

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM POHYBŮ HUMÓZNÍ VRSTVY SVAHŮ LINIOVÝCH STAVEB PŘI UMĚLÉM ZADEŠTĚNÍ POMOCÍ VLÁKNOVÉ OPTICKÝCH SENZORŮ

Experimental monitoring of upper soil-layer stability on linear-infrastructure slopes using
rainfall simulation and fibre-optic sensors

Petr Kavka¹, Martin Neumann¹, Tomáš Laburda¹, Adam Tejkl¹, Matěj Komanec², Radek Nesnídal²,
Dušan Dufka³, Aleš Kulháněk³, Vlastimil Mužík⁴

¹ Fakulta stavební ČVUT v Praze; ² Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze; ³ STRIX Chomutov, a.s.; ⁴ INSET
s.r.o.; kontaktní e-mail: [petr.kavka@fsv.cvut.cz]

Abstrakt: Příspěvek představuje experimentální část projektu zaměřeného na prevenci poruch svrchních humózních vrstev svahů liniových staveb pomocí vláknové optických senzorů. Cílem je představit metody testování chování humózní vrstvy náspů a zářezů při dešťových událostech a postupném sycení vodou a vývoj systému detekce deformací předcházejících mělkým svahovým pohybům. Základem systému jsou kalibrované senzorické lamely s vláknovými Braggovými mřížkami (FBG), které převádějí lokální posun a ohyb půdní vrstvy na změnu Braggovy vlnové délky.

Laboratorní ověření probíhalo na dešťovém simulátoru ČVUT s plochou 1×4 m. Půdní profil byl zatěžován srážkou nízké intenzity tak, aby docházelo k postupnému sycení bez výrazného povrchového odtoku a eroze. Odezva lamel byla porovnáována s fotogrammetrickým měřením povrchu. FBG senzory jsou schopny zaznamenat milimetrové deformace při jednotlivých srážkových událostech, včetně změn obtížně zachytitelných srovnávacími fotogrammetrickými metodami.

V podmínkách blízkých reálným stavbám jsou ověřovací experimenty prováděny na experimentálních plochách v Jirkově ve třech sklonech 22° , 30° a 34° na plochách 4×2 m vybavených stacionárními dešťovými simulátory a doplňkovým hydrometeorologickým monitoringem. Výsledky slouží k návrhu uložení a kotvení lamel a ke stanovení prahových stavů porušení svrchní vrstvy svahu.

Klíčová slova: liniové stavby, mělké svahové pohyby, dešťový simulátor, vláknové Braggovy mřížky, fotogrammetrie

Abstract: The paper presents the experimental part of a project focused on preventing failures of the upper soil layers of linear-infrastructure slopes using fibre-optic sensors. It investigates the behaviour of the humic layer of embankment and cut slopes during water saturation and assesses the possibility of detecting deformation preceding shallow slope movements.

The monitoring system is based on calibrated sensing lamellae with fibre Bragg gratings, which convert local soil-layer displacement and bending into a shift of the Bragg wavelength.

Laboratory verification was performed on the CTU rainfall simulator with a 1×4 m plot. Low-intensity rainfall was used to gradually saturate the soil profile without generating substantial surface runoff or erosion. Lamella response was compared with photogrammetric surface measurements.

The FBG sensors detected millimetre-scale deformation during individual rainfall events, including changes unresolved by photogrammetry, and recorded partial relaxation during drying. Outdoor verification continues in Jirkov in three containers with slopes of 22° , 30° and 34° , equipped with stationary rainfall simulators and supplementary hydroclimatic monitoring. The results support the design of lamella placement and anchoring and the definition of threshold states for failure of the upper slope layer.

Key words: linear infrastructure, shallow slope movement, rainfall simulator, fibre Bragg grating, photogrammetry

1. Úvod

Výstavba rychlostních komunikací a železničních tratí vyžaduje budování svahů násypů a zářezů. Porucha této technické infrastruktury představuje zároveň riziko pro okolí konstrukce. Tyto umělé svahy jsou zejména v období po dokončení stavby citlivé na svahové pohyby humózní vrstvy, vznik povrchového odtoku a vodní erozi. Mělké deformace svrchní půdní vrstvy mohou předcházet lokálnímu odtržení nebo plošnému sesunutí humózního horizontu. Vývoj a mechanismus poruch na silničních svazích dokumentují například Zhang et al. (2023).

Významnými spouštěcími mechanismy jsou nejen konvektivní srážky, ale i dlouhodobé nebo opakované srážkové události. Infiltrujiící voda zvyšuje vlhkost a hmotnost půdní vrstvy a může se akumulovat nad méně propustným ztuhnutým podložím. Na rozhraní humózní vrstvy a vlastního zemního tělesa tak může vzniknout dočasně zavěšená hladina a laterální proudění na tomto rozhraní. Postupné sycení vede ke změně napěťového stavu a k pohybu vrstvy po svahu. Tyto pohyby a deformace nemusí být na povrchu viditelné. Plouživý pohyb přechází od počáteční deformace přes fázi přibližně ustálené rychlosti až ke zrychlenému pohybu před porušením (Miao et al., 2017; Šilhán, 2024) a možným kolapsovým stavům.

