Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geotechnologie

Barbora Dašková

Sanace mělkých sesuvů pomocí vegetace - metoda "live pole"

Remedy of shallow slope slides by vegetation - using "live poles"

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Boháč, CSc

Praha, 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 6. 5. 2015

…….

Podpis

Abstrakt

Nestabilita svahu (sesuvy) způsobuje riziko nejen pro stavby, ale i pro lidské životy. Tato práce popisuje jednu z možných bioinženýrských technik, jak nestabilitě svahu zabránit technikou řešení stability svahu „Live Pole.'' Je to účinná, ekologická a ekonomicky nenáročná metoda. Základem je výběr správné rostliny (dřeviny) pro zvolené místo, které chceme stabilizovat. Rostlinné řízky mají několik pozitivních vlivů na zeminu. I s malým množstvím kořenů se zvyšuje smyková pevnost, zvyšuje se dilatance, zvyšuje se tahový účinek kořene a snižuje se množství vody v zemině. Práce dále podrobně popisuje konkrétní použití metody „Live Pole'' pro mírný pás a tropický pás (konkrétně pro Malajsii).

Klíčová slova: Live Pole, stabilita svahu, vegetace

Abstract

Slope instabilities (landslides) means hazard not only for structures, but also for human lives. This work describes one of the possible bioengineering methods which could prevent slope instability. The technique is called “Live Pole”. It is an effectively, ecologically and economically undemanding method. However essential is the right choice of the plant species for the given site. Live Poles have a very positive influence on soil. Even with a small amount of roots the soil stability improves due to shear strength and dilatation increase anddue to root tensile effect. Also the amount of water in the soil decreases. The thesis also describes the use of “Live Pole” for the temperate zone and tropics (concretely for Malaysia).

Keywords: Live Pole, slope stability, vegetation

Poděkování

Na prvním místě moc děkuji svým rodičům za plnou psychickou a materiální podporu během celého studia.

Dále mé velké díky patří především panu Ing. Janu Boháčovi, CSc. za trpělivost a pomoc při tvorbě této práce.

Srdečně děkuji slečně Mgr. Monice Černíkové a paní Mgr. Kristině Podskalské za kontrolu a doplnění práce.

Obsah

Obsah **1**

Úvod **2**

1. Co je „Live Pole'' 3

2. Výsadba Live Pole 6

3. Kořeny a jejich působení na stabilitu svahu 8

4. Vliv kořene na zeminu 15

5. Použití metody Live Pole pro tropické klima 19

I. Výběr rostliny 19

II. Mechanické vlastnosti 20

III. Polní zkoumání 21

IV. Postup instalace 23

V. Monitoring 24

VI. Exhumace 24

VII. Účinky na zeminu 26

VIII. Shrnutí 26

6. Použití metody Live Pole pro mírný pás 27

I. Zkoušky zeminy 27

II. Výsledky výsadby 29

III. Shrnutí 30

7. Závěr 31

Seznam literatury 32

Úvod

Stabilita svahu s využitím vegetace je starověká metoda, která se v Evropě používala po celá desetiletí a můžeme ji nalézt i v dnešní době. Její objev je přičítán starým Římanům či obyvatelům Byzantské říše někdy kolem roku 2000 před naším letopočtem. Historické důkazy o využití vegetace jsou na mnoha místech světa vidět dodnes. Například na Středním východě, v Jižní Americe a dokonce i ve vlhkém a tropickém klimatu jihovýchodní Asie. Metoda Live Pole byla poprvé použita pro stabilizaci svahu v letech 1950 - 1960 v období sezónních srážek na Novém Zélandu (Mafian et. al., 2009). Za první dokumentaci o použití bioinženýrství při zajištění stability svahu je považována práce v USA (Kraebel, 1936).

S problémem stability svahu se často setkáváme při projektování či realizaci dopravních a hydrogeologických staveb, ale i u projektování pozemních staveb. Svahy jsou přírodní nebo umělé (vzniklé zásahem do přírodních poměrů). Důvodem nestability je porušení rovnováhy a následně vznik sesuvu. Ze všech mělkých svahových poruch, které ovlivňují svahy, jsou sesuvy nejrozšířenější a představují velký problém s nákladnou údržbou. V některých oblastech jsou sesuvy výjimečné, jinde dosti časté, takže se podílejí na vytváření zemského povrchu. Přitom ovšem ničí lesy i zemědělskou půdu, poškozují komunikace, vodohospodářské stavby i obytné budovy a mnohdy ohrožují i lidské životy. K zabezpečení svahu proti mělkému sesuvu používáme nejrůznější metody a materiál např.: vegetační tvárnice, kamennou dlažbu, geotextilii, opěrnou zeď, drátokamenné matrace. U dřevěných materiálů je velkou nevýhodou malá životnost a potřebná povýsadbová péče.

Obrázek 1: Rostlinný řízek po zakořenění ve svahu (Mafian et. al., 2009).

1. Co je „Live Pole”

Jedním ze způsobů zpevnění svahu, vhodným pro mělké sesuvy, je technika „Live Pole“. Tato bioinženýrská technika nabízí účinnou, ekonomicky nenáročnou a ekologickou možnost boje proti mělkým sesuvům. Zpomaluje povrchový průtok, je ochranným médiem břehů a kontroluje svahovou erozi (Duncan and Wright, 2005). Live Pole jsou rostlinné řízky (či proutky), které se uříznou z vhodného keře nebo stromu. Rostliny po ujmutí upravují nasycení zeminy, přispívají ke zvýšení smykové pevnosti podél smykové plochy, zvyšují bezpečnostní faktor a jejich hlavním cílem je stabilizace mělkých svahových sesuvů pomocí jejich kořenových systémů (Morgan and Rickson, 2003). Bohužel jedná se o rostliny, a tak je životaschopnost pro dané území pouze dočasná.

Stejně jako ostatní metody i tato má speciální postup přípravy a instalace. Ačkoli princip metody je dobře znám, podrobná dokumentace použití v terénu je vzácná. Řízky jsou nejčastěji vrbové proutky, které se uříznou na jaře před rašením lístků a zastřihnou se do požadovaných rozměrů. Výsadba musí proběhnout co nejrychleji po sklizni proutků v dostatečně zavlažené oblasti. Pokud dojde k uříznutí a výsadbě v jinou roční dobu, může dojít až k 50% úhynu řízků. Pro posouzení úspěšnosti sanace používáme inklinometry, tenzometry, piezometry a zátěžové zkoušky (Goldsmith et. al., 2013).

Ovšem výběr rostliny není tak jednoduchý, jak se na první pohled zdá. Rostlina by měla mít tyto schopnosti (Barker, 1995):

a) množit se z řízků
b) rychle růst
c) zakořenit v hloubce
d) podrůstat
e) růst v podmáčených oblastech
f) odolat vysychání půdy
g) odolat vibracím u komunikace
h) růstu rovných proutků potřebných pro instalaci do země
i) mít účinek na stabilitu svahu

Kromě těchto schopností musí rostlina (dřevina) splnit ještě další speciální požadavky (Ho and Li, 2001):

a) Musí být životaschopný.
b) Mít úměrný růst kořene a stonku.
c) Mít správné mechanické vlastnosti.
d) Potenciál většího rovného vzrůstu (až do 2m).

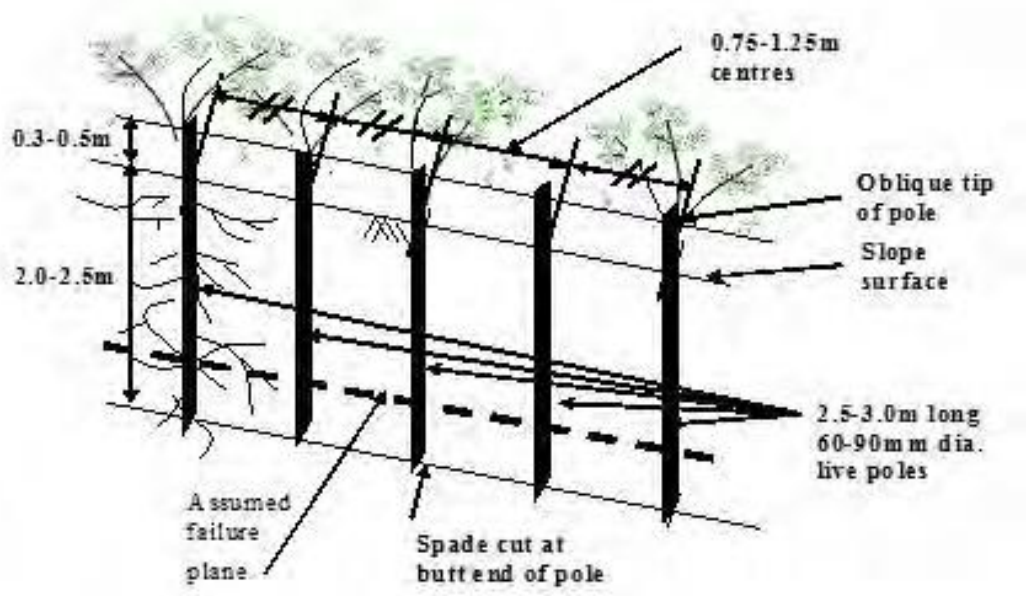
Význam vegetace při stabilizování plošných sesuvů bývá často podceňován. Ale musíme si uvědomit, že travní pokrývka brání vysušení povrchu, vzniku smršťovacích trhlin a odjímá vlhkost půdy (Záruba a Mencl, 1987).

