

České vysoké učení technické v Praze

Strix Chomutov a.s.

Geosyntetika s.r.o.

Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy

Metodika

Petr Kavka (35%), Martin Vaníček (30%), Ondřej Marek (5%), David Zumr(5%), Adam Tejkl (5%),
Romana Kubínová (5%), Martin Neumann (5%), Dušan Dufka (5%)

Dedikace:

Metodika vznikla jako výstup projektu TH02030428 „Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí“ řešeného v letech 2017-2020.

Metodika byla certifikována Ministerstvem dopravy pod číslem.....

Oponenti:

Prof. Ing. Martin Hanel, Ph. D.

Ing. Jiří Kapička

Copyright © Strix Chomutov a.s., České Vysoké Učení Technické v Praze, Geosyntetika s.r.o.
2020

ISBN 978-80-01-06806-9

Obsah

Cíl metodiky	4
Vlastní popis metodiky	4
Přehled způsobů technické protierozní ochrany svahů dopravních staveb.....	5
Navrhování opatření pro zvýšení stability humózní vrstvy svahů	7
Horní založení	8
Kotvení.....	8
Ošetření podkladní vrstvy a zdrsnění jejího povrchu	9
Stabilita povrchové vrstvy	9
Pracovní postup kotvení – včetně aplikátoru.....	11
Vzorová úloha č. 1 – Stabilita povrchové vrstvy.....	12
Navrhování opatření pro zvýšení ochranného účinku proti vodní erozi.....	14
Erozní ohroženost.....	14
Vstupní data	15
Návrh opatření	17
Výpočet charakteristik odtoku	18
Vzorová úloha č. 2.: Zjednodušené určení erozního ohrožení z 15ti minutového deště na přímém svahu.	18
Vzorová úloha č. 3: Určení erozního ohrožení a návrh opatření na vzorovém náspu	20
Srovnání novosti postupů.....	23
Popis uplatnění certifikované metodiky.....	23
Ekonomické aspekty	24
Seznam použité a související literatury	24
Seznam publikací které předcházely metodice	25
Přílohy.....	28
Příloha č. 1 - Průměrné hodnoty kritického tečného napětí a maximální rychlosti pro skupiny geosyntetik.	28
Příloha č. 2 - Tabelární výpočet zjednodušeného svahu	29

Cíl metodiky

Cílem metodiky je doplnit a aktualizovat možnosti ochrany dopravních staveb před nepříznivými účinky vodní eroze a vhodnějšího zajištění stability svahu. Zejména pak TP 53 - Protierozní opatření na svazích pozemních komunikací z roku 2003. Zde uvedené metody hodnocení neodpovídají současnému stavu poznání problematiky vodní eroze a možnostem výpočtu hodnocení a způsobu návrhu. Erozní problematika je v TP řešena pouze obecnými pojmy a její kvantifikace chybí.

Erozní škody na konstrukcích zemních těles jsou způsobeny především krátkodobými přívalovými dešti, které mají čistě epizodní charakter. Z hlediska dopadů na funkčnost a dlouhodobost stavby je nejproblematictější vznik rýh, jakožto trvalých preferenčních cest proudění vody. Metodika přináší zejména aktualizaci ve způsobu určení erozního ohrožení a navržení vhodné ochrany v závislosti na návrhové srážce a na základě zvoleného typu ochranného opatření. Hodnoceny jsou vypočtené tečné síly na rozhraní voda-půda a rychlosti proudění. Takto získané hodnoty jsou porovnávány s limitními hodnotami pro stav holé půdy nebo podle zvoleného způsobu ochrany.

V metodice použité přístupy jsou výsledkem projektu „TH02030428 – Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí“, který byl podpořen Technologickou agenturou České Republiky. Mimo to metodika cílí na aktualizaci přístupu k využívání návrhových srážek, které doposud pracují s údaji odvozenými v roce 1958 J. Truplem. Dále metodika přináší rozšíření datové základny TP o řešení problematiky stability povrchové humózní vrstvy z hlediska smykových sil. Výpočet stability povrchové humózní vrstvy vychází z principů mechaniky zemin a zohledňuje interakci všech elementů protierozní ochrany.

Metodika je zacílena na běžné sypané svahy a zářezy. Pro nestandardní případy jako je stabilita a ochrana skal není tato metodika určena. Stávající TP 53 se dále zabývá vhodným ozeleněním a údržbou zeleně. Tato metodika tyto oblasti nijak nerozšiřuje a předpokládá využití stávající TP 53 nebo informace výrobců zeleně.

Metodika by tak měla:

- reflektovat poznatky z hlediska určení erozní ohroženosti a tvorby rýh na základě fyzikálního přístupu,
- reflektovat aktuální poznatky z hlediska návrhových dešťů a upřesnit možnosti využití v současné době dostupných dat,
- reflektovat moderní přístupy k určení maximálního průtoku, ale i k určení objemu odtoku z nepevněných ploch silničních těles,
- návrh stability povrchové humózní vrstvy ve spojení s protierozními opatřeními, zejména plošnými matracemi a jejich kotvením systémem a také ve vztahu na způsob provedení povrchu zemního tělesa pod humózní vrstvou,
- doporučovat zásady správného kotvení protierozních materiálů,
- navrhovat zásady pro instalaci protierozních opatření.

Vlastní popis metodiky

Tato metodika cílí na využití technických způsobů ochrany zemních těles dopravních staveb před negativními dopady srážek. Ty ohrožují zemní tělesa na jedné straně z hlediska jejich smykové stability a také způsobují vodní erozi. První část metodiky slouží jako přehled možných způsobů technické ochrany na svazích dopravních staveb. Druhá část popisuje postup výpočtu smykové stability povrchové humózní vrstvy, zejména pak vliv jednotlivých prvků systému protierozní ochrany svahů. Třetí část je věnována způsobu určení erozního ohrožení svahů a metodě návrhu vhodného opatření.

V poslední části jsou uvedeny teoretické předpoklady, ze kterých čerpají předchozí části. Nedílnou součástí jsou příklady, které jsou věnovány návrhu protierozního opatření pro různě složité případy staveb a jeden příklad popisující výpočet stability humózní vrstvy.

Přehled způsobů technické protierozní ochrany svahů dopravních staveb

Svahy pozemních komunikací jsou uměle budované konstrukce, které plní řadu funkcí. Nejčastěji jsou budovány jako zemní tělesa. Jak z estetického, tak funkčního pohledu je cílovým stavem ozeleněný svah se zapojeným kořenovým systémem. Cílová vegetace tak zajišťuje finální, stabilní a dlouhodobou ochranu svahů před účinky přívalových dešťů. V případě ohumusování svahu s následným osetím je finálním stavem plně zapojený travní drn, který zároveň podporuje stabilitu celého svahu. Podle charakteru humózní vrstvy, roční době realizace díla, zvoleném osetí je třeba zajistit také dočasnou ochranu povrchu do plného zapojení ozelenění. Typy ozelenění (osetí, hydroosev) a vhodnost příslušných směsí travin je popsáno ve stávající TP 53, případně u konkrétních výrobců travních směsí.

Během výstavby a po jejím dokončení do vzrůstu vegetace je třeba zajistit z hlediska eroze dočasnou, případně i trvalou, ochranu. Ve ztížených klimatických podmínkách, kdy je ozelenění problematické, je třeba stálé ochrany. Dalším důvodem pro využití ochranných prvků je stabilita humózní vrstvy a její propojení s podložní vrstvou. Na rozhraní těchto dvou vrstev dochází ke smykovému namáhání, které je dané různými fyzikálními vlastnostmi materiálů.

Způsoby ochrany je možné rozdělit z několika hledisek:

- plošné opatření a liniová opatření,
- dočasné a trvalé,
- podle typu a struktury materiálu.

Detailně jsou jednotlivé technické materiály rozčleněny:

- přírodní materiály – výrobky zejména z kokosu, juty, slámy a jejich kombinací:
 - síťové materiály (například K400, K700 a K900, J 500),
 - plošné materiály (například Biomac CC),
 - liniové materiály (například slámové válce),
- umělé materiály – výrobky zejména z Polyamidu, Polypropylénu a dalších:
 - geomříže ploché,
 - geomatrace / georohože – výrobky s vláknitou 3D strukturou,
 - geomříže a geotextilie s vlnami,
 - netkané geotextilie.

Technické požadavky – univerzální:

- materiál nebo jejich směs,
- tloušťka prvku a jeho hmotnost,
- maximální tečné napětí a maximální rychlost způsobená povrchovým odtokem,
- pevnost a průtažnost,
- délka ochranného účinku a degradace materiálu,
- způsob kotvení.

Liniová opatření fungují na principu vytváření pásových překážek, které přerušují dráhy soustředěného odtoku a zároveň zachytávají případný erodovaný materiál. Jsou tak přirozeně a samovolně vytvářeny sedimentační lavice. Jde například o filtrační bariery z biodegradabilních materiálů, zápleťové plůtky nebo pleteniny.

Filtrační bariéry jsou zpravidla nízké cca 20–50 cm vysoké a dle potřeby dlouhé válce z geomříže, pytloviny, či jiného vhodného materiálu, které jsou naplněny senem, slámou nebo zbytky kokosových vláken. Takové bariéry propouští vodu, ale unášený materiál zachycují a v průběhu času vytvářejí „kaskády“, jenž svah stabilizují.

Zápletové plůtky a pleteniny jsou konstruovány jako rýhy, podél kterých jsou zaraženy kůly ze dřeva nebo oceli v jedné nebo dvou řadách v rozestupu 100-300 cm, zapletením klestu jehličnatého, listnatého nebo vrbového v jedné nebo dvou řadách kůlů v požadované výšce a zásyp rýh pro plůtky. U dvouřadových plůtků zásyp vnitřního prostoru včetně vykopávky chybějící zeminy a jejího přehození do zasypávaného prostoru. Zápletové plůtky mohou být zřizovány v horizontálních řadách, diagonálně nebo do tvaru kosočtverce. Zápletové plůtky bývají doplněny, nebo kombinovány s tzv. hatěmi. Hatě jsou smotané 20-40 cm široké válce z živých nebo mrtvých prutů.

Zápletové plůtky a pleteniny se používají při ochraně svahů proti erozi. V praxi je to nejčastěji při úpravách břehů malých vodních toků. Časté je také jejich využití jako ochranného prvku při zachytu drobných úlomků skal a kamenů ve svazích, kde není z estetických či ekologických důvodů možno použít jiný záchytný prvek.