Standardně se pro sledování svahových pohybů používají geodetická měření, fotogrammetrie, LiDAR a pozemní radarová interferometrie (Jaboyedoff et al., 2012; Lombardi et al., 2016; Casagli et al., 2023). Tyto metody umožňují prostorově zachytit stav povrchu, jejich použití však může být omezeno vegetací a nutností opakovaného měření.

Pro kontinuální měření přímo ve svahovém tělese jsou využívány vláknově optické senzory s Braggovými mřížkami. Mechanická deformace optického vlákna vyvolá změnu Braggovy vlnové délky (Yassin et al., 2024). Výhodou této metody je vysoká citlivost, možnost zapojení více měřicích bodů do jednoho systému a možnost relativně velké vzdálenosti od vyhodnocovací jednotky. FBG senzory jsou v geotechnice integrovány do inklinometrických tyčí a sond určených k identifikaci hlubších smykových zón (Wang et al., 2015; Allil et al., 2021; Zhang et al., 2019). Pro mělké, prostorově rozptýlené pohyby v horních přibližně 20 cm půdního profilu však klasický inklinometr není optimální.

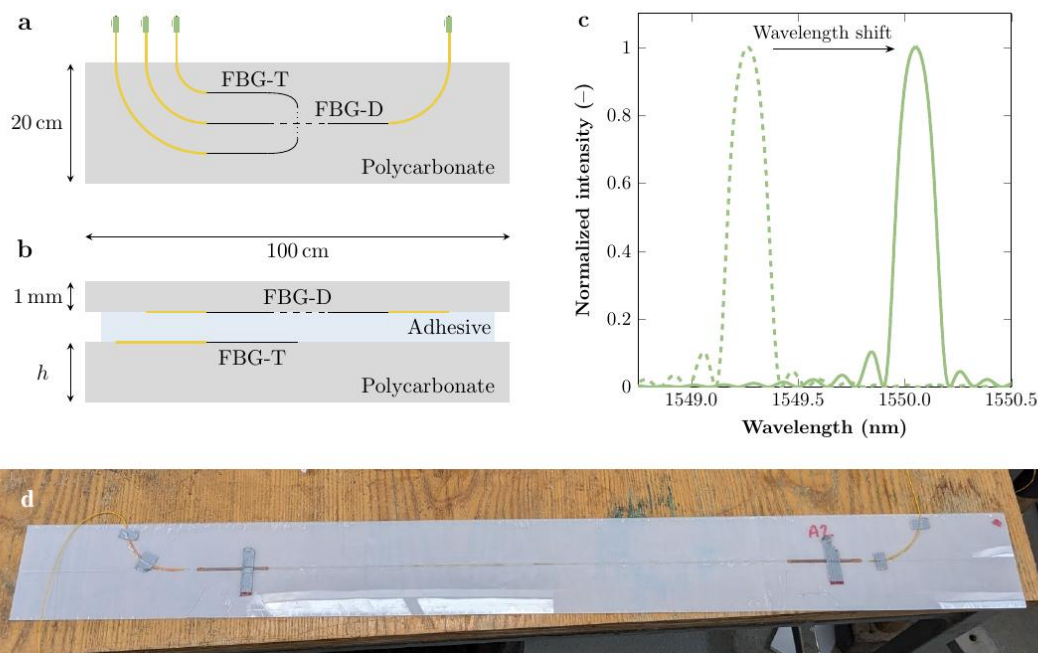
V rámci projektu CK04000144 byl proto vyvinut systém založený na FBG senzorech uložených v pružné polykarbonátové lameli. Relativní pohyb zeminy vyvolává ohyb lamely a změnu Braggovy vlnové délky deformačního senzoru. Druhý FBG senzor je mechanicky oddělen od ohybu a slouží ke kompenzaci teplotního driftu, který je při dlouhodobém venkovním měření nezbytné oddělit od mechanické odezvy (Xiong et al., 2019). Cílem příspěvku je popsat konstrukci a kalibraci lamel, laboratorní experiment při opakovaném srážkovém zatížení, porovnání s fotogrammetrií a navazující ověření ve venkovní laboratoři v Jírkově.

Jednou ze základních experimentálních metod vhodných pro testování hydrologické odezvy a eroze jsou experimenty s umělou srážkou pomocí tzv. dešťových simulátorů. Tato zařízení vytvářejí nad vymezenou plochou umělou srážku s řízenou intenzitou, dobou trvání a prostorovým rozložením. Umožňují opakovat experiment za definovaných okrajových a počátečních podmínek. Nejčastěji se používají při výzkumu povrchového odtoku, erozního odnosu a vzniku erozních rýh (Abudi et al., 2012; Kavka et al., 2018, 2019). V předkládaném výzkumu jsou zadržovací experimenty využívány odlišně. Cílem není tvorba povrchového odtoku a eroze, ale řízené sycení půdy a sledování její deformace.