Hlavním, nejvhodnějším a také nejčastěji využívaným biotechnickým opevněním jsou keřové vrby. Tyto dřeviny je možné užít ve formě řízků, prutů, podestýlek, rohoží, pokryvů, zápletů do mnoha typů stabilizačních konstrukcí. Jsou vodohospodáři považovány za velice vitální, téměř všude využitelné dřeviny s minimálními nároky. Pro řádný návrh je však především nutný vhodný výběr a důsledná povýsadbová péče (Šlezingr, 2004). Vrbové porosty nejsou vždy tak univerzální, jak potřebujeme. Při výběru druhu musíme dbát na základní charakteristiky dřevin. V dalších odstavcích si vyjmenujeme některé důležité a v praxi méně známé vlastnosti porostů keřových vrb.

Za velice vitální, přizpůsobivou dřevinu je považována vrba poříční (Salix fluviatilis L.) U tohoto druhu musíme počítat s velice rychlým invazivním růstem kořenových výmladků do okolí. Dřevina se proto může stát velice těžce odstranitelnou a nehodí se do blízkosti staveb. Naopak její schopnost prorůstání a to, že netvoří keře (jen metlový porost kolmo rostoucích prýtů), ji činí velice vhodnou na zpevnění břehů. Podle odborné literatury se u této rostliny uvádí, že vlivem jejího silného zakořenění zde není možné zaseknout ani krumpáč. Často používaná a známá je vrba košíkářská (Salix viminális L.). U tohoto druhu musíme dbát na pravidelné zastřihávání prýtů, které mohou ročně dorůstat až o 3m, je tedy nutná její častá a náročná úprava. Vzhledem k této skutečnosti, vysoké kořenové výmladnosti a rychlému růstu není vhodná pro stabilizaci břehů. Pro opevnění břehů se hodí vrba vnitrozemská (Salix interior L.), která snese i mírné zastínění. Velice dobře prorůstá kořenovými výmladky a tím stabilizuje svoje okolí.

Všechny vrby (Salix), ať keřové či stromové, jsou silně světlomilné dřeviny, proto se hodí do okolí cest, nádrží, jezer či na břeh řek. Nikoliv však proto, že k životu potřebují blízkost vody. Tato vlastnost je někdy nevhodná pro stabilizaci oblasti, která je zastíněná. Dalším omylem je také domněnka, že vrby snesou bezeškodné dlouhodobé zatopení. Ačkoli jsou oproti jiným dřevinám odolnější, maximální doba se pohybuje do 10-ti týdnů. Některé druhy, například vrba špičatolistá (Salix acutifolia L.) či vrba pětimužná (Salix pentadra L.), mají raději sucho než zamokřené území (Šlezingr, 2004).

Na obrázku 2 je zobrazena technika „Live Pole'' v praxi. Dřevina (v tomto případě keřová vrba) je zasazena do hloubky 1,5 – 2,0m. Dřevěné stonky zpočátku působí jako krátké piloty na zvýšení stability svahu. Po určité době začnou v absorpční zóně růst kořenové vlásky, které upevňují půdu kolem sebe, rozšiřují absorpční oblast kořene a tím snižují množství vody v zemině (Gray and Sotir, 1996). Tato konkrétní metoda se označuje jako „*live pole array stabilization.*"



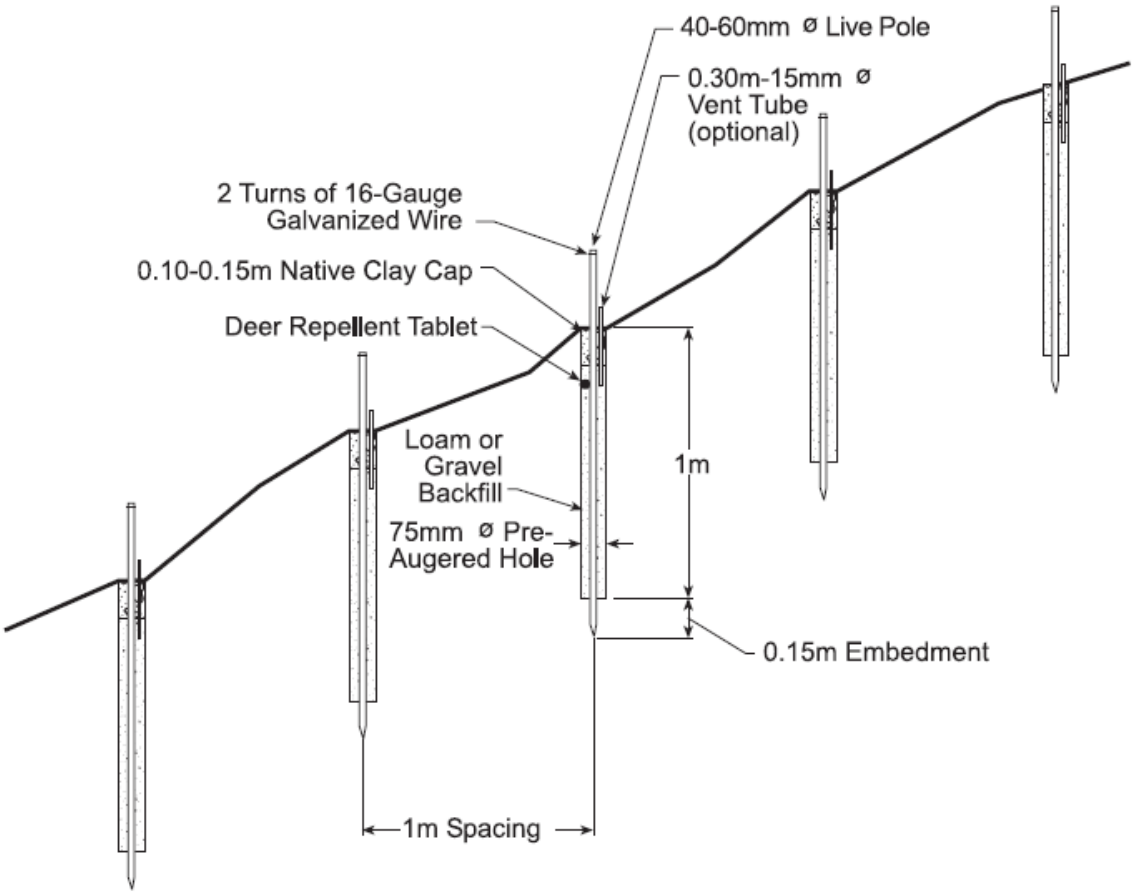
Obrázek 2: Podélný řez kořene rostlinných řízků (Mafian et. al., 2009).

2. Výsadba Live Pole

Nejprve musíme najít vhodnou vitální a nepoškozenou rostlinu či dřevinu. Vybereme větvičky, které jsou dlouhé, rovné, hladké, na konci se zužující a bez bifurkace (tedy bez vyrostlých lístků na konci větví). Uříznutí i výsadba je nejlepší na jaře, kdy má rostlina nevyšší možnost zakořenění. Po uříznutí řízků (délka a šířka záleží na hloubce otvorů při výsadbě) se musí rostlina v co nejkratší době zasadit do připravených otvorů. Pro ujmutí rostlin platí, že čím dříve od uříznutí je rostlina zasazena, tím větší šanci má na zakořenění. Otvor vytvoříme pomocí přístroje se spirálovou hlavicí (obrázek 3).

Obrázek 3: Vrtání otvoru pro výsadbu řízků (Mafian et. al., 2009).

Dále vezmeme několik řízků a horní konec obmotáme tkaninou a drátem, aby se nám svazek nerozpojil, a dolní konec seřízneme do špičky. Takto vyrobený svazek se umístí do otvoru šikmou stranou dolů zhruba do 1,5 – 1 m velikosti svazku. Poté se otvor zasype. Je několik možností čím otvor vyplnit, buď použijeme písek či původní zeminu s bentonitem (aby se zabránilo vysychání a přesycení rostliny vodou) zhruba do ¾ délky a zbytek zasypeme původní zeminou. Pokud se na daných řízcích budou provádět zkoušky, každý svazek se označí pomocí štítku s identifikačním číslem a datem instalace (obrázek 4).



Obrázek 4: Příčný řez svahu s vysázenými řízky a popisem (Wu et. al., 2014).

3. Kořeny a jejich působení na stabilitu svahu

Pro studium svahových pohybů je důležité rozpoznat podmínky, které náchylnost území k sesouvání způsobují, a faktory, které tento pohyb vyvolaly. Přesné určení náchylnosti území k sesuvům nám ukáže podrobná analýza oblasti. Existuje mnoho skutečností, které k tomuto jevu přispívají. Například geologické poměry, vlastnosti hornin, hydrogeologické poměry a morfologická stavba území. Mezi faktory sesuvů patří například změna sklonu svahu, zvětšení výšky svahu, přitížení násypy, otřesy a vibrace, změna obsahu vody, působení podzemní vody, činnost mrazu či změny ve vegetačním pokryvu (Záruba a Mencl, 1987).

Sesuvy jsou podle definice: „*náhlé pohyby hornin, při nichž jsou sesouvající se hmoty odděleny od pevného podloží zřetelnou smykovou plochou* " (Záruba a Mencl, 1987). Právě kořeny stromů umožňují větší stabilitu svahu tím, že jejich dlouhé kořeny dokáží prorůstat přes smykovou plochu. Všeobecně se uvádí, že lesní porost má dvě funkce, a to vysoušení povrchových vrstev a mechanické upevnění pomocí hlubokých kořenů (Záruba a Mencl, 1987). Z tohoto úhlu pohledu jsou nejvhodnějším druhem stromy bohaté na spotřebu vody a výpar. To jsou například olše, topoly, jasany a břízy. Za nevhodné dřeviny jsou považovány jehličnany a zvláště smrkové monokultury, které mají mělké kořeny, rychlý růst a tím zvyšují zatížení svahu a náchylnost k sesuvu.

