

PŘEHLED LITERATURY O ŠEDÝCH, ZELENÝCH A HYBRIDNÍCH OPATŘENÍCH PRO ZMÍRNĚNÍ SESUVŮ¹

V této části je uveden přehled literatury o šedých, zelených a hybridních opatření zmírňující sesuvy. Při posuzování vybraných opatření byly zvažovány takové aspekty, jako je proveditelnost, efektivita nákladů, flexibilita, údržba, dopad na změnu klimatu a její zmírňování. U každého opatření je navíc uvedeno krátké shrnutí a případová studie. Než se však pustíme do podrobností o jednotlivých opatřeních, je důležité nejprve zmínit, jak byla tato opatření rozdělena mezi tyto tři různé kategorie.

Pro šedá opatření byla zvolena tradiční a konvenční řešení pro zmírnění sesuvů. Ve srovnání s jinými technikami pro snižování rizika sesuvů šedá opatření vizuálně představují pevnou infrastrukturu obvykle vyrobenou z nerozložitelných materiálů, jako je beton nebo ocel, a je známo, že mají převažující „šedý“ vizuální efekt. Kromě toho tento druh opatření obvykle poskytuje omezené nebo téměř žádné ekosystémové služby. Zelená opatření mají naopak ve srovnání s jinými kategoriemi pro snížení rizika sesuvů převažující ekosystémové funkce a jsou vyrobena převážně z rozložitelných materiálů. I když je ve fázi realizace obvykle zapotřebí určité technické vybavení pro vybudování zelených opatření zmírňujících sesuvy, následně po zřízení mají tato opatření tendenci mít pouze „zelený“ vizuální efekt. Z hlediska hybridních opatření byla zvolena opatření pro zmírnění sesuvů, která zahrnují funkce šedého i zeleného opatření. Je třeba také zmínit, že v tomto případě se hybridní opatření týkají především těch řešení, která vizuálně vypadají ekologičtěji a poskytují ekosystémové služby, stále však obsahují prvky šedé infrastruktury, které pomáhají systému správně plnit jeho funkce.

V návaznosti na to tabulky 1 a 2 představují seznam vybraných šedých, zelených a hybridních opatření a popis parametrů, které byly zkoumány během rešerše literatury pro každé konkrétní měření.

Tabulka 1: Vybraná šedá, zelená a hybridní opatření pro zmírnění rizika sesuvů

Kategorie	Vybraná opatření
Zelené	zalesňování, výsadba vegetace, živé kůly a fašiny (svazky klestí či proutí), biotechnická ochrana svahů (hydroosev, hydromulčování, Euro-Mat, etc.)
Hybridní	dřevěné hrázky, poldry, geotextilie, mělké (povrchové) odvodnění, povrchová ochrana a erozní kontrola zádržné zídky, zpevňování svahu, retenční nádrže, dřevěné hrázky,

