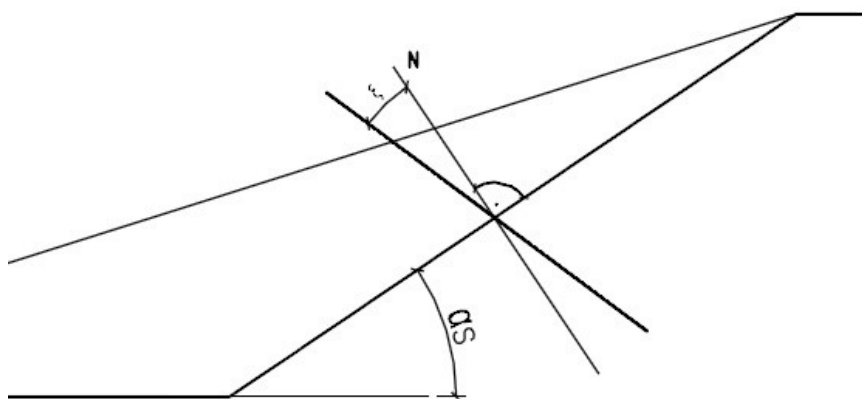
Parametry skupiny sít'ových soustav z hřebíků se navrhují na požadavek, aby byl dosažen stupeň vyztužení, který zajistí dostatečnou smykovou pevnost vyztuženého prostředí, nebo obecně tzv. vnitřní stabilitu a dále stabilizační efekt tělesa vyztuženého prostředí, které bude mít za úkol stabilizovat prostředí za vyztuženou oblastí, tj. zajišťovat vnější stabilitu prostředí.

Parametry vyztužení prostředí skupinou sít'ových soustav z hřebíků jsou:

- tahová únosnost jednoho hřebíku ( $F_h$ ), pokud se předpokládá, že budou používány hřebíky o stejné únosnosti; pokud je to vhodné mohou být navrženy i hřebíky s různou tahovou únosností; nutno dodržet zásadu, že hřebíky v jedné síti budou mít stejnou tahovou únosnost,
- úhel křížení hřebíků ( $\omega$ ),
- volba geometrického řešení uspořádání vyústění hřebíků a stanovení všech popisných parametrů řešení viz Kapitola 3 - (směr a úklon sít'ové soustavy, vyústění jednoho nebo dvou hřebíků, provázání pramenů do čtvercových či kosočtvercových obrazců, počty pramenů v hřebíku), dále rozteče řad, rozteče ústí, úklon ploch sítí od normály k ploše svahu ( $\xi$ ),



Obr. 22 - Rozteče řad a ústí



Obr. 23 - Úklon ploch sítí od normály k ploše svahu

- délky hřebíků; v jednotlivých síťových soustavách se mohou lišit, v rámci jedné soustavy musí zůstat stejné; důležité je, aby body křížení pokryly oblast ohroženou vznikem porušení smykem a převedly zachycené síly do stabilní oblasti prostředí.

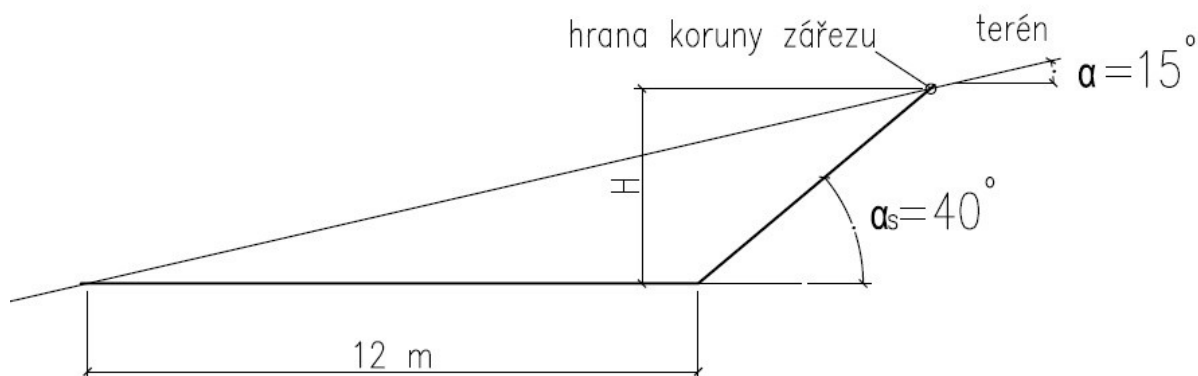
### 6.3 Příklad

Vyztužení svahu zářezu dopravní komunikace v zemním prostředí skupinou síťových soustav ze zemních hřebíků. Úklon původního terénu je  $15^\circ$  a předpokládaný stupeň stability svahu terénu je 1,3 (požadavek na dlouhodobou trvalou stabilitu). Šířka dopravní komunikace v základové spáře je 12 m a úklon svahu zářezu je dán společenskými okolnostmi, a má být  $40^\circ$ . Úloha je řešena silovou metodou.

Návrh je rozdělen do tří úkolů: řešení geometrie zářezu; výpočet sil uvolněných výkopem zářezu ( $F_{us}$ ); výpočet sil stabilizujících svah zářezu ( $F_{sz}$ ); výpočet tahové únosnosti hřebíku sítě ( $F_h$ ).