Je doporučeno nejprve osít svah vhodnými druhy travin a bylin se živými ploty a záplety a pak vysazovat ty dřeviny, které jsou vhodné jako porost pro stabilizaci. Z výzkumu vyplývá, že hlavním typem přírodního lesa na našich sesuvných územích je doubrava s habry a příměsí lužních stromů. Pro střední polohy se doporučuje vysazovat dub s habry, jasany, olší, vrbami, topoly a osikami. Ve vyšších polohách pak klen, jeřáb, břízy, olše a borovice (Kupilík, 2011). Ze zkušenosti se osvědčilo na sesuvných místech udržovat trvale smíšený les a porost obnovovat postupně.

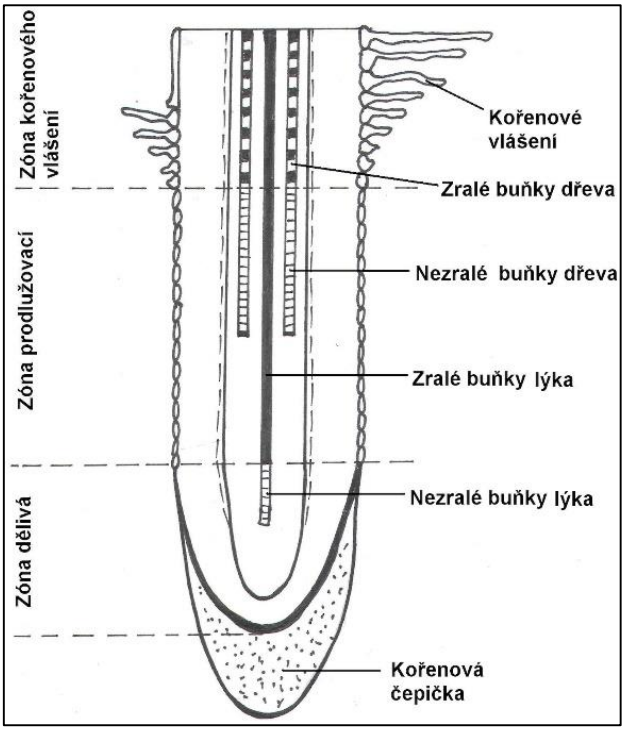
Kořeny jsou hluboké či mělké, ale také široké či úzké, vše záleží na druhu rostliny (dřeviny). Máme dva hlavní typy kořenového systému: allorhizie a homorhizie (obrázek 5). Aloorhizie je kořenový systém, který je tvořený hlavním kořenem a postranními kořeny. Tento kořen je typický pro dvouděložné rostliny a většinu nahosemenných rostlin. Homorhizie je naopak kořenový systém, kde hlavní kořen není a jeho funkci přebírají

postranní kořeny, které jsou stejně tlusté. Tento kořenový systém můžeme nalézt u jednoděložných rostlin.

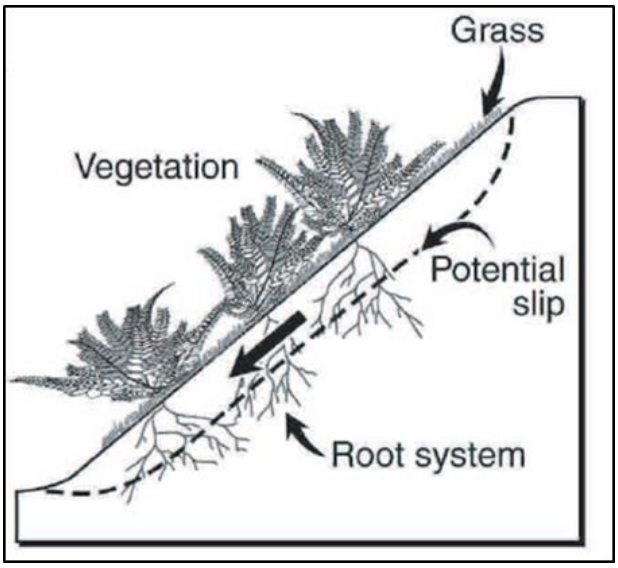
Obrázek 5: Kořenový systém allorhizie (vpravo) a homorhizie (vlevo) (http://www.biologie.webz.cz/www/botanika/organologie.html).

Za nejdůležitější oblast je považována dělivá část kořene. To je část na špičce kořene s nejvyšší koncentrací a aktivitou meristému (dělivé pletivo). Dochází k rychlému dělení buněk, což má za důsledek neustálé prodlužování celého kořene, který je geotropní (Benešová, 2003). Spodní okraj dělivé zóny kryje kořenová čepička poskytující mechanickou ochranu kořene před poškozením a usnadňující pronikání kořene do půdy (obrázek 6). Na druhé straně musíme brát v potaz také negativní vliv kořenů na stabilitu stavby, kde mohou způsobit poruchy a škody.

I když bylo v posledních letech vydáno několik článků o kořenových systémech a mechanickém chování kořenů v půdě, existuje jen málo údajů o tom, jak prostorové uspořádání kořenů přispívá ke zpevnění půdy (Danjon et. al., 2008). Pro stabilitu svahu jsou lepší tenké a dlouhé kořeny, které spíše působí jako tahové prvky v půdě, a kořeny s větším průměrem, které působí jako kotvy či spojovací materiál sousedních podložních vrstev (obrázek 7).



Obrázek 6: Stavba kořene – podélný řez
(http://www.biologie.webz.cz/www/botanika/organologie.html).

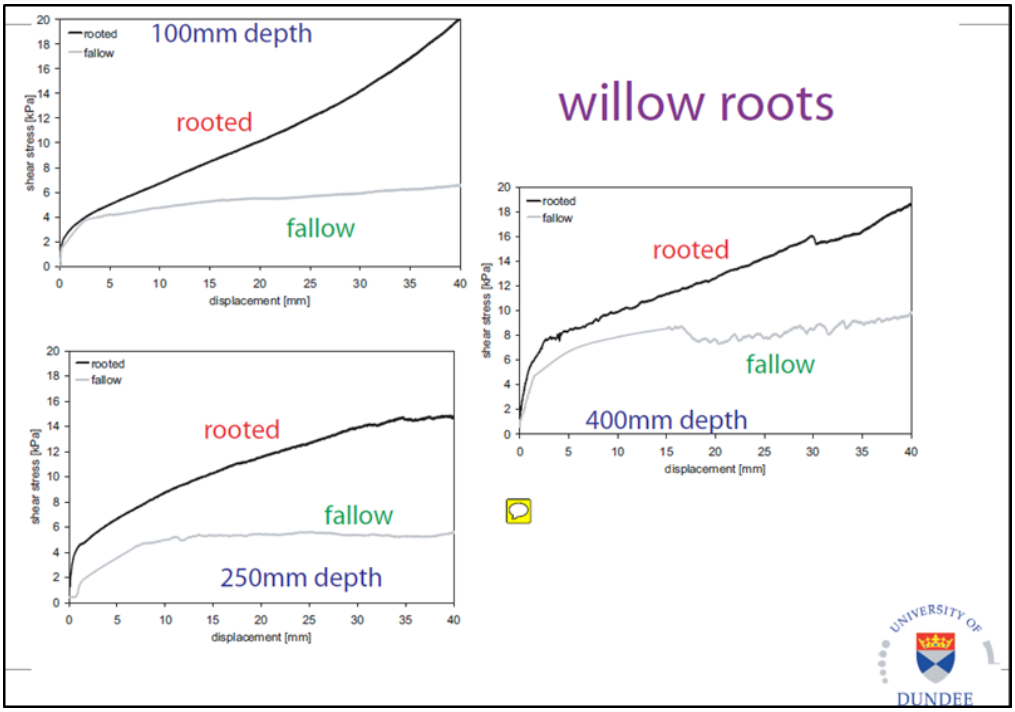


Obrázek 7: Znázornění prorůstání kořene smykovou plochou (Khalilnejad and Osman, 2012).

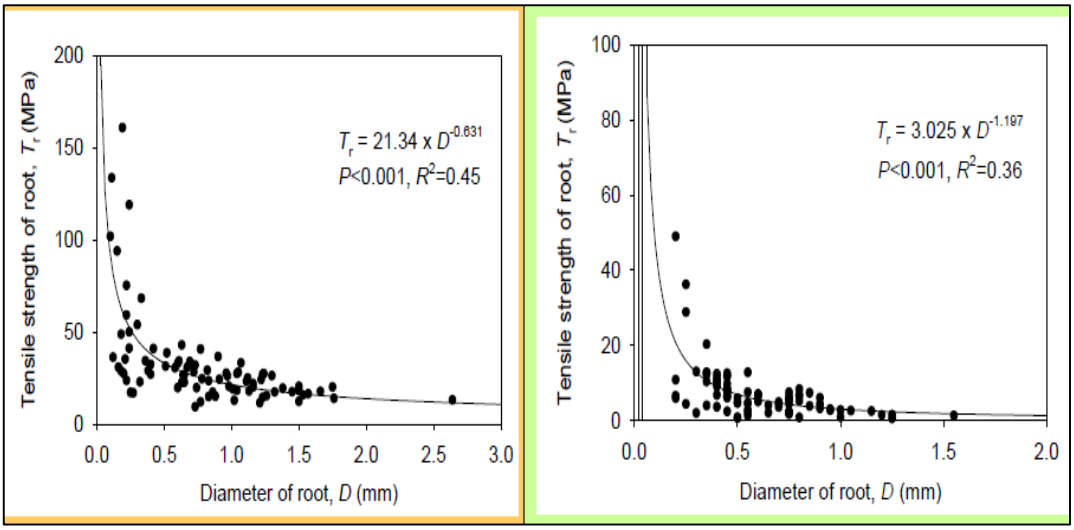
Pro zpevnění zeminy musí kořen mít:

a) dostatečnou pevnost v tahu
b) dostatečnou plochu kořenového průřezu
c) správný úhel, pod kterým doroste kořen k podložní vrstvě
d) přiměřenou délku hlavního a postranních kořenů
e) vhodnou celkovou délku kořene