Mezi další způsoby pak patří klejonáž a mulčování. Při použití těchto metod je výhodou využití místních často náletových dřevin, které jsou odklizeny během stavby.

Klejonáž

Klejonáž vychází z historických postupů uplatňovaných zejména v lesnictví. Moderní podoba klejonáže zachovává jako základní materiál klest z téměř libovolných dřevin. Klest je položen na svah buď napříč přes spádnici anebo směrem svého růstu proti spádnici svahu. Tímto způsobem je maximalizován záchytný efekt klestu. Přes klest je pak přetažena síť (ocelová, kokosová apod., viz dále), která je v pásech kotvena k podkladu. Vrstva klestu by po přitlačení k povrchu měla činit okolo 10 ~ 20 cm.

Mulčování

Mulčování je původně agrotechnická metoda používaná v zahradnictví a zemědělství. Ve smyslu geotechnických opatření za mulčování považujeme metodu rovnoměrného pokrytí svahu ohroženého erozí nějakým vhodným dostupným biologickým materiálem (například dřevní štěpkou z výřezu náletu, nebo starým senem apod.). Mocnost vrstvy se odvíjí od zvoleného materiálu, ale jedná se zpravidla o 5-15 cm. Vytvoří se tak vrstva, která zabraňuje rozbití půdního povrchu deštěm a zabraňuje vyplavování vrstvy humusu, působí preventivně proti vytváření erozních rýh.



Obrázek 1: Ukázka (a) klejonáže a (b) vodorovných zachycujících prvků

Hydroosev

Hydroosev je způsob ochrany povrchů spojený s jejich osetím, při kterém se směs hydraulicky rovnoměrně nanáší postříkem. Směs tvoří osivo, voda, umělé hnojivo, organické hmoty (rašelina, řezanka, kaly, sláma), stabilizující a protierozní pomocné přísady. Pro navrhování z hlediska protierozní ochrany platí stejné principy posouzení jako pro jiné způsoby plošné ochrany uvedených dále.



Obrázek 2: Ukázka plochy ošetřené hydroosevem

Navrhování opatření pro zvýšení stability humózní vrstvy svahů

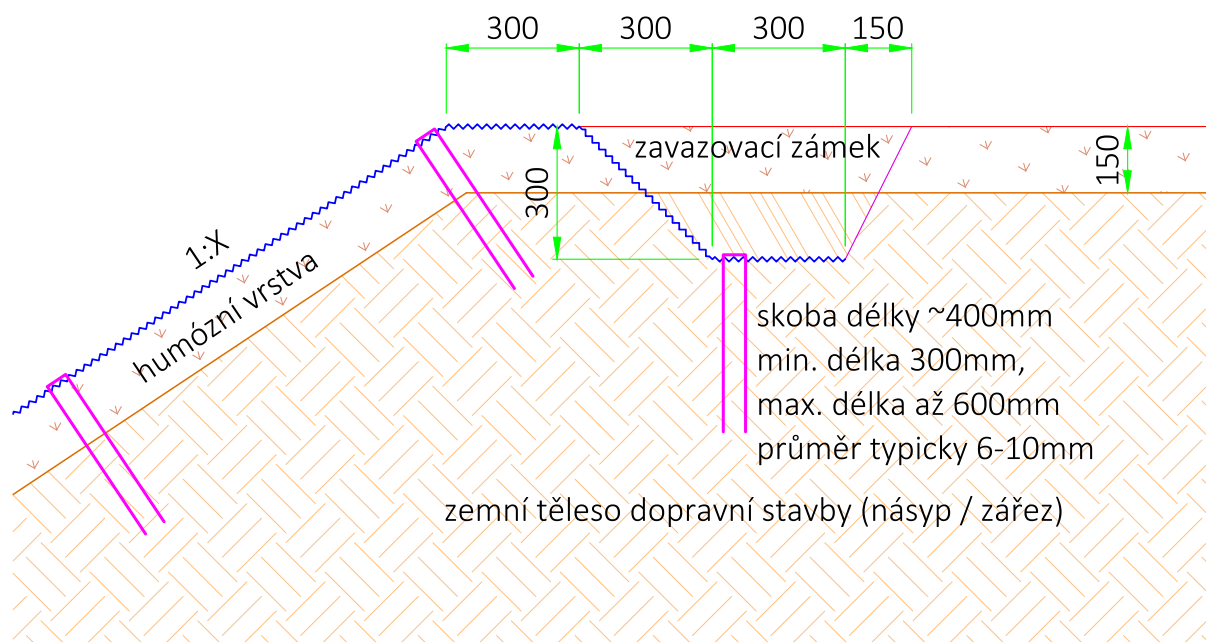
Existuje reálné riziko sesutí povrchové humózní vrstvy na svazích jak zářezů, tak i násypů. Nejnepríznivějším stavem je plně nasycená humózní vrstva na málo propustném, zejména jílovitém, podkladu. Podklad se dostane vlivem zvýšené vlhkosti do stavu měkké či až kašovité konzistence a jeho smykové parametry se sníží pod kritickou mez (viz kapitola stabilita povrchové humózní vrstvy).

K obdobné situaci může dojít vlivem zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů podkladní vrstvy, kdy dojde ke zvětšení pórovitosti a snížení pevnosti.

Pro zajištění stability humózní vrstvy je třeba řešit především horní založení plošných prvků. Vhodná volba kotvení (délka kotev, jejich průměr, aplikace kotev, využití stabilizačních podložek atp.).

Horní založení

Pro zamezení syčení povrchové vrstvy svahu vodou z prostoru nad svahem je třeba zamezit nátok této vody na svah. Základním řešením je provést odvodňovací příkop nad svahem a odvedení vod mimo zemní těleso (do vodoteče či kanalizace) ať již po povrchu ve žlabu či potrubím. Pokud to není uskutečnitelné, tak je třeba vhodným způsobem zajistit, aby se tato voda nedostávala na svah v koncentrovaných odtocích tak, aby nevtékala pod případnou povrchovou protierozní ochranu. Optimální řešení pro zamezení podtékání protierozní ochrany je řádně provedený zavazovací zámek za horní hranou svahu, do něhož se protierozní plošný prvek ukotví. Standardizovaný detail zavazovacího zámku je uveden na Obr. 3.



Obrázek 3: Typický detail zavazovacího zámku

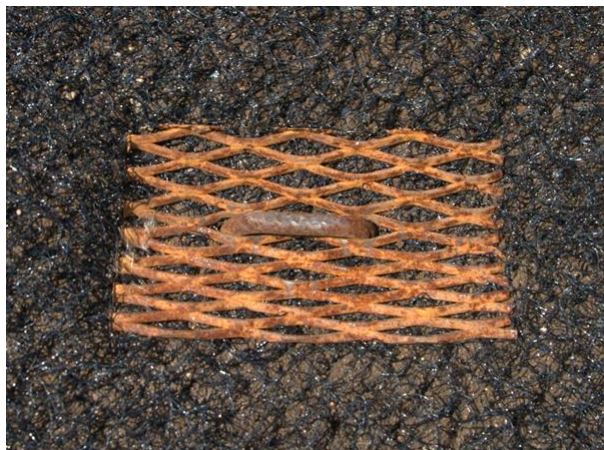
Kotvení

Dalším důležitým opatřením, které zvyšuje odolnost proti sesunutí povrchové vrstvy je kotvení protierozního prvku na povrchu přes povrchovou humózní vrstvu až do podkladu. Jaký přínos má kotvení na zvýšení odolnosti povrchové vrstvy před sesutím závisí na tvaru a velikosti příčného řezu kotevního prvku, jeho délce a četnosti těchto kotevních prvků. Ve svém principu se kotevní prvek chová jako miniaturní pilota, která je namáhána na vodorovnou únosnost. Vlastní povrchový protierozní prvek může pomoci s přenosem síly mezi kotevním prvkem a humózní vrstvou zeminy, kdy tření na kontaktu mezi humózní povrchovou vrstvou a protierozním prvkem stabilizuje povrchovou vrstvu, ale zároveň vzniklá třecí síla zatěžuje na úrovni terénu kotevní prvek. Kotevní prvek musí být schopen tuto dodatečnou třecí sílu přenést do podkladní vrstvy, aniž by došlo k jeho porušení (vytržení).

Kotevní prvek se typicky skládá ze skoby tvaru U vyrobené ohnutím žebříkové oceli. Průměr drátu k výrobě skob se typicky pohybuje od 6 do 10 mm. Délka skob bývá typicky 400 mm, s tím, že minimální

délka je dvojnásobek mocnosti humózní vrstvy a maximální délky nepřekračují čtyřnásobek, neboť prodloužení již nemá žádný dodatečný efekt.

Pokud kotevní prvek rozšíříme o podložku (Obr. 4), která ve větší ploše přichytí protierozní matraci k humózní vrstvě, dojde k významnému navýšení únosnosti spoje mezi skobou a protierozním prvkem, čímž se významně navýší stabilizační efekt kotevního systému.



Obrázek 4: Příklad položky – tahokov

Vzdálenost, resp. hustota kotevních prvků pomáhá nejen se stabilizací povrchové humózní vrstvy, ale též s kontaktem mezi protierozním prvkem a humózní zeminou. Z tohoto důvodu se rozteč kotevních prvků volí hustší se zvyšujícím se sklonem chráněného svahu, neboť se zvýšeným sklonem dochází ke zvýšení destabilizujících sil od tíhy a snížení stabilizujících sil vlivem tření na rozhraní vrstev. U vyšších sklonů svahů je taktéž vyšší riziko podtékání protierozního prvku, pokud není v dobrém kontaktu s podkladem.