2. Materiál a metody

2.1 Senzorická lamela a měřicí systém

Senzorická lamela je tvořena dvěma polykarbonátovými deskami o šířce 20 cm. U laboratorních prototypů měla aktivní část délku 1 m, u ověřovacích experimentů 1,7, resp. 2 m. Horní deska měla tloušťku 1 mm a dolní deska 2 nebo 3 mm. Deformační FBG senzor (FBG-D) byl předepnut a přilepen k podélné části silnější desky. Při ohybu sendvičové konstrukce se poloha senzoru mimo neutrální osu projeví podélnou deformací vlákna a změnou Braggovy vlnové délky. Referenční FBG senzor (FBG-T) byl umístěn kolmo k hlavnímu směru ohybu a nebyl pevně spojen s namáhanou podélnou částí tak, aby reagoval především na změnu teploty. Konstrukce zároveň chrání optické vlákno proti lokálnímu poškození a mikroohybům.



Obr. 1 Konstrukce senzorické lamely, poloha deformačního a teplotního FBG senzoru a ukázka vyrobeného prototypu (Nesnidal, 2026).

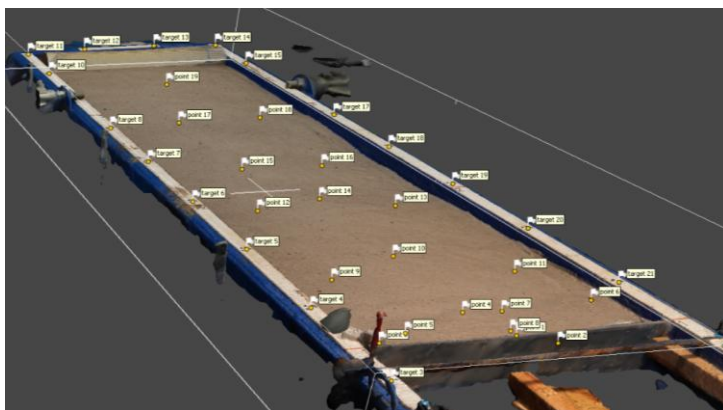
Fig. 1 Sensing-lamella structure, position of the displacement and temperature FBG sensors, and the manufactured prototype.

Optický signál byl snímán čtyřkanalovým interrogátorem s intervalem záznamu 3,5 s, rozlišením vlnové délky 0,1 pm. Před instalací byly lamely zatěžovány řízeným průhybem a pro každý zatěžovací stav byla zaznamenána změna Braggovy vlnové délky. Tato kalibrace je pak klíčová pro převod změny vlnové délky na posun. Zároveň bylo ověřeno, že ohyb lamely nevyvolává významnou odezvu referenčního FBG-T. Teplotně kompenzovaný signál byl stanoven odečtením teplotní složky od změny vlnové délky FBG-D.

2.2 Laboratorní dešťový simulátor ČVUT v Praze

Laboratorní experiment byl proveden na dešťovém simulátoru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Zařízení tvoří sklopný kontejner o rozměrech 4×1 m a systém trysek umožňující řízenou aplikaci umělé srážky. Experimentální plocha byla naplněna zeminou nad ponechanou drenážní písčitou vrstvou podle standardního postupu přípravy simulátoru (Kavka et al., 2019) a zhutněna ručním válcem naplněným vodou. V další fázi experimentů pak bylo nahrazeno propustné podloží nepropustným jílem. Sklon byl nastaven na 20° . V ploše byly instalovány dvě lamely s odlišným způsobem kotvení. Horní lamela byla umístěna 2 m od spodní hrany a kotvena uprostřed, spodní lamela byla umístěna 1 m od spodní hrany a kotvena na okrajích. Uspořádání umožnilo porovnat rozdílný přenos pohybu půdní vrstvy na průhyb senzoru.

Půdní profil byl zatěžován pěti srážkovými událostmi o intenzitách $20\text{--}40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ a délkách 30–120 min. Nízká intenzita a nízká kinetická energie srážky byly zvoleny s ohledem na postupné sycení bez výrazného povrchového odtoku a rozvoje erozních rýh. Experiment byl zaměřen nejen na změny během sycení, ale také na následnou konsolidaci při vysychání. Signál FBG byl vyhodnocován během srážky, bezprostředně po ní a s odstupem 1 a 24 hodin.



Obr. 2 a) 3D model svahu na laboratorním DS s označenými referenčními terči a identickými body v ploše, b) Uspořádání laboratorního dešťového simulátoru, kotvení lamel

Fig. 2 a.) 3D model RS with reference points, b) Laboratory rainfall-simulator setup, lamella anchoring and the interrogation unit.

2.3 Venkovní experimentální lokalita v Jirkově

Zatímco laboratorní testy slouží především k testování lamel a jejich odezvy, venkovní experimenty v prostředí blízkém reálným svahům probíhají v experimentální laboratoři v Jirkově. Lokalitu tvoří tři samostatné kontejnery o rozměrech 4×2 m se sklony 22° , 30° a 34° . Profil je tvořen svrchní humózní vrstvou uloženou na méně propustném zhutněném podloží. Každý kontejner je vybaven stacionárním dešťovým simulátorem umožňujícím opakované srážkové zatížení při současném působení přirozených venkovních teplotních a vlhkostních podmínek. Do každého svahu byly instalovány dvě senzorické lamely délky přibližně 1,7 m s odlišným způsobem kotvení. Jedna varianta sleduje relativní pohyb humózní vrstvy vůči stabilnějšímu podloží, druhá umožňuje hodnotit přenos deformace při jiném upevnění lamely. Měřicí systém je doplněn čidly půdní vlhkosti a teploty, měřením aplikované a přirozené srážky a dalšími hydroklimatickými veličinami. Uspořádání umožňuje porovnat vliv sklonu, kotvení, počáteční vlhkosti a opakovaného srážkového zatížení.