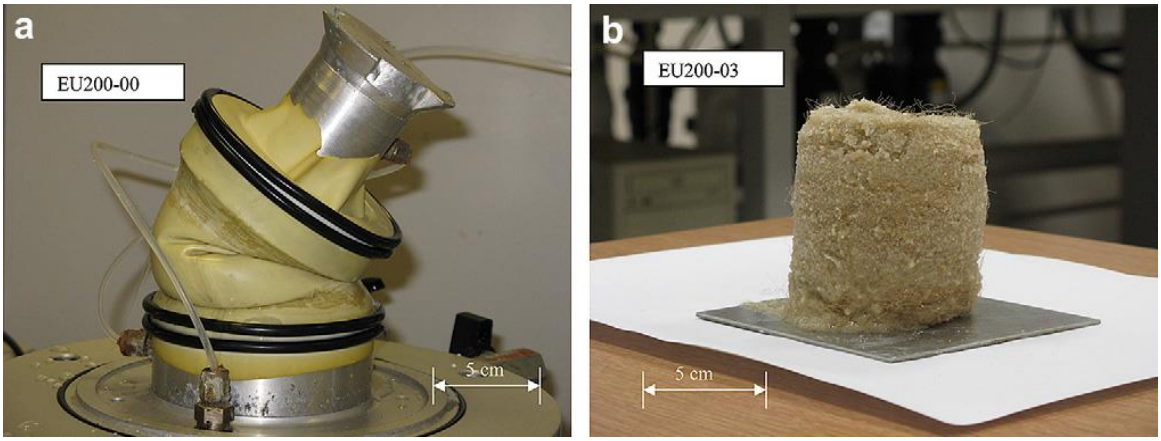
Pevnost v tahu se zvyšuje se snižujícím se kořenovým průřezem (obrázek 8, 9). Podle tohoto tvrzení by velké množství tenkých kořenů mělo zlepšit stabilitu svahu, což dokazují i zkoušky se zeminou s umělými vlákny (Heineck et. al., 2005) a triaxiální zkouška se zeminou s vláknitými kořeny (obrázek 10, Ibraim et. al., 2010).



Obrázek 8: Laboratorní zkoušky vrbového kořenu různých průměrů.
Grafy znázorňují závislost smykového napětí na posunu. Z těchto zkoušek je nejvhodnější kořen do průměru 100 mm, který několikanásobně zvyšuje smykovou pevnost (rooted – zakořeněná rostlina ve svahu , fallow – svah bez vegetace, Wood, 2011).



Obrázek 9: Laboratorní zkoušky kořenů různých průměrů.
Grafy udávají závislost pevnosti tahu kořene na průměru kořene. Největší pevnost v tahu mají kořeny s menšími průměry (woody – dřevnatý kořen, vrba, fibrous – vláknitý kořen, ječmen, Wood, 2011)



Obrázek 10: Triaxiální zkouška zeminy (a - samotná zemina, b – zemina s vláknitými kořeny, Ibraim et. al., 2010).

Maximální kořenový příspěvek k pevnosti zeminy se vyjádřuje pomocí RAR – Root Area Ratio. Je to poměr mezi kořenovou oblastí a zakořeněnou půdní oblastí. Za použití modelu mezní rovnováhy můžeme příspěvek kořene na smykovou pevnost zapsat (1, 2) Wu (2014):

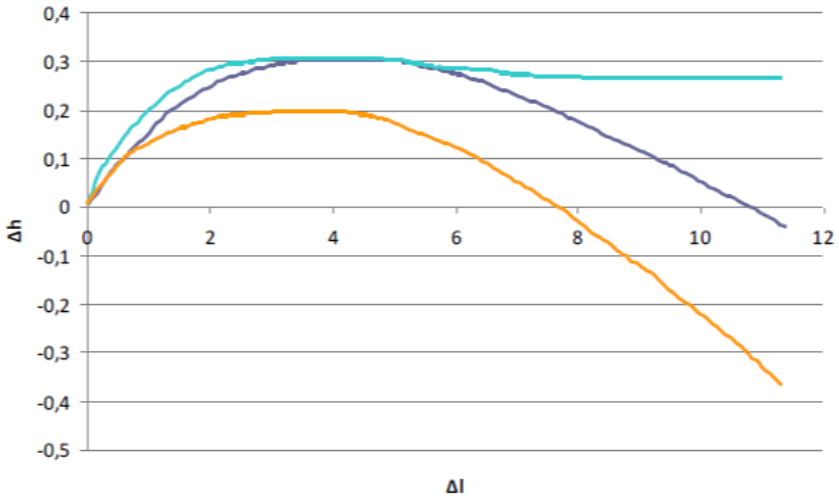
$$\mathrm{Cr} = \mathrm{RAR} \times \mathrm{Tr} \times \mathrm{K} \quad (1)$$

$$\mathrm{K} = \sin\beta + \cos\beta + \tan\varphi \quad (2)$$

kde: Tr je pevnost kořene v tahu, RAR je poměr kořenových oblastí, β je úhel kořene přes smykovou plochu a φ je úhel vnitřního tření a c_r je příspěvek kořene na smykovou pevnost. Model předpokládá, že jsou kořeny pružné, orientované kolmo na smykovou plochu, mobilizované v tahu a efektivní hodnota φ je ovlivněna kořenem.

Takto vypočítaný příspěvek kořene je možné použít při analýze stability svahu. Model vypočítá součinitel bezpečnosti (FOS), což je poměr smykové pevnosti a smykového napětí pro daný svah. Závisí na vstupních parametrech a geometrii svahu, půdě a jejích fyzikálních vlastnostech a dalších parametrech životního prostředí (např. množství zeleně v okolí). Bohužel, model určí jen jednu hodnotu pro celý svah a nezabývá se ovlivněním kořenů rostlin na svah. Chceme-li zjistit, jak změny v kořenovém systému ovlivní mělký svah, musíme změřit geometrii kořenů a potom vypočítat RAR a ΔS pro každou vrstvu zvlášť.

Ke zvýšení smykového odporu přispívá také dilatance (zvýšení objemu zeminy při smykovém namáhání zeminy). Na grafu 1 je znázorněna laboratorní zkouška zeminy s obsahem vláken. U všech zemin dojde nejdříve ze zvýšení hodnot až k dosažení vrcholové pevnosti a poté klesají až k reziduální pevnosti (Kaftanová, 2014).



Graf 1: Dilatance zeminy se zastoupením vláken (Kaftanová, 2014).

4. Vliv kořene na zeminu

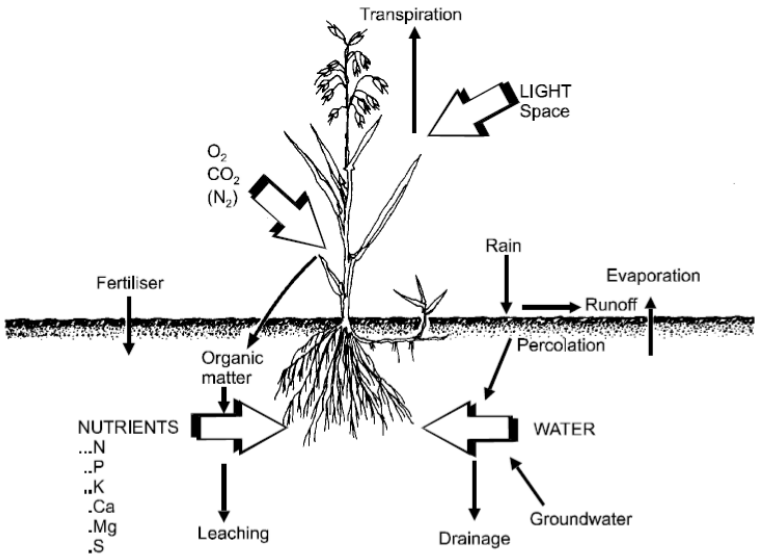
Kořenová a půdní interakce zahrnuje smykové síly armovací funkce kořenů v zemině pomocí rovnice mezní rovnováhy (Khalilnejada and Osman, 2011). Obálka pevnosti je nelineární funkcí smykových parametrů φ a c použitých pro zjednodušení výpočtu a tím nepříliš dobře popisujících kompozitní materiál kořene a zeminy.

Vegetace (kořeny a oddenky) v interakci s půdou vytváří kompozitní materiál. Kořenový systém vykazuje relativně vysokou tahovou pevnost a zvyšující se smykovou pevností (Faisad et. al., 2006). Kořenový systém zajišťuje lepší interakci mezi částicemi zeminy. K vyztužení zeminy nejvíce přispívají jemné kořeny (1 – 20 mm v průměru), jako jsou například trávy a malé keře, které mohou mít významný armovací vliv do hloubky 0,75 - 1,5 metrů. Naproti tomu hluboké kořeny stromů mají vyztužovací účinky do hloubky 3 a více metrů. Pevnost ve smyku ovlivňuje nejen délka kořene, ale také hustota kořenového systému, který v závislosti na průměru kořene s hloubkou klesá (Faisad et. al., 2006).

Nejvyšší účinek vegetace je v blízkosti povrchu, kde je hustota kořenového systému obecně nejvyšší. I nízká hustota kořenového systému se výrazně podílí na zvýšení smykové pevnosti zeminy. Tahový účinek kořenového systému je nejnižší v blízkosti povrchu terénu, z důvodu možného vytrhnutí kořene a následné ztráty vazby mezi kořenem a půdou. Nejvýznamnější tahový účinek mají stromy, jejichž kořeny, sahající hluboko do zeminy, se obtočí kolem kamenů a jiných kořenů a poskytují dobré ukotvení. Ke ztrátě tahového účinku stromů může dojít především v důsledku přetržení kořene.

Na povrchu je jednou z nejlepších ochran hustý travnatý pokryv, který chrání před povrchovými srážkami a větrnou erozí. Ochrana hustým travním pokryvem má významnou roli také při poklesu půdní vlhkosti během procesu evapotranspirace (obrázek 11).