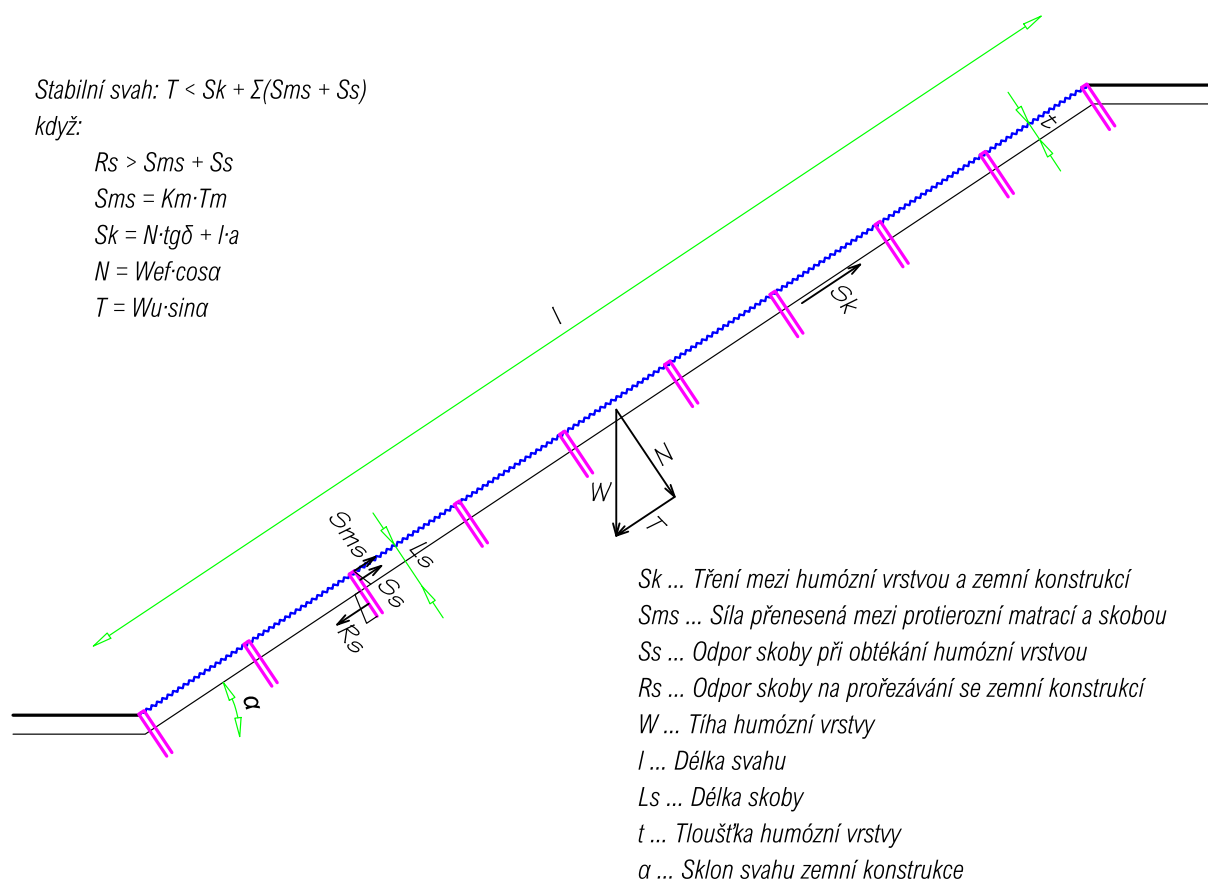
Ošetření podkladní vrstvy a zdrsnění jejího povrchu

Nemalý význam na stabilitu povrchové vrstvy má i kontakt mezi povrchovou humózní vrstvou a podkladem. Pokud je podklad hladký, tak je povrchová vrstva náchylnější na usmyknutí po podkladu, jelikož je součinitel tření kontaktu nižší. Avšak pokud by byl povrch zdrsněn před pokládkou humózní vrstvy, tak to může pozitivně ovlivnit stabilizační opatření – zvýšit součinitel tření kontaktu. Nejvhodnějším způsobem, jak povrch jílovitého svahu zdrsnit, je použití standardní lžíce na bagru či rypadla. Vodorovné vrypy kolmé na sklon svahu zdršňují podklad nejlépe.

Ke snížení možnosti ztekucení humózní vrstvy přispěje i její zhutnění, kdy se sníží pórovitost humózní vrstvy a tím i možný objem vody při plném nasycení, které má za následek snížení celkové vlhkosti a tím k omezení rizika změny konzistence k horšímu.

Stabilita povrchové vrstvy

Kontrola stability povrchové vrstvy je založena na stanovení a porovnání stabilizujících a destabilizujících sil na kontaktu povrchové vrstvy a podkladu, schematicky jsou možné působící síly naznačeny na Obr. 5. Stanovení působících sil vychází z principů mechaniky zemin, a tudíž i vstupní údaje budou k dispozici převážně z geotechnického průzkumu, resp. pedologických dat pro vlastní humózní vrstvu.



Obrázek 5: Schéma sil působících na stabilitu povrchové vrstvy

Pro zajištění stabilního svahu je třeba zajistit, aby síly destabilizující byly menší než síly stabilizující, resp. aby součinitel spolehlivosti konstrukce γ_R dle rovnice (1) byl větší než 1,0.

$$\gamma_R = \frac{S_k + N_s \cdot \min(R_s; S_s + S_{MS}) + T_M}{T} \quad (1)$$

Kde jednotlivé síly a geometrické veličiny jsou znázorněny na Obr. 5 a výpočet sil je uveden v rovnicích (2)-(11) níže.

Efektivní tíha humózní vrstvy:

$$W_{ef} = t \cdot l \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w), \quad (2)$$

γ_{HV} ... objemová tíha humózní zeminy,
 S_r ... stupeň nasycení humózní vrstvy.

Totální tíha humózní vrstvy:

$$W_u = t \cdot l \cdot \gamma_{HV}, \quad (3)$$

Normálová složka tíhy:

$$N = W_{ef} \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

Tangenciální složka tíhy:

$$T = W_u \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

Třecí síla mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí:

$$S_k = N \cdot \operatorname{tg} \delta + l \cdot a, \quad (6)$$

δ úhel vnitřního tření na kontaktu mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí,

a soudržnost na kontaktu mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí.

Odpor jedné skoby tvaru U na obtékání zeminou humózní vrstvy:

$$S_s = 2 \times 3 \cdot d_s \times \left(\frac{1}{2} \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w) \cdot t^2 \cdot K_{p,HV} + t \cdot c_{HV} \cdot K_{p,c,HV} \right), \quad (7)$$

d_s průměr skoby,

$K_{p,HV}$ součinitel pasivního zemního tlaku humózní vrstvy pro třecí složku,

$K_{p,c,HV}$ součinitel pasivního zemního tlaku humózní vrstvy pro adhezní složku,

c_{HV} soudržnost humózní vrstvy.

Únosnost spoje mezi skobou a protierozním prvkem:

$$S_{MS} = K_M \cdot T_M, \quad (8)$$

T_M tahová pevnost protierozního prvku,

K_M redukční součinitel stanovený experimentálně.

Odpor jedné skoby tvaru U na prořezávání se zeminou zemní konstrukce:

$$R_s = 2 \times 3 \cdot d_s \times \frac{1}{2} [(L_s - t)^2 \cdot (\gamma_{ZK} - S_r \cdot \gamma_w) + t \cdot L_s \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w)] \cdot K_{p,ZK}, \quad (9)$$

γ_{ZK} objemová tíha zeminy zemní konstrukce,

$K_{p,ZK}$ součinitel pasivního zemního tlaku zeminy zemní konstrukce.

Limitní hodnota odporu skoby:

$$R_s > S_s + S_{MS}, \quad (10)$$

Počet skob ve svahu:

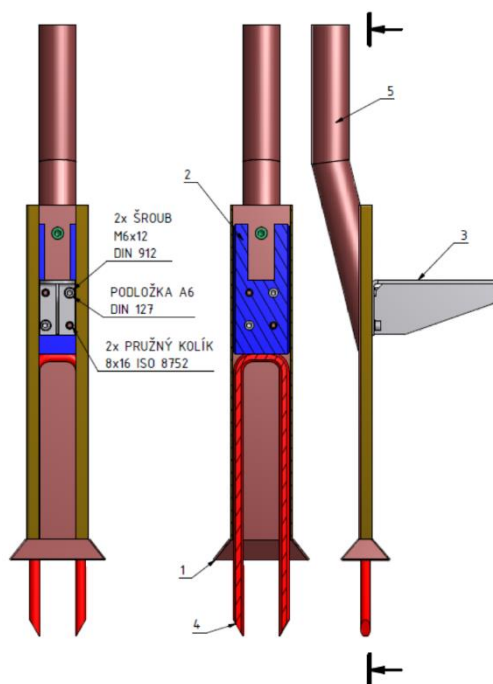
$$N_s = \frac{l}{a_s}, \quad (11)$$

a_s počet skob na 1 m² povrchu svahu

Pokud by i nadále nebylo možné zajistit stabilitu povrchové humózní vrstvy, pak bude třeba přistoupit k vyztužení této vrstvy pomocí výztužné geomříže umístěné na rozhraní mezi tělesem zemní konstrukce a povrchovou humózní vrstvou nebo využít geobuněk s výztužnými lanky. Návrh tahového prvku – geomříže, resp. lanka, bude proveden v souladu s ČSN EN 1997-3 (tato EN je dnes v přípravě, její publikace se předpokládá v srpnu 2024).

Pracovní postup kotvení – včetně aplikátoru

Při kotvení protierozních prvků přes humózní vrstvu k podkladu je třeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k poškození jak povrchového protierozního prvku, tak i vlastní humózní vrstvy. Je třeba minimalizovat přímý pohyb pracovníků po pokládaném protierozním prvkem, neboť i malé poškození, zejména v okolí instalovaných kotviček zásadně snižuje mez vytrhnutí kotveného materiálu. Práce by se měli provádět z dočasných konstrukcí, které umožní pohyb pracovníků bez nutnosti vstupovat na upravený povrch svahu, např. žebříky položené na svah. Vhodné je též použití aplikátoru kotevních prvků (Obrázek 6 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), který zajistí nejen kvalitní, ale i efektivní instalaci prvku. Aplikátor umožňuje využití celé váhy osoby, která s ním pracuje na aplikaci kotvičky a omezuje ohnutí kotvičky při aplikaci využitím zpevněného vedení kotvičky. Využití aplikátoru také zajistí práci ve vzpřímené poloze.