#### 6.3.1 Řešení geometrie zářezu

Řešení geometrie zářezu stanovuje okrajové geometrické podmínky řešené úlohy, které determinují geometrické vstupní parametry pro výpočty uvolněných sil.

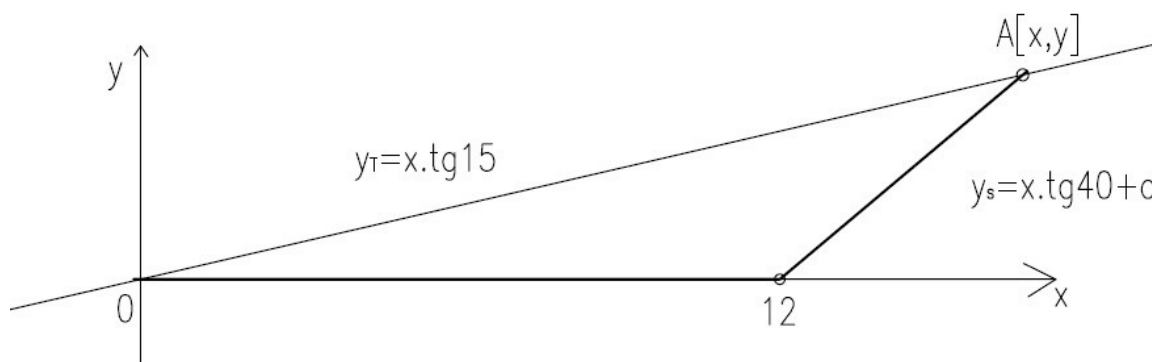


Obr. 24 - Schéma geometrie zářezu

$H$  - hloubka zářezu

$\alpha$  - úhel terénu

$\alpha_s$  - úhel zářezu



Obr. 25 - Schéma zářezu

$y_t$  - funkce profilu terénu

$y_s$  - funkce profilu svahu

$A$  - průsečík  $y_t$  a  $y_s$

Výpočet polohy hrany koruny zářezu a hloubky zářezu (vertikální vzdálenost mezi hranou koruny zářezu a základovou spárou komunikace) vychází ze Schématu na Obr. 25.

Rovnice profilu terénu:

$$y_t = x \cdot \tan 15^\circ$$

$$y_t = 0,267 \cdot x$$

Rovnice profilu svahu:

$$y_s = x \cdot \tan 40^\circ + c$$

$$c = y_s - x \cdot \tan 40^\circ$$

bod [12; 0]

$$c = -x \cdot \tan 40^\circ$$

$$c = -12 \cdot 0,839$$

$$c = -10,069m$$

$$y_s = 0,839 \cdot x - 10,069$$

Hrana koruny zářezu (bod A) - průsečík profilu terénu s profilem svahu zářezu.