Evapotranspirace, tedy výpar a spotřeba vody rostlinami, má velký vliv na hladinu podzemní vody, a to především v zóně dosahu kořenů (Vydrová, 2007).



Obrázek 11: Znázornění evapotranspirace a příjmu živin rostlinou (Coppin and Richards, 1990).

Fredlund and Morgenstern (1977) popisují účinek změny napětí kompozitního systému, odděleného od vlivu změny pórového tlaku následující rovnicí (3):

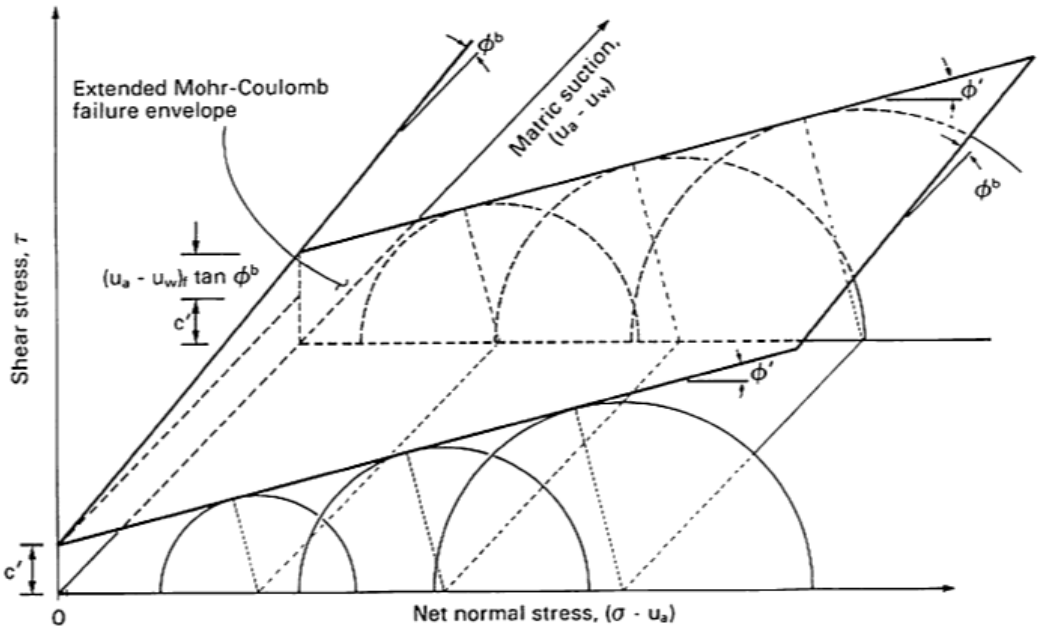
$$\tau = c' + (\sigma - u_a)tg\varphi' + (u_a - u_w)tg\varphi^b \qquad (3)$$

kde φ^b = úhel růstu pevnosti ve smyku vztahující se k sání zeminy.

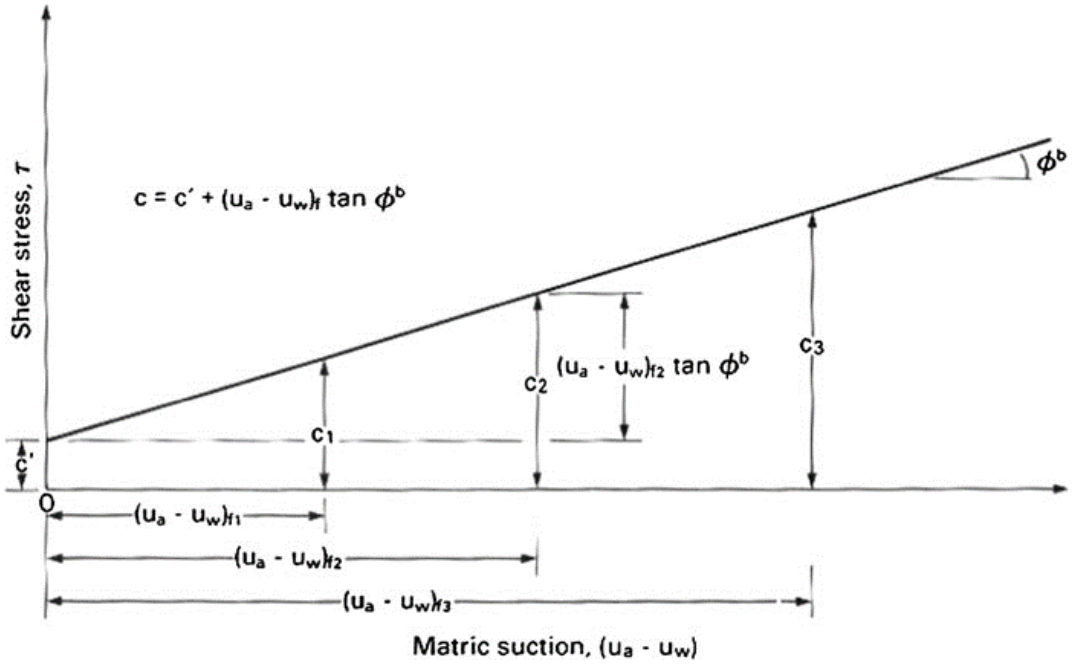
Smykové napětí je znázorněno τ, $(\sigma - u_a)$ a $(u_a - u_w)$ na hlavních osách na grafu 2. Fredlund and Morgenstern (1977) dále ukazují přímý vztah k sání zeminy, znázorněný na grafu 3. Z rovnice (3) vyplývá, že rovnice přímky (4) bude:

$$c = c' + (u_a - u_v)_f tg\ \varphi^b \qquad (4)$$

kde c = soudržnost a $(u_a - u_w)_f$ = sání zeminy na rovině selhání.



Graf 2: Znázornění 3D modelu závislosti smykového napětí na normálovém napětí (Fredlund and Morgenstern, 1977).



Graf 3: Znázornění vztahu mezi smykovým napětím a zeminou (Fredlund and Morgenstern, 1977).

Mechanické chování je významně ovlivněné hydrologickými efekty, mezi které patří například zachycení srážek či povrchový odtok. U travnatého pokryvu je v kombinaci drsnosti, infiltrace a nasycení stékající vody z vegetace povrchový odtok mnohem menší než u holé hlíny. Rostoucí sání způsobuje zvýšení pevnosti ve smyku (Faisal et. al., 2006).

Při porušení svahu dojde ke změně totálního normálového i smykového napětí, což má za důsledek změnu geometrie a sklonu svahu. Stabilita svahu se v praxi charakterizuje stupněm stability. Ten se počítá pomocí rovnice (5) pro odvodněnou pevnost a rovnicí (6) pro neodvodněnou pevnost (Wu et. al., 2014).

$$F_s = \frac{c' + c_r + (\gamma_s H - \gamma_w Hw)\cos^2\theta \tan \emptyset'}{\gamma H \sin\theta \cos\theta} \quad (5)$$

$$F_s = \frac{s_u + c_r}{\gamma H \sin\theta \cos\theta} \quad (6)$$

Kde Fs je stupeň stability, c je soudržnost, c_r je příspěvek kořene na smykovou pevnost, H je hloubka, Hw je hloubka podzemní vody, θ je náklon svahu, γ_s je hmotnost nasycené zeminy, γ_w je hmotnost zeminy, ϕ' je úhel vnitřního tření, s_u je neodvodněná pevnost.

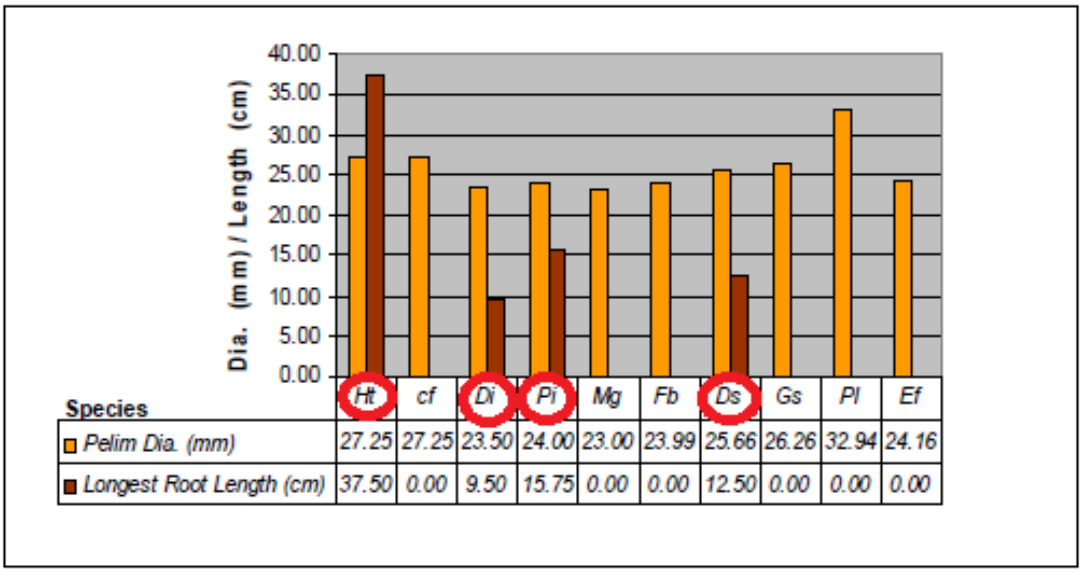
Existuje několik hypotéz, popisujících možné chování kořenů v půdě a účinku na zpevnění zeminy. Například působením tahu v půdě se kořenová vlákna natahují, z toho vyplývá, že kořeny zvyšují hodnotu tahového napětí, dále dochází ke zvýšení dilatance. Závěry hypotéz se vyjadřují v tom smyslu, že kořeny rostlin přispívají různými způsoby k mechanickému chování zemin. Je velice důležitá orientace kořene, konečný stav vlákna je buď protažení, nebo přetržení a poslední závěr hovoří o tom, že syntetická vlákna pomáhají při modelových studiích.