Obr. 3 Instalace senzorických lamel v lokalitě Jirkov: a) usazení senzorické lamely do půdního profilu, b) kotva pro uchycení lamely do hlubších půdních vrstev, c) experimentální plocha připravená pro měření pohybu svrchní půdní vrstvy včetně osazených a zaměřených fotogrammetrických terčů.

2.4 Verifikace pomocí dalších metod

Srovnávací metody jsou v rámci experimentu využívány dvě. Jednak porovnáván se změnami zatížení zaznamenanými pomocí tlakové podušky umístěné v půdním profilu. Tlaková poduška nesleduje přímo posun půdní vrstvy, ale změnu kontaktního tlaku vyvolanou sycením, přeskupováním zeminy a rozvojem deformace. A dále pak porovnáním s přesným fotogrammetrickým měřením, kdy je povrch půdy a jeho změny vyhodnocován pomocí metody SfM ze snímků pořízených před a po každé simulaci. Vzájemná přesná poloha snímků je možná díky zaměřovacím terčům na rámu kontejneru se vzorkem. Následně byly v programu Agisoft Metashape

vytvořeny digitální modely povrchu a ortofotosnímky s výsledným rozlišením přibližně $0,23 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$. Další zpracování proběhlo v prostředí ArcGIS Pro. Přes šířku plochy byly v pravidelných rozestupech 5 cm vytvořeny souběžné měřicí linie. Pro každý ortofotosnímek byly ručně vymezeny polohy obou lamel a změna souřadnice průsečíků s měřicími liniemi byla použita jako ukazatel pohybu ve směru svahu.

Přesnost jednotlivých modelů byla hodnocena pomocí RMSE kontrolních bodů ve směru svahu. Při porovnání dvou modelů byla kombinovaná nejistota stanovena jako odmocnina součtu čtverců chyb obou měření. FBG a fotogrammetrie nesledují totožné místo ani stejný mechanismus: FBG reaguje na ohyb zakotvené lamely uvnitř profilu, zatímco fotogrammetrie zachycuje změnu povrchu.

3. Výsledky

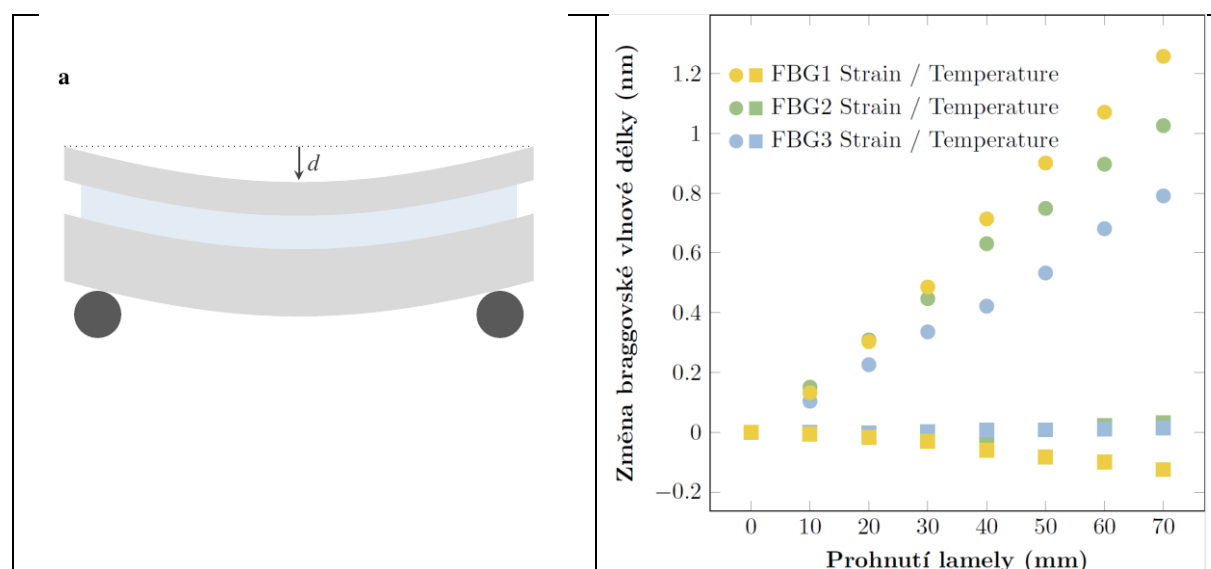
3.1 Kalibrace senzorických lamel

Všechny deformační FBG-D vykázaly při řízeném průhybu výraznou lineární odezvu. Koeficient determinace kalibračního vztahu byl u všech tří prototypů nejméně 0,997. Nejvyšší citlivost $0,0185 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ byla dosažena u lamely se silnější, 3mm dolní polykarbonátovou deskou. U prototypů s dolní deskou tloušťky 2 mm činila citlivost 0,0148 a $0,0112 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$. Odezva referenčních FBG-T na průhyb byla přibližně o jeden až dva řády menší. Kalibrace tak potvrdila jejich použitelnost pro teplotní kompenzaci. Praktické rozlišení lamely použité při laboratorním experimentu bylo stanoveno na 2,7 mm.