¹ Česká legislativa používá pojem *sesuv*, které je ekvivalentem anglického *landslide*. Konkrétně Vyhláška 500/2006 Sb. o územně analytických podkladech, územně plánovací dokumentaci a o způsobu evidence územně plánovací činnosti zahrnuje mezi tyto podklady *sesuvná území a území jiných geologických rizik*. Prováděcí vyhláška k zákonu č. 62/1988 Sb., o geologických pracích, č. 369/2004 Sb. o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, oznamování rizikových geofaktorů a o postupu při výpočtu zásob výhradních ložisek, ve znění pozdějších předpisů vymezuje taktéž sesuvná území a mezi rizikové faktory řadí *pohyb půd, sutí, hornin a skalního masívu*. V plánovacích podkladech a dokumentaci stejně jako v obecné praxi je pak dominantně užíván pojem *sesuv půdy*. Je přitom potřeba upozornit na skutečnost, že široké používání pojmu *sesuv půdy* je v české odborné komunitě vnímáno jako diskutabilní. Samotný *sesuv* je totiž pouze jedním z více typů svahových pohybů (srv. též vyhláška výše) a navíc při těchto pohybech nedochází k pohybu půdy, ale především zemin či zvětralin skalního podloží. Obecný pojem *svahový pohyb* (*mass movement*) lze definovat jako gravitační pohyb zemin a zvětralin skalního podloží po svahu. Svahové pohyby nejčastěji klasifikujeme dle mechanismu pohybu (např. řícení, sesouvání, stékání), materiálu (zemina, suť, skalní bloky), rychlosti a hloubky. V české odborné literatuře lze dále najít také pojem *svahová deformace*. Tou je míněna výsledná forma reliéfu (terénu), vzniklá svahovým pohybem. V zahraniční i české literatuře se však užívání pojmu *sesuv* či *landslide* ukotvilo jako krátký a širší čtenářské obci srozumitelný pojem. Proto i zde z důvodu ekvivalence všech tří jazykových mutací karet opatření, které vznikají v rámci projektu, užíváme pojem *sesuv* (bez doplňku *půdy*) vždy, když se píše o celé šíři procesů. Více in MÜLLEROVÁ, H., KLIMEŠ, J., BLAHŮT, J., HÁLOVÁ, M., RAŠKA, P. *Zodpovědné plánování: Území a sesuvy*. Praha: Ústav státu a práva AV ČR, 2018. ISBN 978-80-87439-37-1.

Šedé	flexibilní bariéry, hrázky (check/log dams ²), hloubkové odvodnění, úprava geometrie svahu, opěrné konstrukce, modifikace mechanických vlastností zeminy v terénu (trysková injektáž, kompakce, chemické vazby)
-------------	---

Tabulka 2: Seznam deskriptorů a jejich vysvětlení

Deskriptor	Vysvětlení
Krátké shrnutí	Stručné vysvětlení/popis zvoleného šedého, zeleného nebo hybridního opatření.
Proveditelnost	Jak obtížné je opatření realizovat z hlediska designu, postupu implementace atd. Kromě toho lze v této části zohlednit také trvanlivost (životnost) opatření.
Efektivita nákladů	Účinnost opatření z hlediska zmírňování sesuvů a dalších aspektů (je-li relevantní) na základě výše investic (např. nákladů na výstavbu).
Flexibilita (Jiná nebezpečí)	Vliv zvoleného opatření na riziko vzniku dalších nebezpečí, jako jsou sesuvy, eroze, sedimentace, kontaminace podzemních vod apod. (je-li relevantní).
Údržba	Údržbářské činnosti (úsilí) potřebné k udržení konstrukce v požadovaných podmínkách. Kromě toho lze v této části uvažovat také o nákladech na údržbu.
Změna klimatu	Vliv zvoleného opatření na změnu klimatu. Zde lze v závislosti na zvoleném opatření uvažovat o zmírňování, nebo naopak negativním dopadu na změnu klimatu.
Příklad případové studie	Popis případové studie, kde bylo vybrané opatření realizováno nebo kde byla jeho implementace testována.

² Český překlad pojmů check dams, woody dams nebo log dams není ukotven. Jedná se o malé hrázky z různého materiálu, zejména v případě dřevěné konstrukce (woody dams – hybridní opatření) propustné, které slouží ke zpomalení rychlosti proudění a zadrží nadměrného odnosu sedimentu vodním tokem (tento efekt někdy může být příliš velký a negativně ovlivňovat fungování říčního systému). V dokumentu se držíme zjednodušeného překladu *hrázky*.