5. Použití metody Live Pole pro tropické klima

I. Výběr rostliny

Pro tropické klima se našlo několik druhů rostlin vhodných pro stabilitu svahu. A to konkrétně: *Acacia mangium*, *Andria surinamensis*, *Casia siamea*, *Cerbera manghas*, *Dillenia suffruticosa*, *Erythrina orientalis*, *Erythrina variegate*, *Gliricidia sepium*, *Hibiscus tiliaceus*, *Perrocarpus indica*, *Macaranga gigantean* (Barker, 1995).

Deset z těchto druhů prokázalo schopnost množení z velkých řízků odebraných z větví stromu, a proto se na nich provedly screeningové zkoušky. Dále se určoval kořenový a kmenový růst v zavlažených kontejnerech ve stínu domu. Řízky byly pěstovány ve standardním médiu skládajícím se z drceného dobře tříděného písku a 10% organické hmoty po dobu 8 týdnů. Po dané době se rostliny vyndaly. U šesti druhů nebyly patrné žádné změny, naopak čtyři druhy *Hibiscus tiliaceus (Ht)*, *Dillenia indica (Di)*, *Perrocarpus indicus (Pi) a Dillenia suffruticosa (Ds)* naznačovaly možnost použití (graf 4). Bohužel u druhu *Perrocarpus indicus* bylo pozorováno velice malé zakořenění, a tak se primárními rostlinami pro živé póly staly: *Hibiscus tiliaceus*, *Dillenia indica a Dillenia suffruticosa* (obrázek 12).



Species	Ht	cf	Di	Pi	Mg	Fb	Ds	Gs	Pl	Ef
Pelim Dia. (mm)	27.25	27.25	23.50	24.00	23.00	23.99	25.66	26.26	32.94	24.16
Longest Root Length (cm)	37.50	0.00	9.50	15.75	0.00	0.00	12.50	0.00	0.00	0.00

Graf 4: porovnání růstu kořenů daných druhů rostlin (Mafian et. al., 2009)

Jak je vidět na grafu, jediné rostliny, které dokázaly zakořenit, jsou Ht, Di, Pi, Ds.

Obrázek 12: Růst kořene u primárních rostlin (Singh et. al., 2009).

II. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti primárních druhů rostlin byly zkoušeny v laboratoři. Rostliny byly přesazeny do vybraných půd (*Jalan Mardia a Jalan Alumni*) a studovala se jejich schopnost stonku odolávat pevnosti v ohybu, tlaku a smyku. Poté byly řízky rozděleny do čtyř věkových kategorií: *Young, Juvenile, Mid-age, and Mature* a testovány. Další zkouška byla na pevnost v tahu kořenů (Singh et. al., 2009).

Rostliny, které se testovaly na mechanické vlastnosti, byly vysázeny v pěti různých půdách a analyzovaly se na živiny v podmínkách stínu domu (z hlediska tří prvků uhlík, dusík a draslík). Bylo opět zjištěno, že Ht a Ds nejrychleji rostou a jsou taky nejvíce adaptivní na různé typy půd. Vzhledem k výsledku dosavadních zkoušek se rostlina *Dillenia indica* vyřadila z dalšího testování, protože nesplnila dané podmínky.

Za nejvhodnější rostlinu je považován druh *Dillenia suffruticosa.* Tento druh má celkově nejvyšší průměrné mechanické vlastnosti ve srovnání s ostatními druhy (38% - 40% větší pevnost v tlaku, 20% - 60% větší pevnost v ohybu, 27% větší pevnost ve smyku). Dále bylo zjištěno, že průměrná pevnost v tahu kořene Ds a Ht z půdy *Jalan Mardi* je téměř stejná, zato u půdy *Jalan Alumni* dosáhl kořen Ds o 40% větších hodnot než Ht.

Kromě toho se zjistilo, že průměrná pevnost v tahu horní části kořene je o 35% větší než spodní část kořene (Mafian et. al., 2009).

III. Polní zkoumání

Polní zkoumání bylo provedeno na metastabilním svahu Jalan Mardi a na stabilním svahu Jalan Alumni. Oba svahy mají přiměřený úhel skonu 29°, jsou dostatečně široké a jsou snadno přístupné.

První svah: Jalan Mardi

Tento svah má úhel sklonu 29°, s mělkými poruchami 0,95 – 1,5 m hluboké (většina poruch má translační rotaci). Svah byl docela mokrý s měkčími písčitými půdami břidlicového původu (stupeň zvětrávání VI). Na tento svah byly použity řízky *Dillenia suffruticosa a Hibiscus tiliaceus*, které se zasadily do hloubky 1,5m v pravidelných rozestupech (obrázek 13).

Obrázek 13: Instalace řízků na první svah (Mafian et. al., 2009).

Druhý svah: Jalan Alumni

Tento svah měl úhel sklonu 28° a byl stabilní. Jeho půda byla sušší než u prvního svahu a také pískovcového původu (stupeň zvětrávání V). Opět se použily jako rostlinné řízky *Dillenia suffruticosa a Hibiscus tiliaceus* a zasadily se po řadách do hloubky 0,75 – 1,0 m (obrázek 14).

Obrázek 14: Instalace řízků na druhý svah (Mafian et. al., 2009).

IV. Postup instalace

Výsadba byla provedena v průběhu dvou dnů během 3. týdne v dubnu a 4. týdne v květnu. Všechny rostlinné řízky byly uříznuty a přepravovány v první den výsadby. Řízky *Dillenia suffruticosa a Hibiscus tiliaceus* byly vyjmuty z lesa v blízkosti areálu a měly počáteční délky 2,10 – 2,30 m pro první hodnocení a 1,25 – 1,40 m pro druhé hodnocení. Průměr rostliny byl na horním konci 50-70 mm a na dolním konci 50-80 mm.

Na každém horním konci řízku byla označena vzdálenost 300mm a na dolním konci 200 – 250 mm. Horní konec řízků byl chráněn před oddělením pomocí zabalení a obmotáním pozinkovaného drátu. Dolní konec byl seříznut do špičky. Každý takto vytvořený svazek byl umístěn do připraveného otvoru (seříznutou stranou dolu) do hloubky 1,5 – 1,0 / 0,75 m jeho délky. Po instalaci mezikruží byl otvor mezi pólem a stěnou obsypán jemným, suchým pískem do hloubky 250 mm od povrchu. Kromě toho byl ještě instalován zavlažovací systém a dočasné krytí pomocí sítě (obrázek 15).

Obrázek 15: Závěrečný pohled na hotovou výsadbu (Mafian et. al., 2009).

V. Monitoring

Místa výsadby byla po ukončení instalace monitorována po dobu 10 měsíců. Monitorování se provádělo denně po dobu prvních dvou týdnů, po uplynutí této doby se monitoring prováděl dvakrát denně po dobu jednoho měsíce a následně jednou za čtrnáct dní. Pokrok a růst byly nejdůležitější položky na monitorovacím seznamu (tabulka 1).

Trial Site	Jln. MARDI		Jln Alumni	Remarks
	Strip 1 (North)	Strip 2(South)		
Installation	21 to 24 Apr 08		21 to 24 Apr 08	
After 1 months	95% [a]	85% [a]	75%	[a] Regarding to dieback plants
After 2 months	89%	71%	92%	
After 3 months	77%	63%	88% [b]	[b] Regarding to dieback plants
After 6 months	56%	45%	83%	
After 9 months	56%	45%	79%	
After 10 months	56%	45%	79%	

Tabulka 1: Výsledky monitoringu obou svahů (Mafian et. al., 2009).

Míra přežití u prvního svahu (Jalan Mardi) se zdála být nízká, avšak míra přežití u druhého svahu (Jalan Alumni) byla vyhovující.

VI. Exhumace

Na konci monitorovacího období byly dva *Dillenia suffruticosa a* dva *Hibiscus tiliaceus* exhumovány. Kořeny *Hibiscus tiliaceus* byly mnohem delší a silnější (délka 230 – 1230 mm, šířka 0,5 – 5,7 mm) než kořeny *Dillenia suffruticosa* (délka 350 – 1060 mm, šířka 0,5 – 2,5 mm, obrázek 16).

Během testů se prokázalo, že rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi HT pólů (1% – 8%) není příliš výrazný, zatímco u DS řízků komprese a pevnost ve smyku poklesla o 15% a pevnost v ohybu se zvýšila o 25%.

Ht kořen (horní obrázek), Ds kořen (dolní obrázek).

Obrázek 16: Exhumované rostliny (Mafian et. al., 2009).

VII. Účinky na zeminu

Poslední zkouškou bylo sledování vlivu kořenů na sání půdy. Pro sací test byly připraveny čtyři vzorky z oblasti výsadby Jalan Alumni. Do nádob byl dán červenožlutý SW, který byl zhutněn. Do jedné z nádob se umístila pouze zemina, a to kvůli kontrole stavu zeminy, do ostatních se zasadily řízky. Každá nádoba měla na spodní straně pět 10 mm otvorů a její spodní strana byla do 20mm zasypána směsí různě velikého štěrku. Tyto vzorky byly umístěny mimo stín domu, aby se simulovalo přirozené prostředí, nicméně zavlažovací systém byl řízený.

Testování začalo hned po výsadbě a vzorky byly monitorovány pomocí čtyř mikrotenzorů a byly nainstalovány do hloubky 200 mm nebo 400 mm.

Po uplynutí 5 měsíců bylo zjištěno, že sání je u HT kořenů 2 krát až 10 krát větší než byly kontrolní výsledky. Porovnání účinků HT s DS kořenů ukazuje, že kořeny DS mají 70% až 100% lepší sání oproti HT kořenům.