Obrázek 6: Schéma aplikátoru zemních kotviček (1) vodící lišta kotvičky, (2) vlastní uchycení kotvy, (3) nožní přitlačná plocha, (4) kotvička, (5) násada s možností zatloukání

Vzorová úloha č. 1 – Stabilita povrchové vrstvy

Zadání + vstupní parametry

Zjednodušená geometrie svahu

Výška svahu: 5 m

Sklon svahu: 1:1,75 $\Rightarrow \alpha = 29,74^\circ$

Délka svahu: 10,08 m

Tloušťka humózní vrstvy t : 0,15 m

Materiál humózní vrstvy: universální směs pro vytvoření nové vegetační vrstvy (od výrobce směsí)

Zemina zemního tělesa (zářezu): Jíl s vysokou plasticitou

Délka skoby L_s : 0,45 m

Průměr skoby d_s : 8 mm

Četnost skob a_s : 1 ks/m²

Podložka pod skobou velikosti 100 × 150 mm

Parametry humózní vrstvy uvažované do výpočtů:

objemová tíha $\gamma_{HV} = 17 \text{ kN/m}^3$

úhel vnitřního tření $\varphi_{HV} = 24^\circ$

soudržnost $c_{HV} = 1 \text{ kPa}$

součinitel pasivního zemního tlaku $K_{p,HV} = 2,37$

součinitel pasivního zemního tlaku $K_{p,c,HV} = 3,08$

stupeň nasycení $S_r = 1$

Parametry zemního tělesa uvažované do výpočtů:

objemová tíha $\gamma_{ZK} = 21 \text{ kN/m}^3$

úhel vnitřního tření $\varphi_{ZK} = 18^\circ$

soudržnost $c_{ZK} = 1 \text{ kPa}$

součinitel pasivního zemního tlaku $K_{p,ZK} = 1,89$

stupeň nasycení $S_r = 1$

Protierozní prvek:

3D geomatrace z PA tloušťky 10 mm

Tahová pevnost $T_M = 2 \text{ kN/m}$

Redukční součinitel – účinnost spolupůsobení geomatrace × skoba $K_M = 0,3$

Kontakt mezi zemní konstrukcí a humózní vrstvou:

Urovnaný výkop zářezového svahu bez dodatečného zdrsnění

úhel vnitřního tření na kontaktu $\delta = 17^\circ$

soudržnost na kontaktu $\alpha = 0,75 \text{ kPa}$

Výpočet + posouzení

Efektivní tíha humózní vrstvy

$$W_{ef} = t \cdot l \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w) = 0,15 \cdot 10,08 \cdot (17 - 1 \cdot 10) = 10,58 \text{ kN/m}$$

Totální tíha humózní vrstvy

$$W_u = t \cdot l \cdot \gamma_{HV} = 0,15 \cdot 10,08 \cdot 17 = 25,70 \text{ kN/m}$$

Normálová složka tíhy

$$N = W_{ef} \cdot \cos \alpha = 10,58 \cdot \cos 29,74^\circ = 9,19 \text{ kN/m}$$

Tangenciální složka tíhy

$$T = W_u \cdot \sin \alpha = 25,70 \cdot \sin 29,74^\circ = 12,75 \text{ kN/m}$$

Třecí síla mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí

$$S_k = N \cdot \tan \delta + l \cdot \alpha = 9,19 \cdot \tan 17^\circ + 10,08 \cdot 0,75 = 10,37 \text{ kN/m}$$

Odpor jedné skoby tvaru U na obtékání zeminou humózní vrstvy

$$\begin{aligned} S_s &= 2 \times 3 \cdot d_s \times \left(\frac{1}{2} \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w) \cdot t^2 \cdot K_{p,HV} + t \cdot c_{HV} \cdot K_{p,c,HV} \right) \\ &= 6 \cdot 0,008 \cdot (0,5 \cdot (17 - 1 \cdot 10) \cdot 0,15^2 \cdot 2,37 + 0,15 \cdot 1 \cdot 3,08) = 0,03 \text{ kN} \end{aligned}$$

Únosnost spoje mezi skobou a protierozním prvkem

$$S_{MS} = K_M \cdot T_M = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ kN}$$

Odpor jedné skoby tvaru U na prořezávání se zeminou zemní konstrukce

$$R_s = 2 \times 3 \cdot d_s \times \frac{1}{2} [(L_s - t)^2 \cdot (\gamma_{ZK} - S_r \cdot \gamma_w) + t \cdot L_s \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w)] \cdot K_{p,ZK}$$
$$= 6 \cdot 0,008 \cdot 0,5 \cdot ((0,45 - 0,15)^2 \cdot (21 - 1 \cdot 10) + 0,15 \cdot 0,45 \cdot (17 - 1 \cdot 10)) \cdot 1,89 = 0,07 \text{ kN}$$

Počet skob ve svahu

$$N_s = l/a_s = 10,08/1 = 10,08$$

Součinitel spolehlivosti konstrukce

$$\gamma_R = \frac{S_k + N_s \cdot \min(R_s; S_s + S_{MS}) + T_M}{T} = (10,37 + 10,08 \cdot \min(0,07; 0,6 + 0,03) + 2) / 12,75 = 1,03$$

$\gamma_R > 1,0 \Rightarrow$ humózní vrstva bude na svahu stabilní

Navrhování opatření pro zvýšení ochranného účinku proti vodní erozi

Povrchový odtok a s tím spojená eroze negativně ovlivňuje dlouhodobou životnost pozemních staveb, zejména odnosem humózní vrstvy povrchovým odtokem vody. Za kritický je možné považovat stav, kdy dochází k tvorbě erozních rýh, které vytvářejí trvalé preferenční proudění. Tvorba povrchového odtoku je zapříčiněna nejčastěji extrémní a intenzivní (přívalovou) srážkou. Cílem opatření je snížit nebo zamezit erozním škodám a podpořit růst vegetace a její trvalé zapojení a růst kořenů v co nejkratším čase. Kritická je především doba mezi realizací stavby a zapojením vegetace.

Erozní ohroženost

Erozní ohroženost, respektive vhodnost opatření proti erozi, je posuzována z hlediska maximálního tečného napětí, resp. maximální přípustné rychlosti. Při překročení limitních hodnot je porušena soudržnost povrchu a půdní částice jsou postupně uvolňovány a dochází ke zvýšené erozi a vzniku rýh. Metody výpočtu vycházejí ze zjednodušených přístupů hydrauliky a hydrologie.

Tečné napětí je v případě plošného odtoku vypočteno podle:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot i, \quad (12)$$

τ_0 tečné napětí [Pa],

γ měrná tíha ($\gamma = \rho \cdot g$, kde ρ je hustota látky, g je tíhové zrychlení) [N/m^3],

R hydraulický poloměr, v případě plošného odtoku průměrná výška hladiny,

i sklon [m/m].

Rychlost proudění při zjednodušení pomocí Manningova součinitele vychází v případě plošného odtoku z výpočtu průtoku v otevřených korytech:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \approx Q = \frac{1}{n} \cdot h^{3/2} \cdot i^{1/2}, \quad (13)$$

v rychlost proudění [m/s],

Q průtok [m^3/s],

A průřezový profil [m^2],

R hydraulický poloměr,
i sklon [m/m],
h výška hladiny [m],
n Manningův drsnostní součinitel.

V případě plošného odtoku jsou mocnitély u výšky hladiny a sklonu závislé na půdní textuře a od hodnoty pro otevřená koryta se mohou mírně lišit.

Aby nedocházelo ke zvýšené erozi a tvorbě rýh na holé půdě a nebo k poškození zvoleného technického opatření povrchu či vegetačního drnu, musí vypočtená hodnota tečného napětí nebo rychlosti být nižší než maximální přípustná hodnota pro daný povrch. Získání těchto veličin je možné několika metodami matematického modelování plošného odtoku. Zjednodušující přístup vychází z kinematického přístupu a bilanční rovnice. Základem pro posouzení je výpočet maximální výšky hladiny povrchového odtoku. Do výpočtu je nutné zahrnout procesy infiltrace (části srážky, která se vsákne do půdy), povrchové retence (části srážky, která zůstává na povrchu a nezúčastňuje se odtoku) a možný počáteční stav nasycení. Rychlost proudění dále ovlivňuje drsnost povrchu, pro její určení se nejčastěji využívá Manningův součinitel drsnosti. Vzhledem k řešení krátkých intenzivních epizod je možné zanedbat další složky bilance jako je výpar a případná transpirace rostlinami.

Pro výpočet je vhodné využít výpočet pomocí počítačového nástroje. I když se přesné způsoby výpočtu mohou v jednotlivých nástrojích lišit, základní principy musí být zachovány. K výpočtu jsou nutné následující vstupní údaje:

- morfologie území či sklonové poměry svahu,
- pedologické informace,
- informace o cílové vegetaci a využitých dočasných nebo trvalých technických opatřeních,
- zátěžové stavy formou návrhové srážky.

Vstupní data

Morfologie terénu, nebo tvar řešeného profilu

V případě přímých svahů je možné využít tzv. profilovou metodu, kde je svah nahrazen charakteristickým (kritickým) profilem. Profil lze získat geodetickým zaměřením. V případě možných konvergencí svahu a tím způsobené soustředění odtoku je profilová metoda nevhodná.

V charakteristickém profilu je výpočet uvažován na běžný metr. Objem odtoku nebo maximální průtok z celého svahu je vypočten z tzv. náhradní šířky svahu Sp :

$$Sp = \frac{\text{plocha svahu}}{\text{délka profilu}}, \quad (14)$$

V případě složitějších morfologických poměrů je základním vstupem digitální model terénu (DMT). U realizovaných staveb lze informace o svahu získat pomocí přesných metod, měřících na základě doby šíření pulsu laserového paprsku jako je LaserScan, LiDAR, případně model získaný na základě zpracování povrchu pomocí snímkování a zpracování pomocí metod SfM.

V případě posuzování v rámci projektové přípravy je možné modelovat navrhovaný svah. A to buď formou profilové metody anebo modelováním stavu terénu.

Pedologické údaje

Pro vyhodnocení infiltračních, retenčních, odtokových i erozních vlastností čerstvě konstruovaných svahů je třeba charakterizovat jednotlivé vrstvy půdního profilu (typicky podložní zeminu a ornici na povrchu) (ČSN EN ISO 25177, ČSN EN ISO 11074).

Mezi pedologické údaje, na jejichž základě je hydrologická i erozní odezva určována, patří:

- stratifikace půdního profilu, mocnost jednotlivých konstrukčních vrstev,
- zrnitostní složení skeletu ornice a podloží, lze využít zatřídění do půdních druhů dle klasifikací dle USDA (Soil Survey Division Staff, 1993) nebo Nováka (Kutílek, 1966) (ČSN EN ISO 11508),
- pórovitost, případně nasycená objemová vlhkost (m^3/m^3) (ČSN EN ISO 11461),
- objemová hmotnost (kg/m^3) (ČSN EN ISO 11272),
- nasycená hydraulická vodivost (m/s , cm/d) (ČSN EN ISO 22282-5).