Sesuvy – zelená opatření

Opatření: Zalesňování	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření použito:	Ve Švýcarsku se ochranné lesy tradičně využívají ke snížení rizika lavin, sesuvů a skalních řícení. https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-005-0018-8 Zalesňovací program Grain for Green v Číně na Sprašové plošině je známým příkladem, kde rozsáhlé úsilí o zalesňování bylo úspěšné při snižování rizika sesuvů a eroze. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04491-x Nepálská chráněná oblast Annapurny: The Annapurna Conservation Area Project (ACAP) zahrnuje iniciativy v oblasti zalesňování, které vedlejším účinkem stabilizovaly svahy a snížily riziko sesuvů. https://ntnc.org.np/project/annapurna-conservation-area-project-acap https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464517300568 Ne všechny iniciativy a programy jsou zaměřeny na zmírňování sesuvů, ale je to často zmiňovaný vedlejší účinek těchto programů.
Krátké shrnutí	Zalesňování je proaktivní opatření ke zmírnění sesuvů (Papathoma-Köhle a Glade 2013), které zahrnuje výsadbu stromů a obnovu přirozeného lesního porostu v oblastech náchylných k sesuvům. Vergari a kol. (2017) uvádějí, že více než 20 % evropských lesů přímo chrání půdu, zlepšuje kvalitu vody nebo poskytuje jiné ekosystémové služby. Jedná se o přírodě blízké opatření, které využívá stabilizačních účinků vegetace, především kořenů stromů, zvyšuje soudržnost, snižuje povrchový odtok a zmírňuje erozi, čímž činí svahy odolnějšími vůči sesuvům.
Proveditelnost	Zalesňování je obecně proveditelné v oblastech náchylných k sesuvům, ale závisí na faktorech, jako je dostupná půda, klimatické podmínky, vhodnost dřevin a zapojení komunity. Podrobné posouzení lokality je zásadní pro určení proveditelnosti. Problémy s drážbou půdy a protichůdné priority využívání mohou bránit úsilí o zalesňování. Dlouhodobý závazek a zapojení komunity jsou nezbytné, ale mohou čelit výzvám.
Efektivita nákladů	Zalesňování může být nákladově efektivní ve srovnání s tradičními inženýrskými řešeními, protože počáteční náklady na výsadbu stromů a obnovu mohou být nižší než výstavba a údržba inženýrských staveb. Existuje také řada dlouhodobých přínosů zlepšené stability svahů, snížené eroze a lepších ekosystémových služeb, které z ní činí nákladově efektivní strategii. Klíčovými účinky lesů na zmírňování sesuvů, jak uvádí Vergari et al. (2017) je (a) zachycování a odpařování (6–45% snížení ročních srážek podle Carlyle-Moses a Gosh 2011), (b) sání a transpirace zvyšující půdní vlhkost, (c) infiltrace a podpovrchové toky (podporující tvorbu půdních pórů), (d) zpevnění, (e) podepření a vyklenutí a (f) příplatek (dosti omezený účinek). Efekt je u různých typů sesuvů odlišný. Zalesňování je zvláště účinné při snižování rizika mělkých sesuvů na relativně mírných svazích. Zpevněním svrchních vrstev se snižuje riziko tečení a sesuvy vyvolané srážkami, koruna stromů snižuje erozivitu srážek a kořeny mohou snižovat pórový tlak vody vyvolaný infiltrovanou dešťovou vodou. Zalesňování může také snížit sesuvy vyvolané erozí tím, že stabilizuje horní vrstvy kořeny.

	Na druhou stranu je zalesňování omezeno na vysoce svažitých svazích a má také omezený vliv na hluboké sesuvy nebo hluboko založené sesuvy vyvolané litologickými a tektonickými vlastnostmi.
Flexibilita	Zalesňování má také pozitivní vliv na erozi a na snížení kulminačních průtoků prostřednictvím procesu zachycování srážek.
Údržba	Úspěšné zalesňování vyžaduje průběžnou údržbu, včetně kontroly invazivních druhů, péče o stromy a monitorování. Pravidelné kontroly a obhospodařování lesů jsou nezbytné pro zajištění zdraví a stability zalesněných oblastí. Údržba je závislá i na tom, zda je konkrétním lesním porostům přiřazeno více funkcí.
Změna klimatu	Zalesňování přispívá ke zmírňování změny klimatu tím, že zachycuje oxid uhličitý prostřednictvím růstu stromů a zvyšuje ukládání uhlíku v půdě. Podporuje také přizpůsobení se změně klimatu tím, že snižuje dopady extrémních meteorologických jevů, jako jsou přívalové srážky, snížením erozivity srážek.
Příklad případové studie	https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04491-x https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464517300568 https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-005-0018-8