$$0,267 \cdot x - y - 0 = 0$$

$$\underline{0,839 \cdot x - y - 10,069 = 0}$$

$$0,572 \cdot x + 0 - 10,069 = 0$$

$$\underline{x = 17,6m}$$

$$y = x \cdot \tan 15^\circ$$

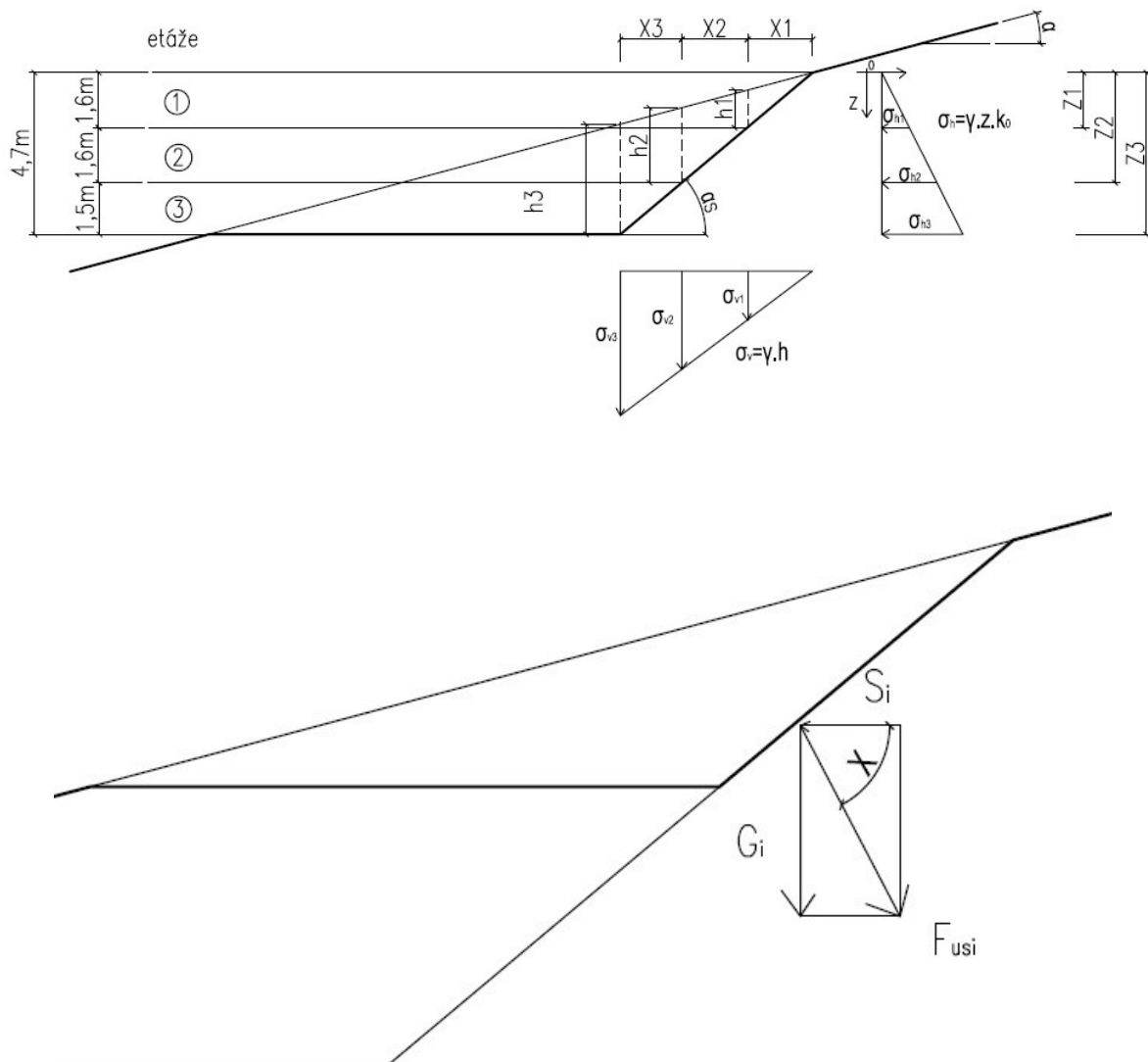
$$y = 17,6 \cdot 0,267$$

$$\underline{y = 4,7m}$$

$$y = H$$

### 6.3.2 Výpočet sil uvolněných výkopem zářezu

Výkop zářezu je rozdělen do tří etáží. Instalace hřebíkových sítí bude probíhat souběžně s výkopy a hřebíky budou zachycovat uvolňované síly ( $F_{us}$ ). Řešení předpokládá, že uvolněné síly výkopovými pracemi budou tvořeny silami od tíhy odtěžené zeminy a horizontální složkou zemního tlaku, který v tomto případě bude mít hodnotu tlaku v klidu, eventuálně horizontální složce primární napjatosti v prostředí před zahájením výkopu (viz Obr. 26).



Obr. 26 - Schéma postupu výpočtu výslednic uvolňovaných sil ( $F_{us}$ ).

$$\gamma = 20 \text{ kN.m}^{-3}$$

hodnota  $\varphi$  viz. Kapitola 6.3.3

$$\varphi = \varphi_{1,3} = 24^\circ$$

$$k_0 = 1 - \sin\varphi = 0,593$$

$$\chi_i = e_i \cdot \tan \alpha_s$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot h_1 \cdot x_1 \cdot \gamma$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot h_2 \cdot (x_1 + x_2) \cdot \gamma - G_1$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \cdot h_3 \cdot (x_1 + x_2 + x_3) \cdot \gamma - G_1 - G_2$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot z_1^2 \cdot \gamma \cdot k_0$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot z_2^2 \cdot \gamma \cdot k_0 - S_1$$

$$S_3 = \frac{1}{2} \cdot z_3^2 \cdot \gamma \cdot k_0 - S_1 - S_2$$

$$F_{usi} = \sqrt[2]{G^2 + S^2}$$

$$\chi = \operatorname{arctg} \frac{G_i}{S_i}$$

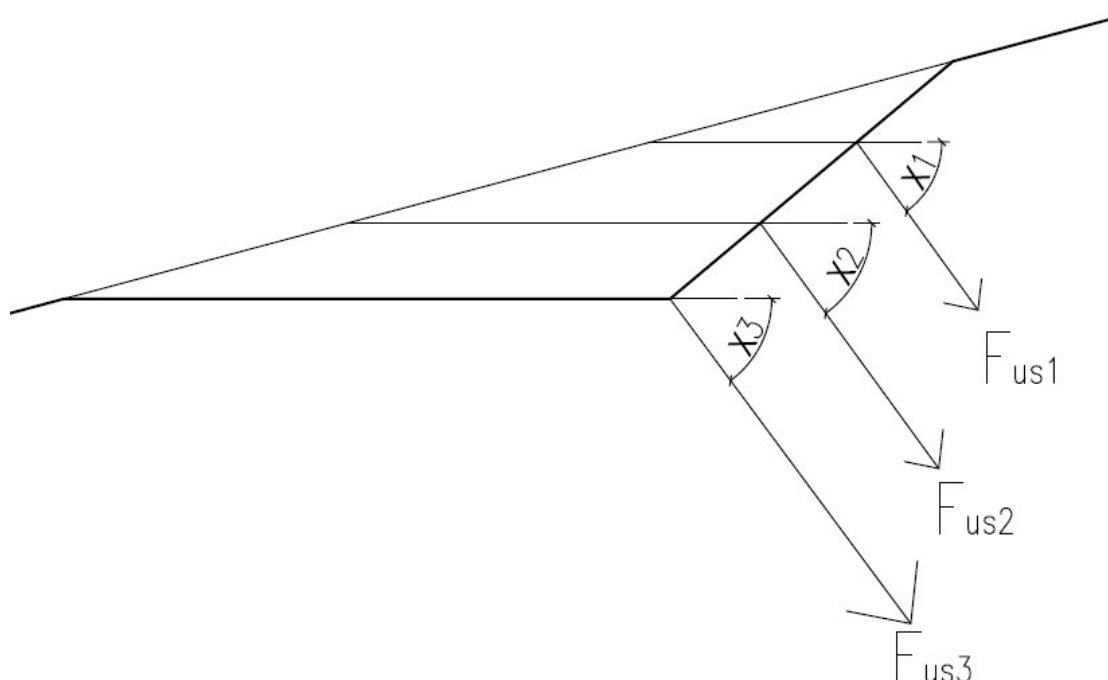
Výsledky výpočtu uvolněných sil ( $F_{us}$ ) jsou shrnuty v Tabulce č. 1