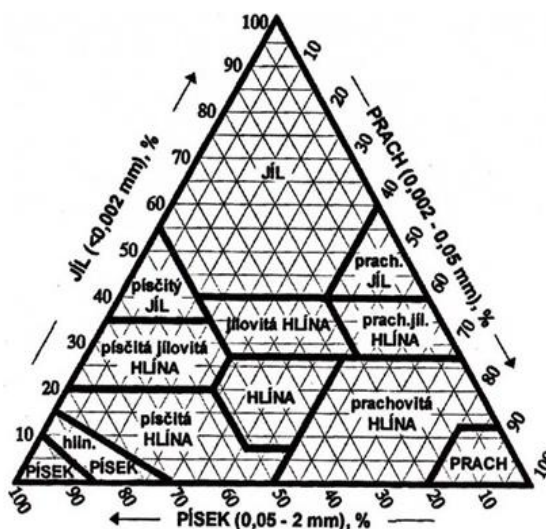
Pokud možno, preferujeme měřené údaje z analýz prováděných na konkrétních půdách a zeminách. Jsou-li měřená data neúplná, nebo zcela chybí, lze využít průměrných hodnot pro jednotlivé půdní typy (Schaap a kol. 2001, Børgesen a kol. 2006), které jsou uvedeny v Tab. 1. Je však třeba mít na paměti, že rozptyl hodnot jednotlivých charakteristik v rámci jednoho půdního typu může být velmi výrazný (závislost na aktuálním zhutnění, množství organické hmoty, chemizmu půdy, tvaru zrn apod.). Zejména tabelovaná nasycená hydraulická vodivost se může od skutečných hodnot velmi lišit a měla by být považována pouze za indikativní. Pro některé účely je vhodné stanovit i aktuální vlhkostní podmínky na svahu, případně retenční křivku (ČSN EN ISO 11276).

Pedologická klasifikace považuje zrna větší než 2 mm za skelet. Kdežto klasifikace zemin podle ČSN 73 1001 zatřídí zeminu do tří hlavních frakcí – šterkovité, písčité a jemnozrné, na základě zrnitostního složení (až do velikosti zrna 200 mm) a plasticity. Detailní postupy půdních rozborů jsou nad rámec této metodiky, a proto v textu odkazujeme na několik relevantních norem.

Do infiltračních modelů (např. Phillip, Green-Ampt, Richardsova rovnice) je nutné mimo parametrů příčinné (návrhové) srážky a hydraulických charakteristik půdy zadat i počáteční nasycení půdního povrchu. V Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty polní kapacity (včetně dopočítaného volného pórového objemu), které mohou být pro odhad počátečního nasycení využity. Polní kapacita odpovídá poměrně vlhkému půdnímu prostředí, která typicky nastává přibližně 2 až 3 dny po předchozí extrémní srážkové události (objemová vlhkost při sacím tlaku 33 kPa, ČSN EN ISO 11274).

Klasifikace půdních druhů podle Nováka dle podílu částic menších než 0,01 mm (%)		
0	10	Písčité
10	20	Hlinitopísčité
20	30	Písčitohlinité
30	45	Hlinité
45	60	Jílovitohlinité
60	75	Jílovité
Nad 75		Jíl

a.) Klasifikace podle Nováka



b.) USDA

Obrázek 7: pedologická klasifikace (a) Klasifikace podle Nováka (Kutílek, 1966) podle obsahu částic menších než 0. 01 mm, (b) klasifikace podle USDA podle obsahu jílu, prachu a písku (Soil Survey Division Staff, 1993)

Tabulka 1: Přibližné hodnoty makroskopických fyzikálních charakteristik pro jednotlivé půdní druhy

Půdní druh (Novák)	Půdní druh (USDA)	Reziduální objemová vlhkost	Nasycená objemová vlhkost	Vodní kapacita	Polní kapacita	Volná kapacita	Nasycená hydraulická vodivost
		(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm/d)
Jílovitá / Jíl	Jíl	0,098	0,459	0,361	0,347	0,112	14,8
	Písčitý jíl	0,079	0,442	0,363	0,27	0,172	8,2
Hlinitá	Hlína	0,061	0,399	0,338	0,165	0,234	12,1
Písčitá	Hlinitý písek	0,049	0,39	0,341	0,06	0,33	105,2
	Písek	0,053	0,375	0,322	0,046	0,329	642,7
Jílovitohlinitá	Hlinitý jíl	0,117	0,385	0,268	0,267	0,118	11,4
Písčitohlinitá	Písčitá jíl. hlína	0,063	0,384	0,321	0,169	0,215	13,2
Hlinitopísčitá	Písčitá hlína	0,039	0,387	0,348	0,085	0,302	38,3
	Prach	0,05	0,489	0,439	0,258	0,231	43,8
	Prach. jíl	0,111	0,481	0,37	0,337	0,144	9,6
	Prach. jíl. hlína	0,09	0,482	0,392	0,338	0,144	11,1
	Prach. hlína	0,065	0,439	0,374	0,24	0,199	18,2

Návrhová srážka

Stav počátečního nasycení závisí na zvoleném způsobu výpočtu. Pro získání celé návrhové srážky je nutné i vzhledem k postupným změnám klimatu využít co možná nejaktuálnější vstupní data. Mohou být použita data na základě měření nejbližší srážkoměrné stanice. Dále je možné využít statisticky odvozené krátkodobé deště. Za dostupné zdroje lze považovat portál chmi.cz, kde jsou staniční srážkoměrná data k dispozici.

Současná TP 53 uvádí patnáctiminutovou návrhovou intenzitu deště (Trupl, 1958) s dobou opakování dva roky. Jedná se o maximální hodnotu deště, který je součástí déletrvajících srážek. V tomto případě je doporučeno považovat stav povrchu za plně nasycený a simulovat tak pouze část nejintenzivnější části srážky. Dále je možné využít data z portálu rain.fsv.cvut.cz, na kterém jsou poskytována srážková data. Jednou ze služeb je webová aplikace, která poskytuje šestihodinové návrhové srážky pro jednotlivá povodí IV. řádu. Tato aplikace nabízí nejen celkový úhrn srážky pro různé doby opakování, ale také pravděpodobnost výskytu tvarů srážek. Vhodné je modelovat celou srážku. Při zjednodušení, kdy je za příčinou srážku uvažována bloková maximální intenzita je vhodné brát maximální intenzitu nejčastěji zastoupeného koncentrovaného tvaru A nebo B.

Návrh opatření

Samotný návrh opatření vychází z posouzení vypočteného tečného napětí (τ_0) a rychlosti (v) na konkrétním svahu, který musí být menší než kritické tečné napětí (τ_{crit}) nebo maximální přípustná rychlost (v_{crit}) pro daný způsob ochrany.

$$\tau_{crit} > \tau_0$$

$$v_{crit} > v \approx \frac{1}{n} h^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

Pro jednotlivé skupiny technických materiálů jsou orientační hodnoty uvedeny v příloze č. 1. Pro konkrétní vybrané materiály jsou relevantní parametry dané výrobcem. V případě instalace dočasné ochrany například pomocí přírodních materiálů musí být zajištěna a prokázána trvalá ochrana vegetací. Minimální hodnoty kritického tečného napětí a rychlosti pro travní směsi by měl uvádět její dodavatel pro konkrétní zeminu. Hodnoty kritické rychlosti pro vzrostlou vegetaci se pohybují od 0,95 do 2 m/s

Zjednodušené výpočty pomocí profilové metody předpokládají izolovaný přímý svah. Předpokládá se tak, že (a) v případě konstrukcí v náspu je vozovka odvodněna pomocí odvodňovacích příkopů, (b) v případě zářezů je svah na horní straně vybaven příkopem a voda z okolí je tak odváděna mimo svah. V případě velmi jednoduchých svahů je možné využít tabelární řešení. Pro výpočet je vhodné využít vhodný výpočetní nástroj. Pro podmínky ČR je možné pro výpočet využít „SMODERP Line“, který slouží pro navrhování opatření a získání charakteristik odtoku z přímých svahů. Model je dostupný jako webová služba na adrese smoderp.fsv.cvut.cz. Pro přímé svahy, kratší než 20 m je možné využít tabelární řešení, vzor tohoto řešení je také umístěn na stránce smoderp.fsv.cvut.cz.

V případě, že svah není na horní hraně chráněn a je nutné do výpočtu zahrnout i vodu z přispívající zdrojové plochy příslušného povodí, je pak pro řešení úlohy vhodné použít plně distribuovaný výpočet pracující s prostorovými vazbami nad digitálním modelem terénu. Může se jednat o upravené hydrologické modely jako je WEPP (Laflen, 1997) anebo SMODERP 2D (Kavka, 2012) a další. Zvolený model musí obsahovat komponentu povrchového odtoku včetně výpočtu rychlostí a tečných napětí, aby byl model schopen vypočítat odtok vody z přispívající zdrojové plochy a při řešení svahu bylo možné posuzovat vypočtené tečné napětí a rychlosti s limitními.

Výpočet charakteristik odtoku

Při vhodně zvoleném nástroji poskytuje model SMODERP kromě posouzení vhodného opatření také charakteristiky odtoku (maximální průtok, objem odtoku, případně tvar hydrogramu). V současné době je v metodikách TP 53 a TP 83 pro výpočet maximálního průtoku využíván intenzitní vzorec. Z hlediska navazujících návrhů odvodňovacích a záchytných prvků je intenzitní metoda nedostačující.

Vzorová úloha č. 2.: Zjednodušené určení erozního ohrožení z 15minutového deště na přímém svahu.

Jedná se o zjednodušený výpočet, kdy se předpokládá, že maximální intenzita deště přichází do plně nasyceného profilu s již vyčerpanou povrchovou retencí potenciálním zadržením vody ve zvoleném opatření. Což odpovídá situaci, kdy je hodnocena maximální intenzita celé srážky. Infiltrace do půdního profilu je dána pouze nasycenou hydraulickou vodivostí. Výpočet nepředpokládá sycení pouze humózní vrstvy, ale propustné podloží se stejnou nebo vyšší hydraulickou vodivostí.