Tab. 1 Parametry FBG senzorů získané kalibrací průhybu lamely.

Tab. 1 Parameters of the FBG sensors obtained by lamella-deflection calibration.

Senzor	Tloušťka dolní desky [mm]	Klidová vlnová délka [nm]	Citlivost [$\text{nm} \cdot \text{mm}^{-1}$]	R ²
FBG-D1	3	1551,917	0,0185	0,997
FBG-T1	–	1554,345	–0,0019	0,586
FBG-D2	2	1549,424	0,0148	0,999
FBG-T2	–	1548,670	0,0005	0,973
FBG-D3	2	1549,766	0,0112	0,997
FBG-T3	–	1548,612	0,0002	0,840



Obr. 4 a) Princip kalibračního průhybu a závislost změny Braggovy vlnové délky na deformaci, b) výsledky kalibračních testů

Fig. 4 Calibration-deflection principle and Bragg wavelength shift as a function of deformation.

3.2 Testování průhybu lamel a porovnání s dalšími metodami

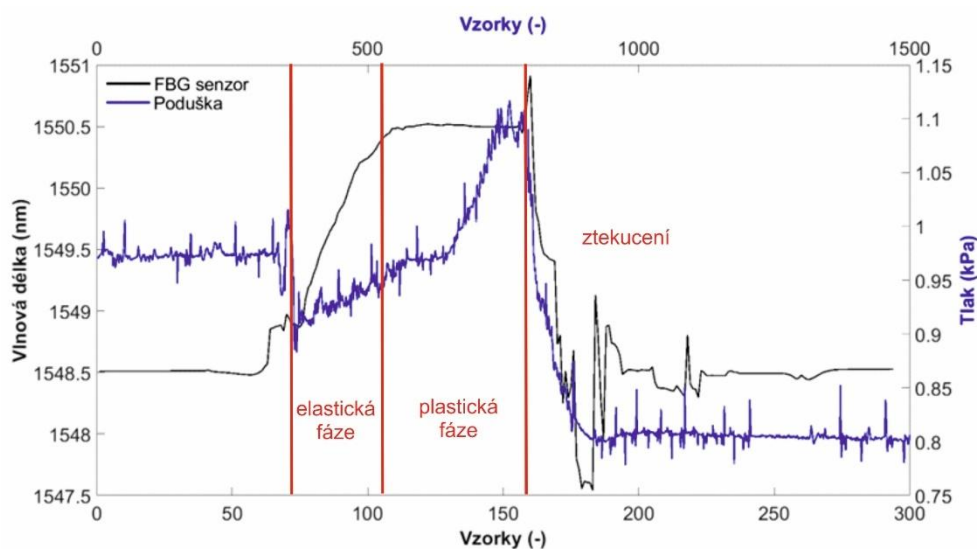
Experimenty na dešťovém simulátoru probíhaly v první fázi s pískem a v další fázi se zeminou.

Ověření funkčnosti FBG senzoru – písek

Na laboratorním dešťovém simulátoru byla provedena sada úvodních experimentů s pískem místo zeminy zaměřených na ověření funkce senzorických lamel při různých typech zatížení. Testován byl vliv změny sklonu, postupného sycení půdního profilu, opakovaného srážkového zatížení, rozdílného způsobu podepření a působení teplotních změn při zmrazování a rozmrazování půdy. Výsledky prokázaly schopnost systému zachytit počáteční i výraznější deformace svahu.

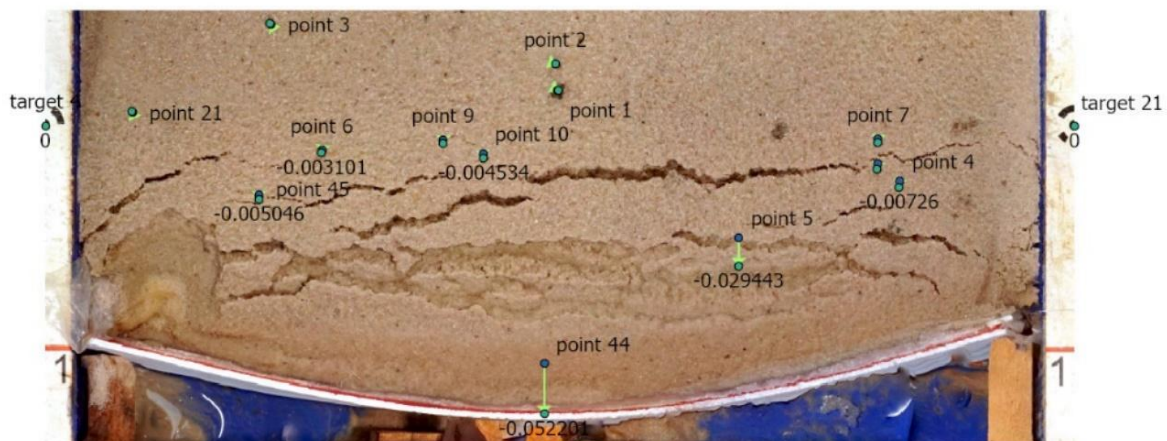
Ukázkou jsou výsledky porovnání průběhu průhybu FBG lamely, tlaků změřených pomocí tlakové podušky a posunů změřených fotogrammetrickou metodou, jak je uvedeno na následujících obrázcích.