Etáž	h [m]	e [m]	x [m]	G [kN]	z [m]	S [kN]	$F_{us}$ [kN]	X [°]
1	1,105	1,6	1,901	21,01	1,6	15,19	25,93	54,13
2	2,194	1,6	1,901	62,41	3,2	45,56	77,27	53,87
3	3,215	1,5	1,788	96,29	4,7	70,3	119,22	53,87

Tab. 1 - Výsledky uvolněných sil  $F_{us}$



Obrázek č. 27 uvádí průběh velikosti a směr hodnot uvolňovaných sil ( $F_{us}$ ) podél svahu zářezu.

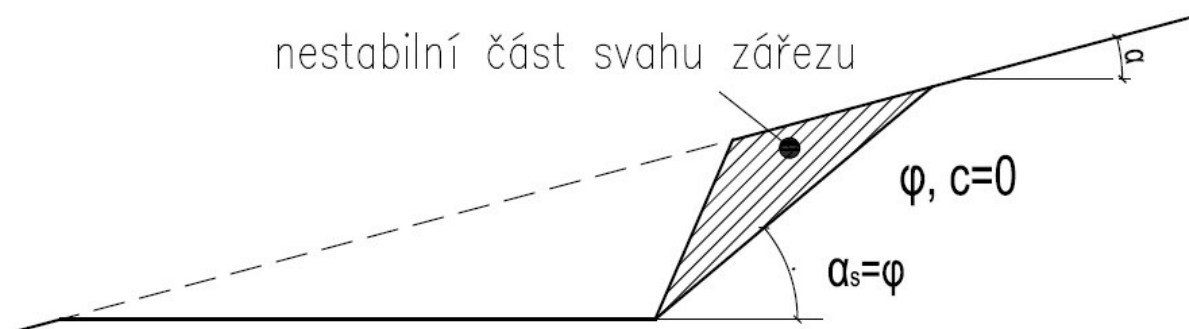


Obr. 27 - Velikost a směr hodnot uvolňovaných sil podél svahu zářezu.

### 6.3.3 Výpočet sil stabilizujících svah zářezu

Výpočet sil stabilizujících svah zářezu je založen na předpokladu, že určitá část svahu zářezu bude nestabilní, jak uvádí schéma situace na Obrázku 28 a bude ji potřeba stabilizovat.

Z hodnot úklonu původního terénu, který je roven  $15^\circ$  a předpokládaného stupně stability svahu terénu 1,3, lze odvodit hodnotu úhlu vnitřního tření zeminy ( $\varphi$ ) ve svahu zářezu. Soudržnost zeminy není do výpočtu zahrnuta. Tato okolnost reprezentuje nejhorší možnou situaci, která může nastat.



Obr. 28 - Schéma situace nestabilní části svahu zářezu.

Výpočet hodnoty úhlu vnitřního tření zeminy ( $\varphi$ ) vychází ze schématu na Obr. 28.

Podmínka rovnováhy stability terénu

$$S. T. \tan \alpha = \tan \varphi$$

S. T. - stupeň stability terénu (S. T. = 1,3)

$\alpha$  - úklon terénu ( $\alpha = 15^\circ$ )