Opatření: Výsadba vegetace	
Příklad případové studie	Ve Velké Británii se ke stabilizaci svahů podél dálnic a železnic používají původní traviny a půdokryvné rostliny, čímž se snižuje riziko mělkých sesuvů při silných deštích. Křídlatka japonská a další druhy vegetace se používají v kombinaci s bioinženýrskými technikami k posílení svahů a kontrole sesuvů v horských oblastech.
Krátké shrnutí	Vegetační opatření při snižování rizika sesuvů se týkají použití různých druhů původních nebo adaptovaných rostlin, půdních pokryvů a keřů ke stabilizaci svahů, zpevnění a zmírnění rizika sesuvů (Stokes et al. 2014). Na rozdíl od velkoplošného zalesňování se vegetační opatření zaměřují na zásahy menšího rozsahu, jejichž cílem je zvýšit stabilitu místních svahů, aniž by se území nutně přeměnilo na zalesněnou krajinu.
Příklad případové studie	https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22087-6_5 https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/40/e3sconf_iccee2018_06003.pdf https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-020-01783-1
Proveditelnost	Vegetační opatření jsou obecně proveditelná v různých regionech, zejména v těch s mírnými svahy a vhodnými půdami. Jsou přizpůsobitelná rozmanité krajině a lze je přizpůsobit též konkrétním podmínkám stanoviště.
Efektivita nákladů	Vegetační opatření jsou obvykle nákladově efektivní ve srovnání s rozsáhlým zalesňováním nebo rozsáhlými inženýrskými opatřeními. Náklady jsou nižší díky sníženým požadavkům na materiál a využití místně dostupné vegetace. Vegetační opatření mohou být vysoce účinná při zmírňování zvláště mělkých sesuvů a povrchové eroze, kdy rostliny spojují půdní částice dohromady, zvyšují soudržnost a pevnost ve smyku. Rostlina může také zmírnit pomalé a postupné pohyby hmoty, jako je tečení, sesuvy vyvolané

	srážkami, kdy silné srážky mohou nasytit půdu a zvýšit pórový tlak vody, a sesuvy vyvolané erozí v důsledku zachycování dešťových srážek. Rychlá obnova vegetace prostřednictvím výsadby může stabilizovat půdu a minimalizovat riziko sesuvů po lesních požárech. Efektivita výsadby je omezena na extrémně strmých svazích nebo v oblastech s častým narušováním. V takových případech mohou být nezbytná další zmírňující opatření nebo kombinace přírodě blízkých opatření a inženýrských přístupů. Některé studie také uvádějí omezené účinky travních porostů na zmírnění sesuvů ve srovnání se zalesněnými lokalitami. Podle Shu et al. (2017) byla hustota sesuvů ve španělské případové studii 2,0 sesuvů/km² na travnatých plochách ve srovnání s 0,4 sesuvy/km² v zalesněných oblastech.
Údržba	Udržování vegetačních opatření zahrnuje pravidelný monitoring, odstraňování plevelů a výměnu poškozených nebo odumřelých rostlin. Adekvátní zalévání během zakládání je zásadní pro zajištění přežití rostlin. Údržba v zásadě závisí na zemědělském využití a postupech hospodaření (Tasser et al. 2003), které mohou významně ovlivnit vlastnosti rostlin a jejich stabilizační účinek na půdu.
Změna klimatu	Vegetační opatření přispívají ke zmírňování změny klimatu tím, že sekvestrují oxid uhličitý prostřednictvím růstu rostlin a zlepšují celkový stav ekosystému. Podporují také přizpůsobení se změně klimatu tím, že snižují extrémní hydrologické jevy a erozi.
Jiná nebezpečí	Vegetační opatření lze integrovat s dalšími přírodě blízkými řešeními a inženýrskými opatřeními za účelem snížení odtoku sedimentů. Invazní druhy rostlin mohou vytlačit žádoucí vegetaci, což může vést k ekologické nerovnováze. Některé druhy rostlin jsou také považovány za invazivní, což vyvolává další biogenní rizika a jejich efekty byly také popsány jako příčina zvýšené eroze břehů (Colleran et al. 2020).