Pro ověření mechanické interpretace odezvy FBG senzoru byl průběh deformace lamely porovnáván také se změnami zatížení zaznamenanými pomocí tlakové podušky umístěné v půdním profilu. Tlaková poduška nesleduje přímo posun půdní vrstvy, ale změnu kontaktního tlaku vyvolanou sycením, přeskupováním zeminy a rozvojem deformace. Časové porovnání obou signálů umožňuje posoudit, zda změna průhybu senzorické lamely souvisí se změnou napětěvého stavu v jejím okolí, a odlišit vlastní pohyb vrstvy od odezvy způsobené pouze změnou vlhkosti nebo teploty. Současné vyhodnocení FBG senzoru, tlakové podušky a fotogrammetrie tak propojuje informaci o vnitřní mechanické odezvě půdního profilu s měřením lokální deformace a povrchového posunu.



Obr. 5 Porovnání odezvy FBG senzoru a průběhu tlaků změřených pomocí tlakové podušky.

Díky opěrným bodům na stranách zadešťovacího kontejneru jsou maximální deformace soustředěny především do oblasti čela svahu v okolí senzorické lamely. Největší posun odpovídal průhybu lamely přibližně 5 cm, zatímco další měřitelné deformace se vyskytovaly pouze v její bezprostřední blízkosti.



Obr. 6 Ukázka detailu prohnutí lamely při experimentu s vyznačenými sledovanými body posunu

Porovnání s fotogrammetrickou metodou – zemina

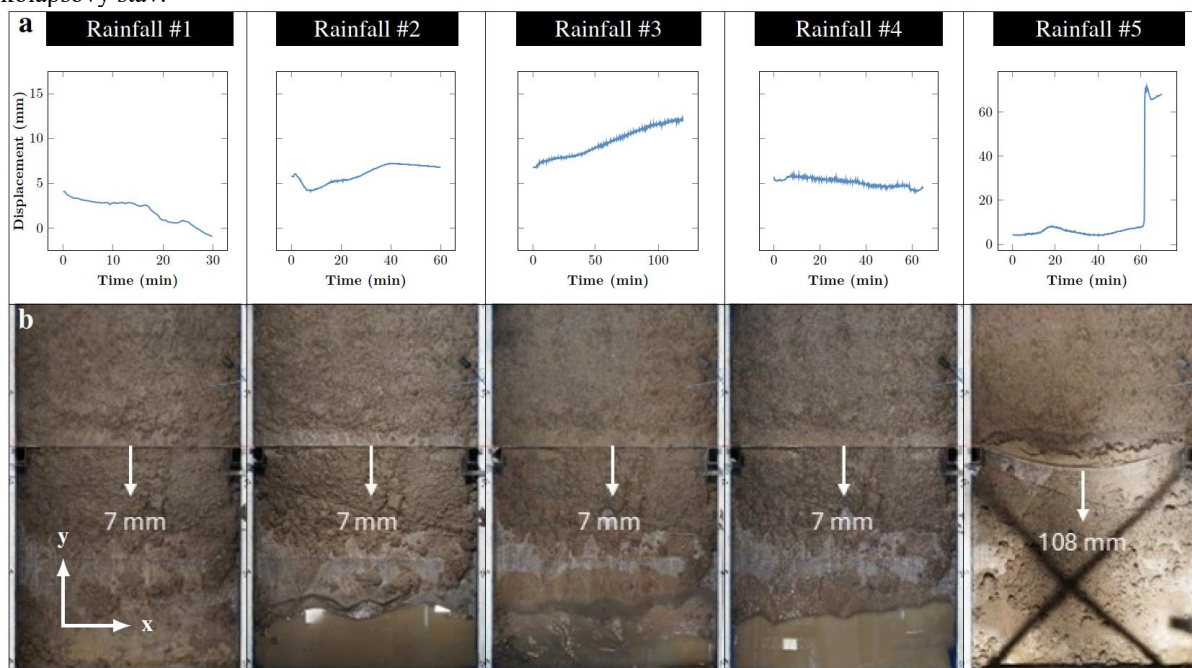
RMSE jednotlivých fotogrammetrických modelů ve směru svahu se pohybovala od 0,67 do 1,16 mm. Kombinovaná nejistota dvojice porovnávaných modelů dosahovala přibližně 0,96–1,53 mm. Posuny větší než přibližně 2 mm proto lze považovat za spolehlivě rozlišené. Menší změny se pohybují na úrovni nejistoty fotogrammetrického vyhodnocení a jejich průběh je vhodnější sledovat kontinuálním optickým měřením. Při prvních čtyřech událostech fotogrammetrie vykázala shodný celkový posun povrchu 7 mm, a povrch se tak z hlediska této metody jevil jako stabilizovaný. FBG však při druhé až čtvrté události zaznamenal změny průhybu v řádu jednotek až desítek milimetrů. Tento návrat během 1–24 hodin odpovídá částečné relaxaci při vysychání a ukazuje, že odezva obsahuje trvalou i vratnou složku.