$\varphi$  - úhel vnitřního tření zeminy

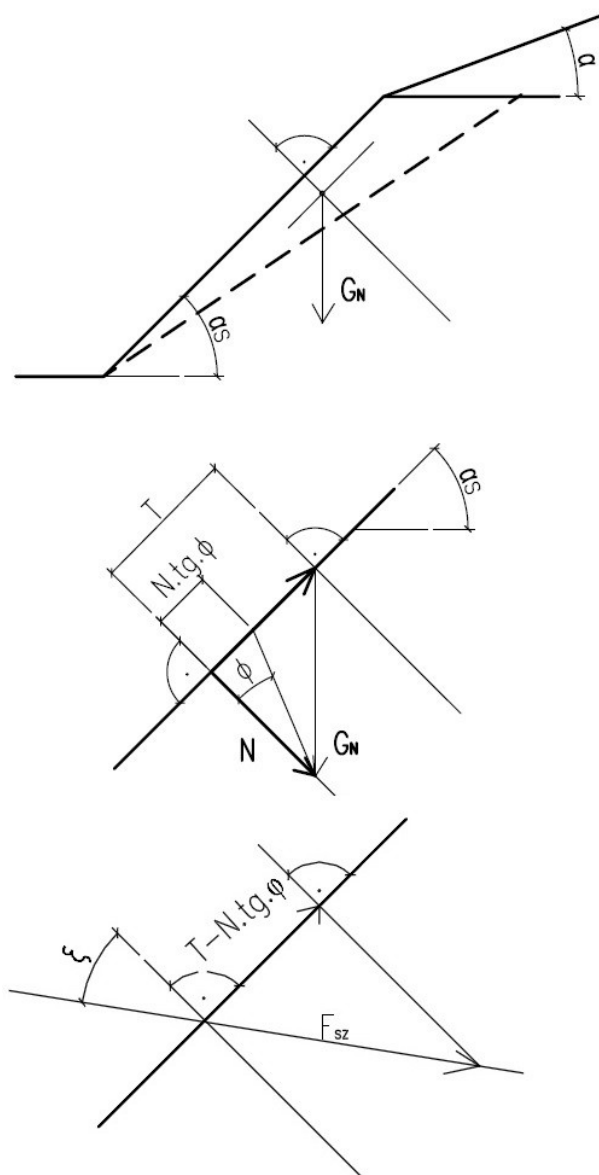
$\varphi_{1,3}$  - úhel vnitřního tření zeminy pro stupeň stability 1,3

$$\varphi_{1,3} = \arctg(S. T. \tan \alpha)$$

$$\varphi_{1,3} = \arctg(1,3 \cdot \tan 15^\circ)$$

$$\underline{\varphi_{1,3} \approx 24^\circ}$$

Výpočet síly potřebné ( $F_{sz}$ ) k zachycení nestabilní části zářezu vychází ze Schématu situace na Obrázku 29. Výpočet se provede pro každou etáž.



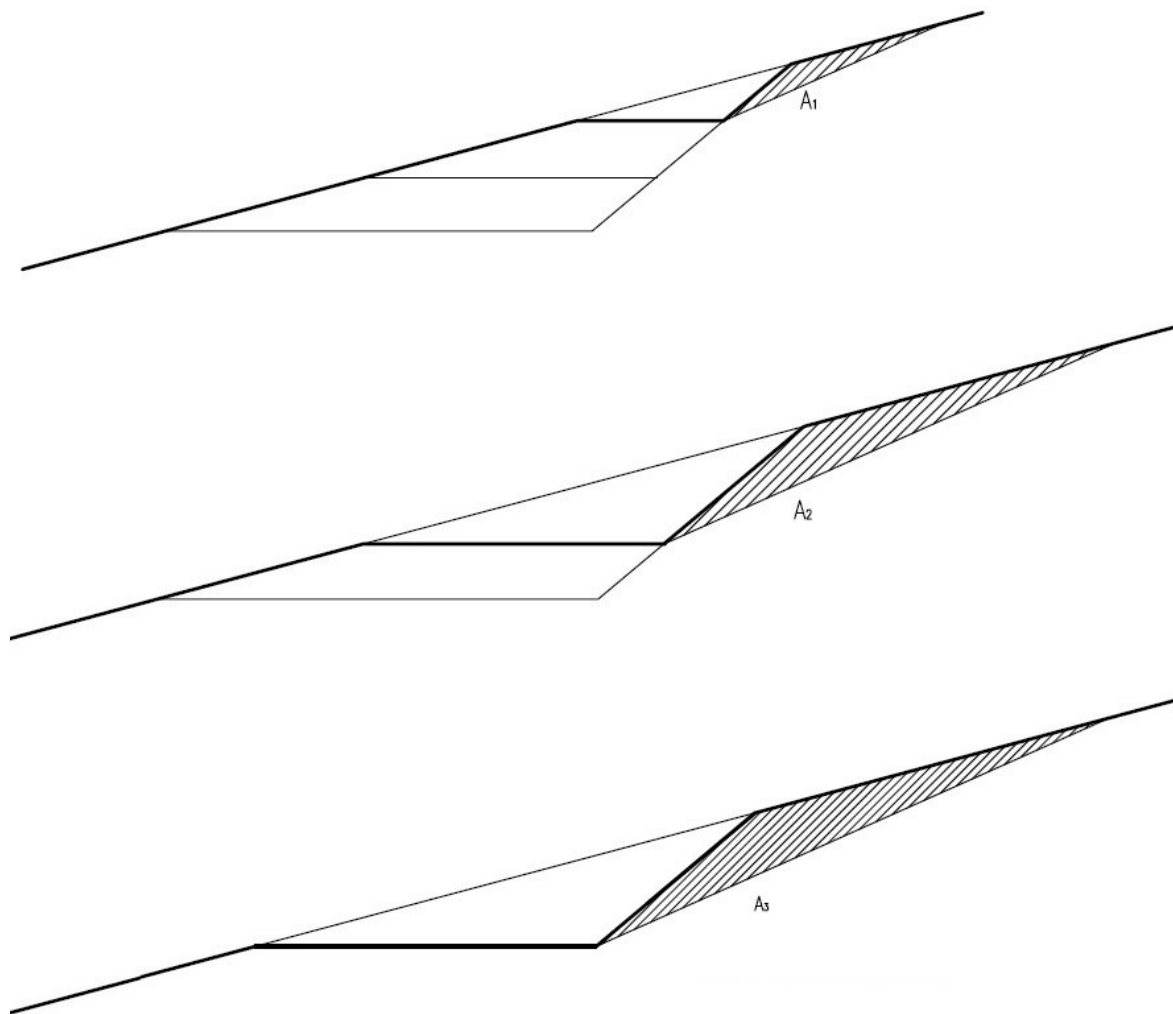
Obr. 29 - Schéma výpočtu síly ( $F_{sz}$ ) k zachycení nestabilní části zářezu.