VIII. Shrnutí

Předpokládaný výzkum byl plánován pro tropy. Výsledky ukazují, že Hibiscus tiliaceus (HT) a Dillenia suffruticosa (DS) řízky můžou být účinné pro stabilizaci mělkých smykových ploch. Omezení se týkají hlavně doby sklizně a výsadby rostlin a postupu instalace řízků do zeminy. Také se může stát, že některé rostliny uschnou a musí být nahrazeny novými řízky, to v celkovém pohledu na metodu přináší starosti se sledováním a údržbou nad rámec toho, co je obvykle nutné udělat pro běžnou stabilizaci svahu. Pokračující růst rostlin je výhodný pro stabilitu, která se bude neustále zvětšovat díky vývoji kořenového systému. A na závěr je nutné říci, že technika Live Pole byla pro danou oblast tropů vyhodnocena jako úspěšná a použitelná.

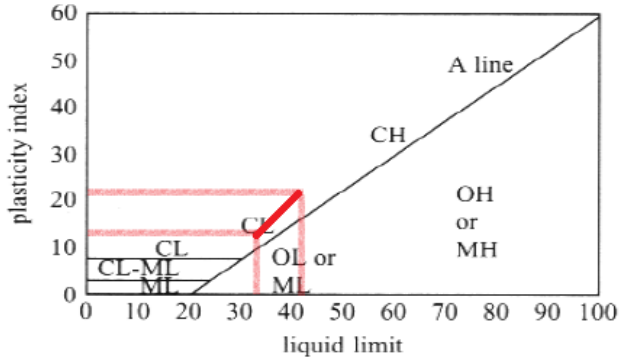
6. Použití metody Live Pole pro mírný pás

Tento výzkum byl proveden pro New Concord ve státě Ohio v USA, ale vzhledem k tomu, že leží ve stejném podnebném pásu jako Česká republika, je možnost se tímto výzkumem inspirovat a použít ho v našich podmínkách.

V roce 2004 byl zahájen výzkum v Ohiu, který by zjistil potenciální přínos bioinženýrské metody jako efektivní a ekologicky atraktivní možnosti stabilizace zeminy. Bioinženýrské metody použité na tento svah se skládaly z rostlinných řízků (které jsou sázené do vyvrtané díry) a křovisek (které byly zasazeny do mělkých rýh napříč svahem). Podloží je tvořené tzv. „červenou břidlicí'', což je velký zdroj svahových nestabilit v této oblasti. Selhání svahu začíná jako jeden či více malých propadů nebo mělkých prohlubní a v průběhu doby se tyto poruchy spojí, vytvoří větší a hlubší propady, které si nakonec vyžádají opravu.

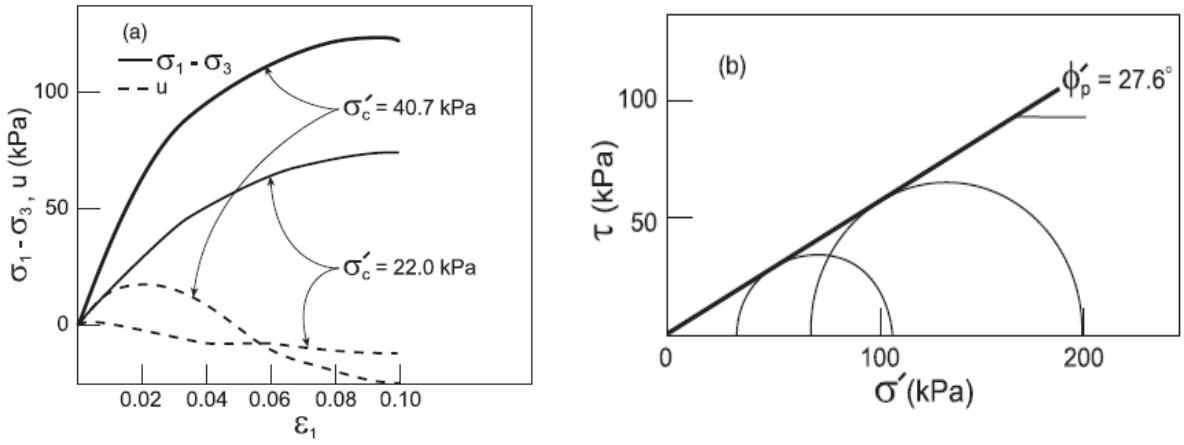
I. Zkoušky zeminy

Průzkum místa se skládal z odběru vzorků z vrtu, zkušební jámy, zjištění profilu podloží a zjištění hloubky podzemní vody (k tomu se použily vrty, piezometry a monitorovací vrty). Většina vzorků byla klasifikována, podle USCS diagramu plasticity, jako jíl s nízkou plasticitou (graf 5). Laboratorní zkoušky zahrnovaly edometrické a triaxiální zkoušky, určení smykové pevnosti, množství živin v půdě a určení negativní hodnoty pórových **t**laků – sání**.** Ze zkoušek se sestavila napěťo-deformační křivka s úhlem vnitřního tření 27.6º (graf 6).



Graf 5: USCS graf pro určení zeminy (http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/mz1/).

Vybraná zemina měla mez tekutosti (liquid limit) v rozmezí od 34% do 42% a mez plasticity (plasticity index) v rozmezí od 14% do 22%. Z grafu je patrné, že se jedná o jíl s nízkou plasticitou.



Graf 6: Napěťo-deformační křivka a Mohr-Colombova kružnice (Wu et. al., 2014).

Dalším měřením se zjistilo, že hodnota fosforu, draslíku a organické hmoty je nižší a hodnota pH půdy je vyšší než hodnota potřebná pro optimální růst rostlin a stromů.

Půdní vlhkost a podzemní voda byly sledovány pomocí tensometrů a piezometrů. Voda byla pozorována, jak prosakuje ze svahu v blízkosti úpatí a při povrchu. Na svahu je možné pozorovat, jak mělce prokluzuje a skládá se z individuálních bloků v maximální hloubce 0,6 m. Pro předběžnou analýzu stability u nekonečného svahu je uveden bezpečnostní faktor Fs menší než 1,0 (pro prosakování paralelní se sklonem) a přibližně 1,0 (pro vertikální prosakování směrem dolů). Stejná analýza ukázala, že pro případ se řízky by se pevnost ve smyku zvýšila o 25 kPa, Fs by se zvýšila na 1,0 pro paralelní a 1,5 pro vertikální prosakování. Kapilární tlak v horní části byl menší než 20 kPa a naměřená data odpovídala obsahu vody v rozmezí 30-45%. Rozdíly v obsahu vody byly přičítány nepravidelnému vsakování vody.

Na základě těchto výsledků byly rostlinné řízky použity pro zvýšení stability mělkého svahu a křoviska pro kontrolu eroze.

II. Výsledky výsadby

Řízky byly nařezány z nedaleké vrby (Salix exigua a Salix longifolia) a topolu na začátku dubna a skladovány při teplotě 0 ºC v chladničce. Komplikace s počasím zdržely výsadbu až do června. Řízky byly uvázány do svazků a každý byl v dolní části seříznut a v horní obalen textilií a obmotán drátem, aby se zabránilo rozdělení. Takto připravené svazky se zasadily do předem vyhloubených otvorů a zatloukly přibližně 15 cm od spodního okraje. Poté se zasypaly zeminou s granulovaným bentonitem, aby se zabránilo vysychání při období sucha. Nakonec se půda ručně zhutnila. Bylo instalováno 96 vrbových řízků a 165 topolů. Pro posouzení růstu kořenů a odolnost řízků bylo několik živých a několik uschlých řízků exhumováno a rozkládající síla byla měřena na vyhodnocení bočního tření.

Celkové přežití počátečních rostlin bylo nízké. K přispívajícím faktorům patří pozdní čas na výsadbu a dlouhá doba skladování řízků před výsadbou. Míra přežití byla po první výměně, která se skládala výhradně z vrb, lepší. To je přičítáno dřívější době výsadby a kratší době skladování řízků. Míra přežití po druhé výměně řízků, která se také skládala z vrb, byla nízká. V tomto případě byly řízky sázeny na podzim a nebyly dobře připraveny na zimu a následné období sucha, které přišlo během jara a léta. O tři roky později 92 % z vrbových řízků bylo živých. Míra přežití u vrb byla o hodně lepší než u topolů, a proto se pro mírné podnebí nedoporučuje vysazovat jako stabilizující prvek topoly.

Na několika uschlých rostlinách byly provedeny zkoušky. Jelikož rostliny neměly nalepenou půdu na kořenech, naznačuje to, že došlo k selhání na rozhraní. Výpočet se provedl pomocí rovnice (6):

$$a = \frac{P}{\pi d L} \qquad (6)$$

kde a značí přilnavost zeminy, P je síla, d je průměr řízku, L je délka řízku.

Vypočtené hodnoty se pohybovaly v rozmezí 1,8 – 12,0 kPa. Velký rozsah je přičítán variabilitě kontaktu řízku a půdy a nepravidelným tvarům podél jejich délky. Další zkoušky byly provedeny na živých rostlinách a po 13 měsících od výsadby se získala vrcholová pevnost 4,7 kN. Vypočtené hodnoty kořenového příspěvku k zemině se pohybovaly v

rozmezí 33 – 68 kPa. Velký rozdíl hodnot je přičítán rozdílům v kořenové struktuře a rozdílům v půdě kořenové adheze.

Posuny, které nastaly před první výsadbou rostlin, byly přibližně 50 mm velké a měřením se ukázalo, že došlo k porušení v hloubce 0,5-0,6 m pod povrchem. Po první instalaci a průzkumu se pohyby ustálily jen v malé míře. Ale další měření provedené o rok později prokázalo, že se svah uklidnil a rostliny pomohly k ustálení pohybu svahu.