Tab. 2 Parametry srážkových událostí a posuny stanovené fotogrammetrií a FBG senzorem.

Tab. 2 Rainfall-event parameters and displacements derived from photogrammetry and the FBG sensor.

Událost	Intenzita [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$]	Doba [min]	DPhoto [mm]	DFBG [mm]	DFBG po 1 h [mm]	DFBG po 24 h [mm]
Počáteční stav	0	–	0	4	–	–
Srážka 1	40	30	7	0	0	0
Srážka 2	40	60	7	7	6	5
Srážka 3	20	120	7	12	11	4
Srážka 4	20	60	7	5	5	3
Srážka 5	20	60	108	68	72	70

Největší odezva před konečným porušením byla zaznamenána při nejdelší, 120minutové srážce. Poslední experiment byl koncipován tak, aby došlo k viditelné deformaci a porušení půdního vzorku a byl simulován kolapsový stav.



Obr. 7 Průběh deformace z FBG měření a fotogrammetrický stav povrchu po pěti srážkových událostech.

Fig. 7 FBG-derived deformation and photogrammetric surface state after five rainfall events (Nesnídal, 2026).

4. Diskuse

Výsledky potvrzují, že senzorická lamela s FBG je schopna zachytit mělké svahové pohyby svrchní půdní vrstvy. Z hlediska chování zemní konstrukce je podstatná detekce jak počáteční částečně vratné deformace, tak dlouhodobých mikroposunů před nástupem výrazných deformací vedoucích ke kolapsovému stavu. Laboratorní experimenty ukazují, že FBG lamely umožňují sledovat deformace v reakci na různé srážkové události. Pokles průhybu během vysychání ukazuje, že měřená změna nemusí být pouze nevratným posunem, ale zahrnuje i vratnou deformaci vlhké zeminy a kontaktu mezi půdou a senzorem. Způsob kotvení proto přímo ovlivňuje odezvu. Příliš volné uložení nemusí přenést malý pohyb na lamelu, příliš tuhé kotvení může naopak změnit lokální deformační mechanismus. Porovnání středového a okrajového kotvení v laboratoři a dvou variant v Jirkově je proto součástí návrhu instalační metodiky. Výsledky zároveň ukazují nutnost eliminace dalších faktorů ovlivňujících měření, především teplotu, bobtnání a vysychání zeminy. Eliminace těchto faktorů je nad rámec tohoto příspěvku a je řešena v jiné části projektu.

Použití dešťového simulátoru odlišné od simulace konvektivních srážek zaměřené na erozní procesy ukazuje další možnosti využití tohoto zařízení. Odlišné typy trysek s nižší intenzitou a nižší kinetickou energií byly voleny tak, aby dominantním procesem byla infiltrace vody do půdního profilu, nikoli destrukce povrchu. Výhodou laboratorního zařízení je opakovatelnost a možnost přímého porovnání se senzory. Omezením je uměle připravený půdní profil, malá plocha a zjednodušené okrajové podmínky. Venkovní kontejnery v Jirkově mají ověřit, zda se kalibrovaná odezva zachová při přirozeném teplotním režimu, vysychání a opakovaném zatěžování.

Nejistota fotogrammetrického porovnání dosahovala až 1,53 mm. Hranice přibližně 2 mm je proto praktickým limitem spolehlivé detekce změny povrchu v použité konfiguraci. FBG měl experimentální rozlišení 2,7 mm, jeho výhodou však byla kontinuální časová řada a odezva na vnitřní pohyb. Rozdílné principy měření vysvětlují, proč se absolutní hodnoty při konečné poruše neshodují. Pro další ověření je vhodné doplnit prostorové měření o nezávislé bodové snímače posunu a zemního tlaku a vyhodnocovat je společně s vlhkostí a vznikem dočasně zavěšené hladiny.

5. Závěr a výhled

Vývoj vláknově optických senzorů pomocí experimentálního výzkumu slouží ke sledování mělkých deformací svrchních vrstev svahů liniových staveb. Řešení zahrnuje celý řetězec od identifikace vodou podmíněných mechanismů porušení přes konstrukci a kalibraci senzorických lamel až po jejich instalaci v půdě, přenos dat a vyhodnocení možného rizikového stavu. Zde prezentovaná experimentální část tvoří základ monitorovacího systému určeného pro kontinuální sledování deformací, které mohou předcházet viditelnému porušení povrchu svahu.