Výpočet je proveden pro každou etáž dle následujících vztahů. Úklon ploch sítí od normály k ploše svahu  $\xi = 45^\circ$ .

Tíha nestabilní části svahu zářezu ( $G_N$ ).

$$G_N = A \cdot \gamma$$

A - plocha nestabilní části svahu zářezu [ $m^2$ ]



Obr. 30 - Nestabilní plocha svahu zřezu

$$N = G_N \cdot \cos \alpha_s$$

$$T = G_N \cdot \sin \alpha_s$$

$$F_{SZ} = \frac{(T - N \cdot \tan \varphi)}{\sin \xi}$$

1. etáž

$$G_{N1} = A_1 \cdot \gamma$$

$$N = G_N \cdot \cos \alpha_s$$

$$T = G_N \cdot \sin \alpha_s$$

$$F_{SZ1} = \frac{(T_1 - N_1 \cdot \tan \varphi)}{\sin \xi}$$

2. etáž

$$G_{N2} = A_2 \cdot \gamma$$

$$N = G_N \cdot \cos \alpha_s$$

$$T = G_N \cdot \sin \alpha_s$$

$$F_{SZ2} = \frac{[T_2 - (N_1 + N_2) \cdot \tan \varphi]}{\sin \xi}$$

3. etáž

$$G_{N3} = A_3 \cdot \gamma$$

$$N = G_N \cdot \cos \alpha_s$$

$$T = G_N \cdot \sin \alpha_s$$

$$F_{SZ3} = \frac{[T_3 - (N_1 + N_2 + N_3) \cdot \tan \varphi]}{\sin \xi}$$

Výsledky výpočtu sil  $F_{sz}$  uvádí Tabulka č. 2

Etáž	A [m <sup>2</sup> ]	G <sub>N</sub> [kN]	N [kN]	T [kN]	N.tgφ [kN]	F <sub>sz</sub> [kN]
1	2,42	48,4	37,08	31,11	16,51	20,65
2	9,27	185,4	142,02	119,17	63,23	55,76
3	19,91	398,2	305,04	255,96	135,81	57,15

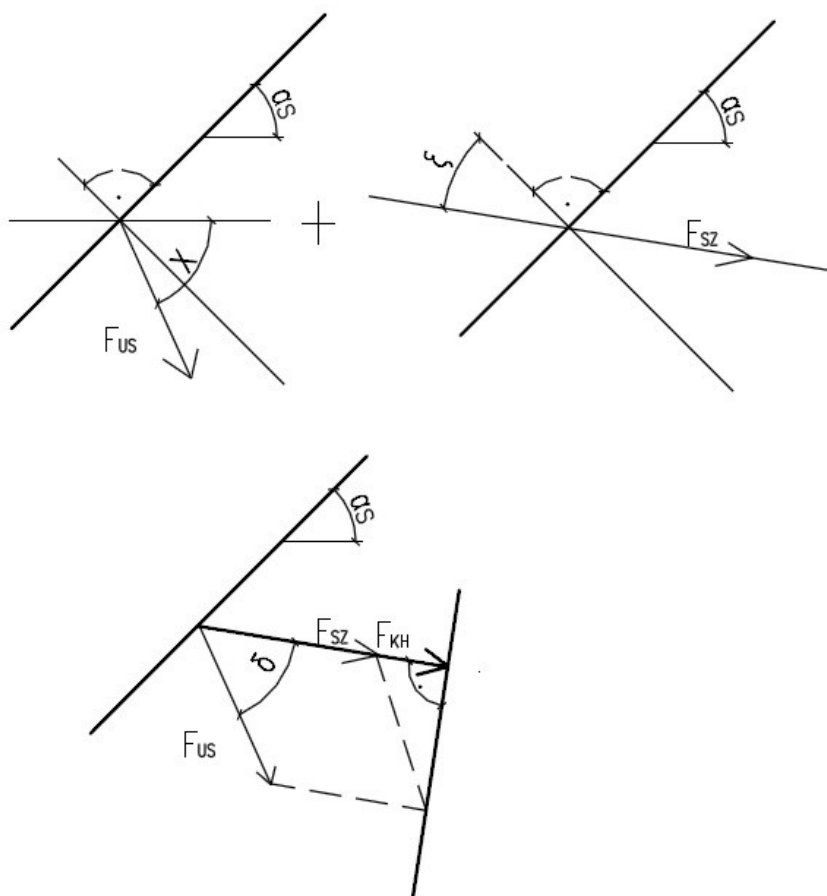
Tab. 2 - Výsledky sil stabilizující zářez  $F_{sz}$

### 6.3.4 Výpočet tahové únosnosti hřebíku sítě

Základním návrhovým parametrem je tahová únosnost křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ). Z ní se následně vypočte hodnota tahové únosnosti jednoho hřebíku ( $F_h$ ), která závisí na velikosti úhlu křížení dvou hřebíků ( $\omega$ ), (viz Kapitola 4.2).