Popis lokality:

Popice u Hustopečí

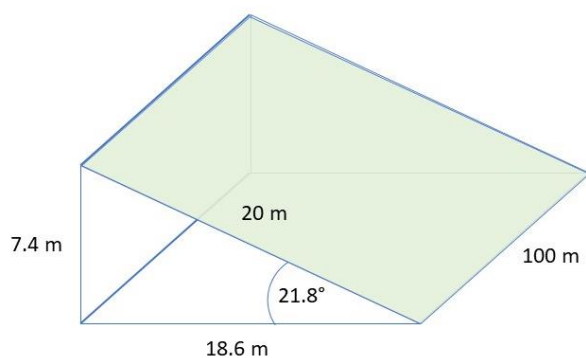
Povodí IV řádu č. 4-17-01-0020

Délka svahu 20 m

Průmět 18.6 m

Sklon 1:2.5 (= 21.8°)

Šířka svahu 100 m



Obrázek 8: Schéma řešené plochy

Půda:

Jílovitohlinitá (klasifikace podle Nováka)

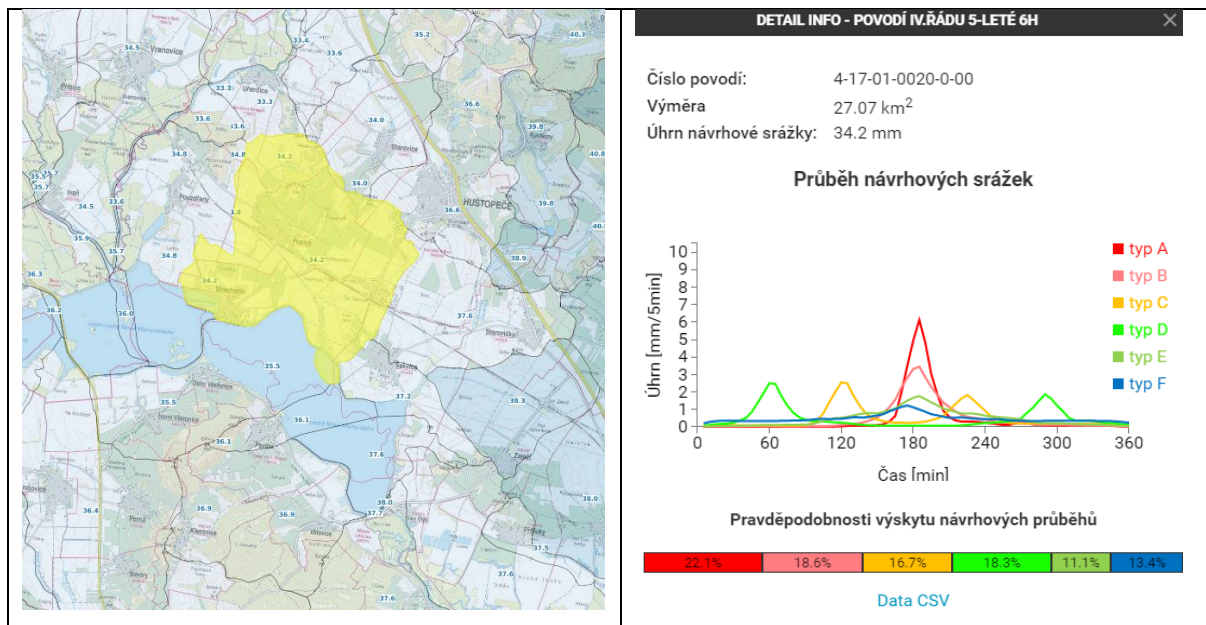
$$K_s = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$\tau_{crit} = 11.5 \text{ Pa}$$

$$v_{crit} = 0.264 \text{ m/s}$$

Srážková data:

Úhrn 6 h srážky doba opakování 5 let – 34.2 mm, zdroj: rain.fsv.cvut.cz



Obrázek 9: Výběr návrhové srážky – povodí číslo: 4-17-01-0020-0-00 (zdroj rain.fsv.cvut.cz)

Za převažující je možné považovat koncentrované srážky. Tvary A (22.1 %) a B (18.6 %). Úhrn 15minutového deště z úhrnu šestihodinové srážky typu A tvoří 49 % z celkového úhrnu -> což odpovídá úhrnu 16.69 mm/15 min

Výpočet charakteristik odtoku

Výpočet průběhu odtoku tabelárně po časových krocích 1 s (vlastní tabelární výpočet je součástí příloh). Ve výpočtu je bilancována výška hladiny jako rozdíl srážky a infiltrace se započtením výšky hladiny z předchozího časového kroku. Výpočet předpokládá, že k povrchovému odtoku nedojde dříve než během simulované části srážky, která neodteče v předchozím časovém kroku. Výpočet probíhá pro běžný metr (Q'), pro celou šířku řešeného svahu je vypočtený průtok a objem odtoku přenásoben náhradní šířkou svahu. Stabilita z hlediska tečného napětí a rychlostí není šířkou svahu ovlivněna.

$$Q' = \frac{1}{n} \cdot h^{3/2} \cdot i^{1/2}$$

Q' průtok [$m^3/s/m$]
 h výška hladiny [m]
 i sklon svahu [m/m]
 n drsnostní součinitel podle Maninnga

Tečné napětí je v případě plošného odtoku vypočteno podle rovnice:

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot i$$

τ_0 tečné napětí [Pa]
 ρ hustota látky (pro vodu 1000 kg/m³)
 g tíhové zrychlení (9,81 m/s²)
 h výška hladiny [m]
 i sklon [m/m]

Rychlost proudění ze vztahu pro plošný odtok:

$$v = \frac{Q}{h}$$

v rychlost proudění [m/s]
 Q průtok [m^3/s]
 h výška hladiny [m]

	maximální průtok	maximální výška hladiny	celkový odtok	maximální napětí	Maximální rychlost
min	m ³ /s	mm	m ³	Pa	m/s
15	0,0087	2,87	7,33	0,073	0,305

$v_{crit} = 0.26 < 0.305 = v \Rightarrow$ **nevyhovuje z hlediska rychlosti**

$\tau_{crit} = 11.5 \text{ Pa} > 0.073 \tau_0 \Rightarrow$ **vyhovuje z hlediska tečného napětí**

Návrh opatření

Využit ochranného opatření z přírodních vláken $v_{crit} = 1.15 \text{ m/s} > v = 0.305 \text{ m/s}$.

Vzorová úloha č. 3: Určení erozního ohrožení a návrh opatření na vzorovém náspu

Jedná se modelový příklad výpočtu náspu dle VZOROVÉHO LISTU STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ – VL 2 - SILNIČNÍ TĚLESO. Jedná se o výpočet se svahem se třemi různými sklony. Jako návrhová srážka byla zvolena šestihodinová srážka podle lokality s dobou opakování 5 let z portálu (rain.fsv.cvut.cz). Byl vybrán převažující tvar návrhové srážky, v kterém se předpokládá, že většina srážky spadne během

doby kratší než dvě hodiny. Scénář předpokládá stav nasycení odpovídající polní kapacitě. Tento stav odpovídá situaci konvektivní (přívalové srážky) do běžně nasyceného půdního profilu. Pro výpočet byla využita profilová verze modelu SMODERP. Příklad odpovídá využití software „SMODERP Line“ – smoderp.fsv.cvut.cz

Popis lokality:

KÚ Krtěnov u Olešnice

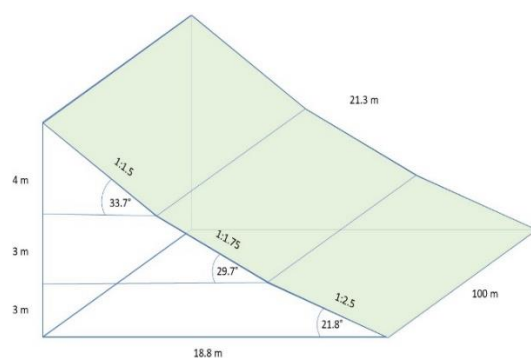
Povodí IV řádu č. 4-15-01-0520-0-00

Délka svahu 21.3 m

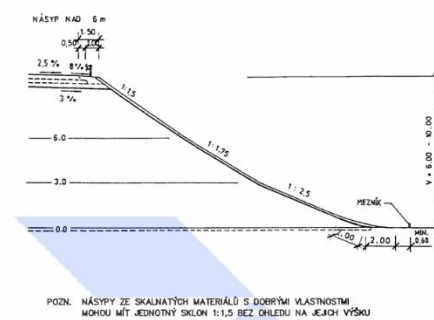
Průmět 18.8 m

Sklon 1:2.5 (= 21.8°), 1:1.75 (= 29.7°), 1:1.5 (= 33.7°)

Šířka svahu 100 m



a.) 3D – vizualizace



b.) vzorový řez zdroj (pjpk.cz - VL – 2, 1995)

Obrázek 10: Schéma řešené plochy

Půda:

Jílovitohlinitá (klasifikace podle Nováka)

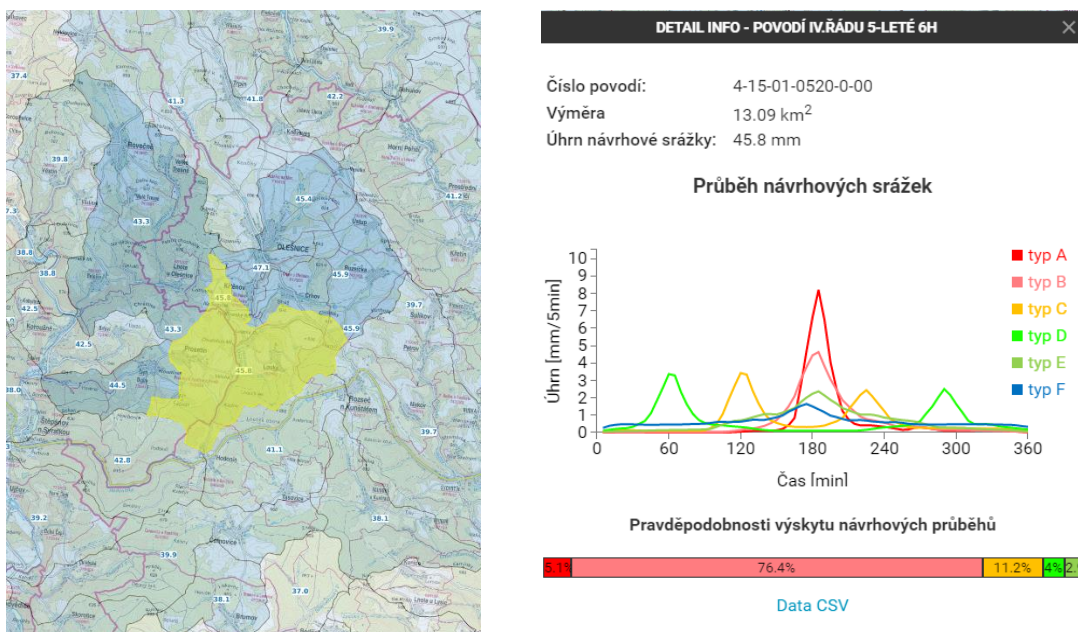
$$K_s = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$\tau_{\text{crit}} = 11.5 \text{ Pa}$$

$$v_{\text{crit}} = 0.264 \text{ m/s}$$

Srážková data:

Úhrn srážky šestihodinové srážky 45.8 mm/6 hod. Pro řešení byl zvolen převažující tvar srážky B



Obrázek 11: Výběr návrhové srážky – povodí číslo: 4-15-01-0520-0-00 (zdroj rain.fsv.cvut.cz)

Řešený svah je uvažován jako přímý. Výpočet je řešen v jednom příčném řezu. Do modelu jsou vloženy tři úseky s odpovídajícím průmětem a převýšením. Svah byl rozdělen do metrových úseků. Pro stav holé půdy je povrch uvažován s povrchovou retencí 0,5 mm a drsnostním součinitelem $N = 0,025$.