Laboratorní experimenty ověřily odezvu senzorických lamel při změně sklonu, postupném sycení půdy, opakovaném srážkovém zatížení i při zmrazování a rozmrazování profilu. Součástí řešení byl vývoj konstrukce lamel, teplotní kompenzace a různých způsobů jejich podepření a ukotvení. Další součástí řešení je vývoj kotev, který ukázal, že tyto referenční body musí být dostatečně zapuštěny do stabilní vrstvy a nesmějí se během deformace monitorované zeminy posouvat ani ohýbat. Pro správnou interpretaci optického signálu je rozhodující nejen citlivost FBG senzoru, ale celý mechanický přenos mezi zeminou, lamelou a kotevním prvkem.

Odezva vláknově optických senzorů byla porovnávána s nezávislými metodami měření. Fotogrammetrické snímání a digitální modely povrchu umožnily sledovat prostorový rozsah deformace, zatímco měření zemního tlaku, půdní vlhkosti, teploty a srážky poskytovalo informace o podmínkách jejího vzniku. Experimenty prokázaly schopnost senzorických lamel zachytit také malé posuny, které se pohybují na hranici přesnosti fotogrammetrického vyhodnocení.

Přenos laboratorních výsledků do venkovních podmínek byl ověřován v experimentální laboratoři STRIX v Jirkově. Toto ověřování ukazuje další limity spojené s reálným nasazením technologie FBG senzorů. Navazující práce budou zaměřeny na dokončení a ověření prototypu celého monitorovacího systému. Konečným cílem je testovat monitorovací systém v reálném prostředí. Experimentální měření bude pokračovat na svahových plochách, které umožní systematicky měnit půdní skladbu, sklon, způsob uložení senzorických lamel a podmínky srážkového zatížení. Cílem je rozšířit soubor testovaných stavů, lépe popsat vliv jednotlivých faktorů na odezvu FBG senzorů a optimalizovat model chování svrchní půdní vrstvy.

Současně bude systém ověřován na více reálných svazích a výsledky laboratorních a terénních měření budou statisticky porovnány. Důraz bude kladen na dlouhodobou stabilitu měření, způsob kotvení lamel, teplotní kompenzaci a stanovení kritérií pro rozlišení běžných změn od počínající svahové deformace. Na experimentální část naváže dokončení softwaru pro zpracování a vizualizaci senzorických dat, finální konstrukční úpravy prototypu a příprava technické dokumentace a ochrany řešení formou užitého vzoru.

Poděkování

Príspevek vznikl s podporou Technologické agentury České republiky v programu DOPRAVA 2020+ v rámci projektu CK04000144 - Systém prevence poruch a kolapsových stavů svahů liniových staveb s použitím vláknových senzorů a dále aplikačnímu garantovi projektu ŘSD s.p.

Seznam literatury

- Abudi, I., Carmi, G., Berliner, P. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology* 454–455, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056>.
- Allil, R. C. S. B., Lima, L. A. C., Allil, A. S., Werneck, M. M. 2021. FBG-Based Inclinometer for Landslide Monitoring in Tailings Dams. *IEEE Sensors Journal* 21, 16670–16680. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3081025>.
- Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., Gigli, G., Raspini, F. 2023. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 51–64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>.
- Jaboyedoff, M. et al. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards* 61, 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>.
- Kavka, P., Strouhal, L., Jachymova, B., Krasa, J., Báčová, M., Laburda, T., Dostál, T., Devátý, J., Bauer, M. 2018. Double size FullJet field rainfall simulator for complex interrill and rill erosion studies. *Stavební obzor – Civil Engineering Journal* 27, 183–194. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.02.0015>.
- Kavka, P., Neumann, M., Laburda, T., Zmr, D. 2019. Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 – Proceedings. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0392>.
- Lombardi, L. et al. 2016. The Calatabiano landslide (southern Italy): preliminary GB-InSAR monitoring data and remote 3D mapping. *Landslides* 14, 685–696. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0767-6>.
- Miao, F., Wu, Y., Xie, Y., Li, Y. 2017. Prediction of landslide displacement with step-like behavior based on multialgorithm optimization and a support vector regression model. *Landslides* 15, 475–488. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0883-y>.
- Šilhán, K. 2024. Dendrogeomorphic analysis of creep: possibilities and specifics of spatio-temporal reconstruction. *Landslides* 22, 1077–1086. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02417-3>.
- Wang, Y. L. et al. 2015. Introduction to an FBG-based inclinometer and its application to landslide monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5, 645–653. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0129-4>.
- Xiong, L., Jiang, G., Guo, Y., Kuang, Y., Liu, H. 2019. Investigation of the Temperature Compensation of FBGs Encapsulated With Different Methods and Subjected to Different Temperature Change Rates. *Journal of Lightwave Technology* 37, 917–926. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2883817>.
- Yassin, M. H., Farhat, M. H., Soleimanpour, R., Nahas, M. 2024. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review of technology and recent applications in structural health monitoring (SHM) of civil engineering structures. *Discover Civil Engineering* 1. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00141-4>.
- Zhang, J., Zhang, S., Ding, Y., Zhu, D. Z. 2023. Evolution process and failure mechanism of a large expressway roadside landslide. *Scientific Reports* 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32055-z>.
- Zhang, L. et al. 2019. An Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Slope Deformation Studies in Geotechnical Centrifuges. *Sensors* 19, 1591. <https://doi.org/10.3390/s19071591>.