III. Shrnutí

Přežití řízků po první výsadbě bylo malé, což je dáno pozdní výsadbou a dlouhým skladováním řízků. Konečný průzkum odhalil, že počet přežitých rostlin se pohybuje okolo 92% po dobu 4 let. Pro výsadbu je lepší nepoužít topoly, ale vrby, které mají lepší schopnost přežití za všech podmínek. Díky výraznému růstu kořenů byl stupeň stability vysoko nad 1,0. To bylo vidět i v terénu, kde nebyl pozorován žádný pohyb. Proto může být tato bioinženýrská metoda úspěšným způsobem řešení stability svahu.

7. Závěr

Metoda Live Pole využívá jednoduché a ekologické prostředky pro zajištění stability svahu. Jsou to rostlinné řízky. Je velice důležité vybrat správné rostliny pro danou oblast stability. Řízky se musí uříznout na jaře před bifurkací a zasadit v co nejkratším termínu od uříznutí. Dlouhé skladování po uříznutí zkracuje životaschopnost a adaptaci rostliny. Výsadba probíhá do předem připravených otvorů a zasypává se pískem či zeminou s bentonitem a původní zeminou. Podle zkoušek se v zemině zvyšuje pevnost v tahu při snižujícím se průřezu kořene. Vliv kořenů na stabilitu se vypočítá z daných rovnic (1-5) a může se použít pro vytvoření modelu svahu. Dále zjišťujeme součinitel bezpečnosti, což je poměr smykové pevnosti a smykového napětí. Z mechanických vlastností víme, že i při malém množství kořenového systému v zemině dojde ke zvýšení stability. Nejúčinnějšími mechanickými parametry na kořenový vývoj jsou složení půdy, struktura půdy, profil a dostupná vlhkost, dále je důležitým faktorem rovněž zvýšení dilatance.

Live Pole je ekonomicky i ekologicky přijatelná možnost stability mělkého svahu. Použití je možné téměř všude. Nejvíce se s ní však zatím setkáváme u vodohospodářských staveb či na březích řek.

Seznam literatury

- BARKER David H. *Vegetation and slopes: stabilisation, protection, and ekology* [online]. Engineers, Institution of Civil, London: Thomas Telford, 1995, 296 s. [cit. 2015-3-22]. ISBN 0727720317. Dostupné také z: http://www.google.cz/books?id=osr8TIt18soC&dq=Wu+T+H+root+properties&lr=&hl=cs&source=gbs_navlinks_s

- BENEŠOVÁ, Marika. *Odmaturuj! z biologie*. 1. vyd. Brno: Didaktis, 2003, 224 s. ISBN 8086285677.

- COPPIN, Nick J., Ivor G RICHARDS. *Use of vegetation in civil engineering. Butterworths London* [online], 1990, 292 s. [cit. 2015-04-12]. Dostupné také z: https://virtweb.grad.hr/_download/repository/CIRIA_2007.pdf

- DANJON, Frédéric, David H. BARKER, Michael DREXHAGE, Alexia STOKES. *Using Three-dimensional Plant Root Architecture in Models of Shallow-slope Stability* [online]. Annals of Botany, 2008, 13 s. [cit. 2015-3-15]. Dostupné také z: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2710273/

- DUNCAN, Michael J., Stephen G. WRIGHT. *Soil strength and slope stability*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005, 297 s. ISBN 0-471-69163-1.

- FAISAL, Hj. Ali, Thamer A. MOHAMAD,S. HASHIM, B. B. K. HUAT. *Relationship between shear strength and soil water characteristic curve of an unsaturated granitic residual soil.* American Journal of Environmental Sciences [online], 2006, 142 s. [cit. 2015-04-12]. Dostupné také z: http://www.thescipub.com/abstract/?doi=ajessp.2006.142.145

- FREDLUNG, Delwyn G., Norbert R. MORGENSTERN. *Stress state variables for unsaturated soils.* Journal of the geotechnical engineering division, ASCE, 1977, 447- 466 s.

- GOLDSMITH, Wendi, Donald GRAY, John McCULLAH. *Bioengineering Case Studies: Sustainable Stream Bank and Slope* [online]. Redding: Springer Science & Busines Media, 2013, 263 s. [cit. 2015-1-11]. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=ty68BAAAQBAJ&pg=PA164&lpg=PA164&dq=%22live+poles%22&source=bl&ots=cd_EeqfsSg&sig=aWMd3HTifpL8JO6BBsGjoPbjr14&hl=cs&sa=X&ei=1yiIVI-fBIjEPLqVgdgC&ved=0CFsQ6AEwCA#v=onepage&q=%22live%20poles%22&f=false

- GRAY, Donald H., Robbin B. SOTIR. *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control* [online]. New York: John Wiley & Sons, 1996, 378 s. [cit. 2015-3-22]. ISBN 0471049786. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=kCbp6IvFHrAC&dq=Gray+D+H+biotechnical+and+soil&hl=cs&source=gbs_navlinks_s

- HEINECK, Karla Salvagni, Matthew Richard COOP, Nilo Cesar CONSOLI. *Effect of Microreinforcement of Soils from Very Small to Large Shear Strains* [online]. JGGE, 2005, 1024-1033 s. [cit. 2014-5-2]. Dostupné také z: http://scholar.google.cz/scholar?hl=cs&q=Effect+of+Microreinforcement+of+Soils+from+Very+Small+to+Large+Shear+Strains+&btnG=

- HO, Ken K. S., K. S. Li. *Geotechnical Engineering - Meeting Society Needs* [online]. CRC Press, 2001, 1400 s. [cit. 2015-1-11]. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=75sZNS7cOe4C&pg=PA663&lpg=PA663&dq=%22live+poles%22&source=bl&ots=-VYQ8M0mJO&sig=GunoMEe9jXzq1BCNlourZDuuSwg&hl=cs&sa=X&ei=1yiIVI-fBIjEPLqVgdgC&ved=0CEEQ6AEwBA#v=onepage&q=%22live%20poles%22&f=false

- IBRAIM, E., David Muir WOOD, A. DIAMBRA, A. R. RUSSELL. *Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading* [online]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 374–385 s. [cit. 2015-5-2]. Dostupné také z: http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/fibres/

- KAFTANOVÁ, Aneta. *Analýza chování vyztužené zeminy s rozptýlenou výztuží* [online]. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2014, [cit. 2015-4-24]. Dostupné také z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&ved=0CB8QFjAAOAo&url=http%3A%2F%2Fdspace.upce.cz%2Fbitstream%2F10195%2F57805%2F3%2FKaftanovaA_Anal%25C3%25BDzaChov%25C3%25A1n%25C3%25AD_A%25C5%25A0_2014.pdf&ei=QxM6VeWLGMiWarKZgbgL&usg=AFQjCNHz5mt_4bE_0mZQIT4xJn16EkGK7A&sig2=PA5GHynzetEx0t0fcpgfDg

- KHALILNEJAD, Abdolhossein, Normaniza OSMAN. *Contribution of the Root to Slope Stability*. Geotechnical and Geological Engineering [online]. 2012, vol. 30, issue 2, 277-288 s. [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.1007/s10706-011-9446-5. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/s10706-011-9446-5

- KRAEBEL, Charles John. *Erosion control on mountain roads* [online]. Washington D.C.: U. S. Dept. of Agriculture, 1936, 45 s. [cit. 2015-3-22]. Dostupné také z: https://archive.org/details/erosioncontrolon380krae

- KUPILÍK, Václav. *Vliv vegetace na podzákladí a stabilizaci terénu* [online]. ČVUT Praha, Fakulta stavební, 2011, [cit. 2014-11-23]. Dostupné také z: http://stavba.tzb-info.cz/zaklady/7711-vliv-vegetace-na-podzakladi-a-stabilizaci-terenu.

- MAFIAN, Sasan, Bujang B. K. HUAT, David H. BARKER, Nordin A. RAHMAN. Live Poles for Slope Stabilization in the Tropical Environment. EJGE, 2009, vol. 14, 25 s. [cit. 2015-1-11]. Dostupné také z: http://www.ejge.com/2009/Ppr0962/Ppr0962.pdf?origin=publication_detail

- MORGAN, Roy P. C., R. J. RICKSON. *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach* [online]. Taylor & Francis, 2003, 288 s. [cit. 2015-3-24]. ISBN 1135831904, 9781135831905. Dostupné také z: http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=q5t5AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA233&dq=Wu+TH.+1995.+Slope+stabilization.+In:+Slope+Stabilization+and+Erosion+Control.+RPC+Morgan+and+RJ&ots=4_5xss6jHg&sig=Y3RnA92Z_H14FZoERzOhyCnmgBI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- SINGH, Harwant, Sasan MAFIAN, Bujang B. K. HUAT, Nordin A. RAHMAN. *Potential plant species for live pole application in tropical environment* [online]. American journal of environmental sciences, 2009, 759-764 s. [cit. 2015-3-13]. Dostupné také z: http://thescipub.com/abstract/10.3844/ajessp.2009.759.764

- ŠLEZINGR, Miroslav. *Břehová abraze: příspěvek k problematice zajištění stability břehů.* Brno: Akademické nakladatelství cerm, 2004, 159 s. ISBN 80-7204-342-0

- VYDROVÁ, Linda. *Studie o vlivu vegetace na stabilitu svahu*. ČVUT Praha, Fakulta stavební, 2007.

- WOOD, Muir David. *Roots and fibres.* 2011. Nepublikováno

- WU, Tien H., Christopher M. KOKESH, Brian R. TRENNER, Partick J. FOX. *Use of Live Poles for Stabilization of a Shallow Slope Failure*. JGGE, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0001161

- ZÁRUBA, Quido., Vojtěch MENCL. *Sesuvy a zabezpečování svahů*. 2. vyd. Praha: Academia, 1987, 340 s. ISBN 21-033-87

Obrázky:

http://www.biologie.webz.cz/www/botanika/organologie.html

http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/mz1/