Č. úseku	vodorovná délka	převýšení	sklon	opatření	půda
1	6	4	1:1.5	-	jílovitohlinitá
2	5.25	3	1:1.75	-	jílovitohlinitá
3	7.5	3	1:2.5	-	jílovitohlinitá

Kombinaci jílovitohlinité půdy a povrchu bez opatření odpovídají tyto průměrné charakteristiky:

Ks	S	N	τ_{crit}	v_{crit}	povrchová retence
0.000003666	0.000077459	0.035	11.5	0.264	0.5

Samotný výpočet probíhá v prostředí SMODERP. Výsledkem řešení je jak určení ohroženosti v profilu svahu na základě porovnání vypočteného maximálního tečného napětí a maximální rychlosti, tak průběh odtoku v závěrovém profilu (viz obrázek).

Z výsledků vyplývá, že je nutné svah proti vodní erozi chránit téměř v celé délce řešeného svahu.



Obrázek 12: grafický výstup výpočtu maximální rychlosti. Ohrožená část vyznačena červeně

Na všechny tři úseky bude použito pro ochranu povrchu pomocí sítě z přírodních vláken s minimální gramáží 300 g/m², maximální přípustná rychlost 1,15 m/s (viz příloha č. 1)

Navržené opatření

Č. úseku	vodorovná délka	převýšení	sklon	opatření	půda
1	6	4	1:1.5	Přírodní vlákno min 300 g/m ²	jílovitohlinitá
2	5.25	3	1:1.75		jílovitohlinitá
3	7.5	3	1:2.5		jílovitohlinitá

Srovnání novosti postupů

Výpočet stability humózní vrstvy na podloží není v současné době obsažena v žádné relevantní TP (např. TP 97 ani TP 53). Návrh na zachycení veškerých destabilizujících sil z povrchové vrstvy pomocí výztužného prvku je uveden v nově připravované EN 1997-3, která by měla být v anglickém originále publikována v srpnu 2024. Z hlediska erozního ohrožení metodika přináší inovativní řešení. Na zemědělské půdě je nejčastěji využíváno řešení pomocí Univerzální rovnice ztráty půdy USLE (Wishmeier, 1978), respektive modernizované tzv. – RUSLE (Renard, 1991) a toto řešení se propaguje i do oblastí mimo její platnosti (z hlediska sklonů a možného koncentrovaného odtoku). Tato empirická metoda používaná na zemědělské půdě předpokládá výpočet dlouhodobé průměrné ztráty půdy a byla odvozena na mírných svazích bez tvorby erozních rýh. Z těchto důvodů jsou řešení erozního ohrožení na základě této metody nevhodná. Zvolené řešení pomocí fyzikálního přístupu modelování epizodní události na základě popisu procesů infiltrace, retence a povrchového odtoku s cílem určit erozní ohrožení a potenciál vzniku erozních rýh na základě překročení nevymílacích sil, lépe postihuje problematiku eroze. Navíc takto pojaté řešení může sloužit nejen ke kvantifikaci eroze, ale také pro určení kulminačních průtoků a objemu odtoku a může tak zpřesnit dimenzování odváděcích prvků. Metodika také předpokládá využití nejnovějších veřejně dostupných srážkových dat poskytovaných na portálu rain.fsv.cvut.cz. Na odvození těchto dat se podíleli členové řešitelského kolektivu ČVUT v Praze. Zde jsou poskytována data šestihodinových srážek včetně pravděpodobnosti výskytu jednotlivých tvarů. Z těch je možné odvodit kratší extrémní hodnoty srážek. V současně běžícím projektu budou tato data nadále zpřesňována.

Popis uplatnění certifikované metodiky

Tato metodika najde své uplatnění při navrhování konstrukcí náspů a příkopů podél liniových staveb. Přesah může mít i do stavebnictví, tam kde se budou řešit terénní úpravy vyžadující trvalou anebo dočasnou ochranu povrchu před negativními účinky deště (vodní eroze a stabilita humózní vrstvy). Dále je možné principy řešení uplatnit také u vodních staveb, u kterých bude docházet k úpravě koryt

vodních toků. V případě vodního hospodářství je ochrana důležitá navíc i s ohledem na fakt, že případné škody přímo ovlivňují kvalitu vody, zatím co u dopravních staveb může být část sedimentu zachycena v sedimentačních jámkách. Metodika poskytuje návod na řešení protierozní problematiky na uměle vytvořených svazích, které není možné řešit principem dlouhodobé průměrné ztráty půdy založeným na USLE. Potenciálními uživateli jsou projektanti liniových staveb, ale své uživatele najde i v oblasti vodního hospodářství a pozemního stavitelství.

Metodika dále přináší způsob navrhování stability a technologického postupu kotvení humózní vrstvy s ohledem na její možné usmýknutí vlivem jejího nasycení.

Tato publikace je v tištěné podobě vydána v omezeném nákladu. Odborné veřejnosti bude nabídnuta online formou na stránkách řešitelů. Metodika bude poskytnuta jako podklad pro výuku odborným vysokým a středním školám v oblasti vodního hospodářství a krajinného inženýrství.

Metodika je koncipována pro řešení dílčí části nutné pro návrh opatření na svazích pozemních komunikací, tak jak je uvedena v TP 53 a dalších souvisejících dokumentech.

Ekonomické aspekty

Snahou předkládané metodiky je minimalizace nákladů spojených s projektovou přípravou a variantním řešením během předprojektové fáze. Pro zavedení této metodiky nejsou nutné žádné další přímé investice na straně projektantů. Snahou autorů je odborné veřejnosti poskytnout návody na určení erozního ohrožení a stability umělých zemních konstrukcí. Metodika doplňuje již zavedený standard TP 53 před nová a jinak obtížně získatelná data. Uplatnění této metodiky spočívá také ve zefektivnění vlastního procesu návrhu a projektování. Metodika poskytuje kvalitnější podklady a návody, které umožní efektivnější a účinnější návrh opatření v krajině. Tuto úsporu nelze reálně finančně ohodnotit. Celková úspora je závislá na počtu realizovaných projektů.

Mezi obtížně vyčíslitelné aspekty patří environmentální hledisko dopadů stavby na životní prostředí. Díky zavedení postupů uvedených v metodice bude zajištěna ochrana okolních staveb a ekosystémů před vnosem látek. Metodika je zacílena na problematiku stability povrchové vrstvy zemních konstrukcí a jejich protierozní ochranu.

Metodika poskytuje kvalitnější podklady a návody, které umožní efektivnější a účinnější návrh opatření šetrnější k životnímu prostředí. Tuto úsporu nelze reálně finančně ohodnotit. Celková úspora je závislá na počtu realizovaných projektů. Kvalitní návrh pak umožní lepší funkci daného opatření a zároveň sníží možné škody na vlastní konstrukci a okolí způsobené nevhodným návrhem. Všechny tyto benefity jsou zřejmé, ale jejich ekonomické vyčíslení by nutně vedlo k příliš hrubým a nejistým odhadům.

Autoři se soustředili také na zdroje vstupních dat a výběr nástrojů, které nevyžadují další investice.

Seznam použité a související literatury

Odkazy na relevantní předpisy

Protierozní opatření na svazích pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Brno. TP 53/2003.

Odvodnění pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Praha. TP 83/2014.

Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Praha. TP 97/2008.

ČSN EN 14899 Charakterizace odpadů – Vzorkování odpadů – Zásady přípravy programu vzorkování a jeho použití

TNV 75 4102 Pedologický průzkum pro meliorační opatření

ČSN EN ISO 25177 - Kvalita půdy – Popis půdy v terénu

ČSN EN ISO 11461 - Kvalita půdy – Stanovení objemové vlhkosti půdy s použitím odběrných válečků – Gravimetrická metoda

ČSN EN ISO 11276 - Kvalita půdy – Stanovení pórového tlaku půdní vody – Tenzometrická metoda

ČSN EN ISO 11508 - Kvalita půdy – Stanovení hustoty částic

ČSN EN ISO 11074 - Kvalita půdy – Slovník

ČSN ISO 11464 - Kvalita půdy – Úprava vzorků pro fyzikálně-chemické rozbor

ČSN EN ISO 11272 - Kvalita půdy – Stanovení objemové hmotnosti po vysušení

ČSN EN ISO 12404 - Kvalita půdy – Návod pro výběr a použití screeningových metod

ČSN EN ISO 22282-5 - Geotechnický průzkum a zkoušení – Hydrotechnické zkoušky – Část 5: Vsakovací zkoušky

ČSN EN ISO 11274 - Kvalita půdy – Stanovení retenčních vlhkostních charakteristik – Laboratorní metody

Ostatní literatura

Børgesen, C.D.; Jacobsen, O.H.; Hansen, S.; Schaap, M.G. (2006). Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model. *J. Hydrol.*, 324, 40–50.

Kavka, P., Vrána K., & Dostál, T. (2012). Predikce erozního ohrožení a návrh protierozních opatření v modelu SMODERP. IX. International Scientific Conference FCE TUKE.

Kutílek, M. Vodohospodářská pedologie. Praha. 1966. SNTL

Laflen, J. M., Elliot, W. J., Flanagan, D. C., Meyer, C. R., & Nearing, M. A. (1997). WEPP Predicting water erosion using a process-based model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 52(2), 96–102.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1), 30–33.

Schaap, M.G.; Leij, F.J.; van Genuchten M.T. (2001). rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251, 163–176.

Soil Survey Division Staff (1993). Soil survey manual. United States Department of Agriculture. pp. 63–65. Retrieved 30 August 2014.

Trupl J. (1958). Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. Praha: VÚV Praha.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning, (Handbook No.537).