Tahová únosnost křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ) je dána kolmým průmětem součtu sil uvolněných při odlehčení svahu zářezu výkopu svahu ( $F_{us}$ , viz Kapitola 6.3.2) a sil, které stabilizují nestabilní část svahu zářezu ( $F_{sz}$ , viz Kapitola 6.3.3) do směru osy hřebíku.

Výpočet tahové únosnosti křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ) je proveden podle Schématu na Obr. 31.



Obr. 31 - Schéma výpočtu tahové únosnosti křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ )

Výpočet tahová únosnosti křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ) je proveden dle následujících vztahů.

Úhel  $\delta$ , který svírají mezi sebou  $F_{sz}$  a  $F_{us}$ .

$$\delta = X + \xi + \alpha_s - 90^\circ$$

Síla tahové únosnosti křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ).

$$F_{kh} = F_{sz} + F_{us} \cdot \cos \delta$$

Síla tahové únosnosti jednoho hřebíku ( $F_h$ ).

$$F_{\psi=0} = F_{kh}$$

$$F_h = F_{h\omega} = \frac{F_{kh}}{F_{\psi=0,1kN}}$$

pro  $\omega = 60^\circ \rightarrow F_{\psi=0,1kN} = 1,7 \text{ kN}$  (viz Graf na Obr. 16)

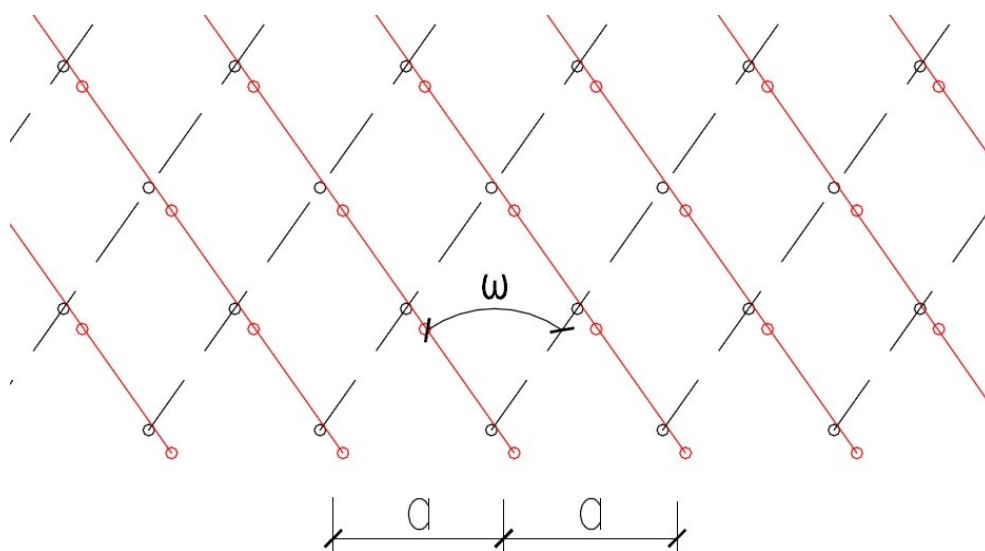
Výsledky výpočtu sil  $F_{kh}$ ,  $F_h$  ( $F_{h,\omega=60^\circ}$ ) uvádí Tabulka č. 3.

Etáž	$F_{us}$ [kN]	$F_{sz}$ [kN]	$\delta$ [°]	$F_{kh}$ [kN]	$F_{h\omega=60^\circ}$ [kN]
1	25,93	20,65	49,13	37,62	22,13
2	77,27	55,76	48,87	106,59	62,7
3	119,22	57,15	48,87	135,57	79,75

Tab. 3 - Výsledky výpočtu sil v křížení hřebíků  $F_{kh}$

### 6.3.5 Výpočet délky hřebíku.

Výpočet délky hřebíku  $l_h$  je založen na geometrickém požadavku vytvoření síťové soustavy, tzn. splnění požadavku, že každý hřebík musí mít minimálně tři křížení s dalšími hřebíky, viz Schéma na Obr. 32.



Obr. 32 - Schéma síťové soustavy

Volené parametry síťové soustavy jsou: typ ústí hřebíků v ploše svahu (dvojitý); směrové uspořádání síťových soustav (horizontální); úhel křížení hřebíků  $\omega$  ( $\omega=60^\circ$ ); rozteč ústí hřebíků -  $a$  ( $a = 1\text{ m}$ ); počet křížení  $n_{kh}$  ( $n_{kh} = 4$ ); délka přesahu – zakotvení hřebíku v prostředí za posledním křížením  $l_{phk}$  ( $l_{phk}=1/2$  délky rozteče dvou sousedních křížení). Pro výše uvedené okolnosti délka hřebíku  $l_h$  je dána výrazem:

Výraz pro výpočet délky svorníku  $l_h$ .

$$l_h = (n_{kh} - 0,5) \cdot \frac{a}{2 \cdot \sin \frac{\omega}{2}}$$

$$l_h = (4 - 0,5) \cdot \frac{1}{2 \cdot \sin \frac{60}{2}}$$

$$\underline{l_h = 3,5 \text{ m}}$$



## **7 Závěr**

Standardní vyztužovací konstrukcí aplikovanou v zeminách jsou geomříže a geotextílie ze syntetických materiálů. Tyto jsou umísťovány do konstrukcí zemních násypů.