Seznam publikací které předcházely metodice

KAVKA, P. et al. Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact. In: XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Reykjavík, Iceland. The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Reykjavik Iceland, Reykjavik, 2019-09-01/2019-09-06. Reykjavik: University of Iceland, 2019. ISBN 978-9935-9436-1-3. DOI 10.32075/17ECSMGE-2019-392.

KAVKA, P. et al. Effect of rainfall intensity and energy on the protective technical measures under heavy storm. In: PELEG, N. a P. MOLNAR, eds. Rainfall monitoring, modelling and forecasting in urban environments.

UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Conference Proceedings. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Pontresina, 2018-12-05/2018-12-07. Zurich: ETH Zurich, 2019. s. 53-54. DOI 10.3929/ethz-b-000347539. Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000347539>

KAVKA, P. et al. Experimental evaluation of the effect of the protective technical measures against rill erosion. In: Terra envision 2018. terra envision, Barcelona, 2018-01-27/2018-02-02. Terra envision, 2018. s. 128.

KAVKA, P. et al. Experimental Setup for Evaluation of the Protective Technical Measures Against the Slopes Degradation Along Linear Construction Sites. In: Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, 2017-04-23/2017-04-28. Göttingen: Copernicus GmbH, 2017. EGU General Assembly 2017. sv. 19. ISSN 1607-7962.

KAVKA, P. et al. How we the can measure impact of artificial protection on slopes of linear structures to the connection with surroundings. In: EGU General Assembly 2018. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

KAVKA, P. et al. Posuzování účinnosti ochranných technologií před účinky eroze na strmých svazích. In: BÁČOVÁ, M. a P. KAVKA, eds. Sborník abstraktů konference Hydrologie, GIS a životní prostředí 2018. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. s. 21. ISBN 978-80-01-06432-0.

KUBÍNOVÁ, R. et al. Particle and aggregates size distribution of soil transported due to rainsplash, surface runoff and rill erosion. In: AGU100 - Fall Meeting 2019. San Francisco, 2019-12-09/2019-12-13. Baltimore: AGU, 2019.

KUBÍNOVÁ, R. Zrnitostní složení rýhové eroze. Datum obhajoby 2019-06-26. Diplomová práce. ČVUT FSV. Katedra hydromeliorekce a krajinného inženýrství.

LABURDA, T. et al. Close-range photogrammetric measurement of the splash and rill soil erosion. In: EGU General Assembly 2019. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-15246.pdf>

LABURDA, T. et al. Protecting Steep Slopes Against Soil Erosion: Geotextiles and its Effectiveness Under Heavy Rainfall. In: AGU100 - Fall Meeting 2019. San Francisco, 2019-12-09/2019-12-13. Baltimore: AGU, 2019.

LABURDA, T. et al. Sledování plošné a rýhové eroze na strmých svazích pomocí fotogrammetrie. In: TEJKL, A., M. BÁČOVÁ a P. KAVKA, eds. SBORNÍK ABSTRAKTŮ KONFERENCE HYDROLOGIE, GIS A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 2019. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. s. 8. 1. ISBN 978-80-01-06591-4.

NEUMANN, M. et al. Soil particle size distribution in surface runoff under artificial rainfall. In: EGU General Assembly 2019. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-10961-1.pdf>

TEJKL, A. et al. Research of technical measures for artificial slopes stabilization and soil erosion prevention. In: EGU General Assembly 2019. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-17555-2.pdf>

VANÍČEK, M. et al. Efficiency of erosion prevention geosynthetics for nonvegetated slopes during extreme artificial rainfalls testing. In: XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Reykjavík, Iceland. The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Reykjavik Iceland, Reykjavik, 2019-09-01/2019-09-06. Reykjavik: University of Iceland, 2019. ISBN 978-9935-9436-1-3. DOI 10.32075/17ECSMGE-2019-0121. Dostupné z: <https://www.ecsmge-2019.com/uploads/2/1/7/9/21790806/proceedings-v1a.pdf>

ZUMR, D., J. GOMÉZ a G. GUZMÁN. Monitoring of the vertical distribution of the magnetite tracer in a shallow soil profile. In: EGU General Assembly 2018. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

Přílohy

Příloha č. 1 - Průměrné hodnoty kritického tečného napětí a maximální rychlosti pro skupiny geosyntetik.

Třída opatření	Popis	typ geotextilie	Materiál	Maximální tečné napětí [Pa] bez vegetace	Maximální rychlost [m/s] proudění bez vegetace	Tloušťka [mm]	Hmotnost [g/m2]	životnost materiálu [měsíce]	Napětí v tahu [kN/m]
Dočasná	Textilie z mixu přírodních a rychle se rozpadajících umělých vláken	textilie	Plastová vlákna, přírodní vlákna	48	1.15	0.8	70	12	1.80
Dočasná	Sít z mixu přírodních a rychle se rozpadajících umělých vláken	sít	PE, přírodní vlákna	72	1.44	6.0	dle gramáže	12 (36)	0.90
Dočasná	Textilie z mixu přírodních a rychle se rozpadajících umělých vláken	textilie	PE, přírodní vlákna	96	1.92	7.6	373	18	1.50
Dočasná	Netkaná textilie	textilie	Plastová vlákna	96	1.92	9.6	271	36	1.50
Dočasná	Pletená textilie	textilie	Plastová vlákna	108	2.16	7.6	678	36	1.50
Dočasná	3D matrace v sendviči z umělých vláken	sendvič	Plastová vlákna	108	2.20	8.9	271	36	1.50
Dočasná	Rohož z kokosových nebo jutových vláken v kokosovém nebo jutovém sendviči	sendvič	Přírodní vlákna	112	3.00	21.0	700	24	1.56
Trvalá	3D matrace	3D matrace	Plastová vlákna	96	1.90	6.4	271		43.80
Trvalá	3D matrace vyplněná drobný štěrčkem spojeným asfaltem	3D matrace	PA	216	1.15	22.0	20		3.00
Trvalá	geomříž plochá	sít	PET	od 2520	1.63	5.0	od 490		od 35
Trvalá	3D matrace	3D matrace	PA	240	3.00	6.3	150		1.80
Trvalá	trvalá výztuž dmu	sít	Plastová vlákna	480	3.20	28.8	960		2.55
Trvalá	PP geobuňka v PP sendviči	sendvič	PP	191	3.80	357.2	11905		2.65
Trvalá	3D matrace spojená s výztužným prvkem	3D matrace	PA	960	6.10	5.0	185		13.30
Trvalá	geomříž s prostorově uspořádaný příčnými vlákny (vlhami)	sít	PET	od 5760	od 3.74	5.0	od 490.0		od 20

Dočasná

Trvalá

životnost pod 36 měsíců, po uplynutí životnosti protierozní funkci přebírá zeleň geosyntetika na bázi juty mají životnost cca 12 měsíců

geosyntetika na bázi kokosových vláken mají životnost cca 36 měsíců

životnost materiálu po odbu životnosti stavby, případně zeleň má pouze estetickou funkci

Příloha č. 2 - Tabelární výpočet zjednodušeného svahu

	Celkový čas	srážka(m)	infiltrace (m)	balance objemů	výška hladiny	Q	rychlost	objem odtoku	objem zbytek	Napětí	suma odtoku
s	s	m	m		m	m ³ /s	m/s	m ³	m ³	Pa	m ³
1	1	0.000005	0.00000025	8.77222E-05	4.4E-06	1.7E-07	0.038	1.7E-07	8.8E-05	0.02	0.0000
1	2	0.000005	0.00000025	0.000175278	8.8E-06	4.7E-07	0.053	4.7E-07	1.7E-04	0.03	0.0000
1	3	0.000005	0.00000025	0.000262532	1.3E-05	8.6E-07	0.065	8.6E-07	2.6E-04	0.05	0.0000
1	4	0.000005	0.00000025	0.000349395	1.7E-05	1.3E-06	0.076	1.3E-06	3.5E-04	0.07	0.0000
1	5	0.000005	0.00000025	0.000435797	2.2E-05	2E-06	0.084	1.8E-06	4.3E-04	0.09	0.0000
1	6	0.000005	0.00000025	0.000521682	2.6E-05	2.4E-06	0.092	2.4E-06	5.2E-04	0.10	0.0000
1	7	0.000005	0.00000025	0.000606997	3.0E-05	3.0E-06	0.100	3.0E-06	6.0E-04	0.12	0.0000
1	8	0.000005	0.00000025	0.000691698	3.5E-05	3.7E-06	0.106	3.7E-06	6.9E-04	0.14	0.0000
1	9	0.000005	0.00000025	0.000775744	3.9E-05	4.4E-06	0.113	4.4E-06	7.7E-04	0.15	0.0000
1	40	0.000005	0.00000025	0.002953123	1.5E-04	3.2E-05	0.220	3.2E-05	2.9E-03	0.58	0.0006
1	41	0.000005	0.00000025	0.003008424	1.5E-04	3.3E-05	0.222	3.3E-05	3.0E-03	0.59	0.0006
1	42	0.000005	0.00000025	0.003062809	1.5E-04	3.4E-05	0.224	3.4E-05	3.0E-03	0.60	0.0007
1	73	0.000005	0.00000025	0.004342478	2.2E-04	5.8E-05	0.266	5.8E-05	4.3E-03	0.85	0.0021
1	74	0.000005	0.00000025	0.004372387	2.2E-04	5.8E-05	0.267	5.8E-05	4.3E-03	0.86	0.0022
1	75	0.000005	0.00000025	0.004401699	2.2E-04	5.9E-05	0.268	5.9E-05	4.3E-03	0.86	0.0022
1	76	0.000005	0.00000025	0.004430421	2.2E-04	6.0E-05	0.269	6.0E-05	4.4E-03	0.87	0.0023
1	77	0.000005	0.00000025	0.004458566	2.2E-04	6.0E-05	0.270	6.0E-05	4.4E-03	0.87	0.0024
1	897	0.000005	0.00000025	0.005734054	2.9E-04	8.8E-05	0.306	8.8E-05	5.6E-03	1.12	0.0730
1	898	0.000005	0.00000025	0.005734054	2.9E-04	8.8E-05	0.306	8.8E-05	5.6E-03	1.12	0.0731
1	899	0.000005	0.00000025	0.005734054	2.9E-04	8.8E-05	0.306	8.8E-05	5.6E-03	1.12	0.0732
1	900	0.000005	0.00000025	0.005734054	2.9E-04	8.8E-05	0.306	8.8E-05	5.6E-03	1.12	0.0733