Do konstrukcí, kde nelze aplikovat geomříže nebo krátká vlákna, se používají zeminové hřebíky. Nejčastější uspořádání je kolmo ke směru svahu a úroveň součinnosti sousedních hřebíků je nízká nebo zcela chybí. Hřebíky nejsou staticky navzájem provázány tak, jako je tomu u geomříží.

Efektivita síťové struktury spočívá v dokonalejším využití statické činnosti hřebíků, tj. ve zvýšení hustoty a v sofistikovanější sestavě rozmístění instalovaných výztužných prvků, které jsou uspořádány do dvou paralelních soustav, lišících se směrem orientace hřebíků. Výhodou síťových soustav oproti klasickým horizontálním geomřížím je fakt, že nejsou omezovány geometrickými okolnostmi a mohou být v prostoru libovolně uspořádány.

Práce podala silovou analýzu činnosti síťových soustav a uplatnila ji na příkladu vyztužení svahu zářezu v zeminách.

Praktické vytvoření vyztužující síťové soustavy předpokládá inovaci v konstrukci hřebíků, která v obecných rysech napodobuje kořenovou síť vegetačního pokryvu povrchu planety Země.

## **8 Seznam obrázků**

Obr. 1 - Pokládání geomříží .....	2
Obr. 2 - Instalace tuhých ocelových hřebíků.....	2
Obr. 3 - Vlákna a vyztužení zeminy krátkými vlákny. ....	3
Obr. 4 - Kořenová síť stromu .....	3
Obr. 5 - Flexibilní zemní hřebík s nezávislými prameny .....	4
Obr. 6 - Vytvoření síťové soustavy .....	4
Obr. 7 - Zasíťování povrchové plochy svahu zářezu dvoupramenným flexibilním zemním hřebíkem.....	5
Obr. 8 - Provádění vertikálního drénu.....	5
Obr. 9 - Úklon síťové soustavy .....	7
Obr. 10 - Vyústění hřebíků.....	8
Obr. 11 - Poloha dvou sousedních síťových soustav .....	8
Obr. 12 - Zasíťování povrchu volné plochy .....	9
Obr. 13 - Přímý přenos zachycení tahových sil.....	10
Obr. 14 - Nepřímý přenos zachycení tahových sil .....	11
Obr. 15 - Statická činnost dvou hřebíků.....	12
Obr. 16 - Graf výsledků parametrických výpočtů směrové tahové únosnosti .....	13
Obr. 17 - Schéma vyztužování zemin s předstihem .....	15
Obr. 18 - Schéma uvolnění napětí při provádění hloubení .....	16
Obr. 19 - Schéma následného vyztužování zemin .....	17
Obr. 20 - Sesuvu zářezu v zemině.....	19
Obr. 21 - Zachycení sil od odlehčení a zemního tlaku.....	20
Obr. 22 - Rozteče řad a ústí.....	21
Obr. 23 - Úklon ploch sítí od normály k ploše svahu .....	22
Obr. 24 - Schéma geometrie zářezu .....	23

Obr. 25 - Schéma zářezu .....	23
Obr. 26 - Schéma postupu výpočtu výslednic uvolňovaných sil ( $F_{us}$ ) .....	25
Obr. 27 - Velikost a směr hodnot uvolňovaných sil podél svahu zářezu .....	27
Obr. 28 - Schéma situace nestabilní části svahu zářezu .....	28
Obr. 29 - Schéma výpočtu síly ( $F_{sz}$ ) k zachycení nestabilní části zářezu .....	29
Obr. 30 - Nestabilní plocha svahu zářezu .....	30
Obr. 31 - Schéma výpočtu tahové únosnosti křížení dvou hřebíků ( $F_{kh}$ ) .....	32
Obr. 32 - Schéma síťové soustavy .....	34

## 9 Seznam tabulek

Tab. 1 - Výsledky uvolněných sil $F_{us}$ .....	26
Tab. 2 - Výsledky sil stabilizující zářez $F_{sz}$ .....	31
Tab. 3 - Výsledky výpočtu sil v křížení hřebíků $F_{kh}$ .....	33

## **10 Seznam použité literatury**

- [1] ČSN EN 14490 *Provádění speciálních geotechnických prací - Hřebíkování zemin*, Praha 2010
- [2] [http://www.pjpk.cz/TKP\\_30.pdf](http://www.pjpk.cz/TKP_30.pdf)
- [3] <http://www.pjpk.cz/TP%2097.pdf>
- [4] <http://www.konstrukce.cz/clanek/nova-evropska-norma-v-geotechnicke-praxi-csn-en-15-237-73-1081-provadeni-specialnich-geotechnickyh-praci-svisle-dreny/>
- [5] HULLA, J.; TURČEK, P.: *Zakladanie stavieb*. Bratislava: Jaga group, 1998
- [6] SAWICKI, A.: *Mechanics of Reinforced Soil*, Rotterdam: A.A:Balkema, 2000
- [7] BAKKER, J., K.: *Soil Retaining Structures*, Rotterdam: A.A:Balkema, 2000