Opatření: Živé kůly a fašiny (svazky kletí či proutí)

Případová studie	Živé kůly a fašiny se v USA účinně používají ke zmírnění eroze a snížení rizika sesuvu v oblastech postižených požáry nebo k ochraně silniční infrastruktury. Původní druhy, jako je vrba a dřín, se běžně používají ke stabilizaci svahů. https://www.wsdot.wa.gov/publications/fulltext/Roadside/SoilBioEngAlternative.pdf V oblastech, jako je Nepál a Bhútán, se používají živé kůly a fašiny z původních druhů, jako je olše a vrba, ke zpevnění svahů a snížení sesuvů podél silnic a stezek ve strmých terénech. https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-012-0003-7 Podrobný přehled a empirickou studii z Thajska uvádí v diplomové práci Tadsuwan (2017): http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5922040455_8719_7216.pdf
Krátké shrnutí	Živé kůly a fašiny, jsou přírodě blízkým opatřením ke zmírnění nebezpečí (Richet et al. 2017), které zahrnuje výsadbu živých dřevních řízků nebo větví, obvykle z keřů nebo stromů, do svahů nebo oblastí náchylných k

	erozi a sesuvům. Tyto živé kůly zakořeňují a rostou, zpevňují půdní strukturu a stabilizují svah, čímž snižují riziko mělkých sesuvů.
Příklad případové studie	https://www.wsdot.wa.gov/publications/fulltext/Roadside/SoilBioEngAlternative.pdf https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-012-0003-7
Proveditelnost	Živé kůly a fašiny jsou obecně proveditelné v oblastech s vhodnými půdními a klimatickými podmínkami. Jsou adaptabilní pro širokou škálu krajin. Doporučuje se používat původní druhy.
Efektivita nákladů	Živé kůly a fašiny jsou často nákladově efektivní možností pro zmírnění sesuvů, protože mají nižší náklady na materiál a minimální požadavky na vybavení. Jsou zvláště účinné při zmírňování některých typů sesuvů, zejména těch, které jsou spojeny s povrchovou erozí a mělkými sesuvy. Živé kůly a fašiny po svém založení vytvářejí robustní kořenové systémy, které stabilizují půdu, zvyšují soudržnost a zvyšují pevnost ve smyku. Jsou také účinné při sesuvech vyvolaných erozí a sesuvech po lesních požárech, protože pomáhají obnovit vegetaci. Mohou být také použity pro snížení tečení na svazích. Specifické využití bylo nalezeno pro stabilizaci břehů podél řek a vodních toků, kde by jinak mohly vzniknout sesuvy v přilehlých oblastech. Stejně jako u jiných opatření může být jejich účinnost omezena na extrémně strmých svazích nebo v oblastech s častým narušováním.
Údržba	Údržba živých kůlů a fašin zahrnuje především sledování růstu rostlin, zajištění jejich zakořeňování a výměnu odumřelých nebo poškozených kůlů. Zásadní je dostatečné zavlažování a ochrana před okusem zvířat během zakládání.
Změna klimatu	Živé kůly a fašiny přispívají ke zmírňování změny klimatu tím, že sekvestrují oxid uhličitý prostřednictvím růstu rostlin. Kromě toho podporují přizpůsobení se změně klimatu tím, že snižují erozi, která může zhoršit sesuvy během extrémních meteorologických jevů, a poskytují celkové přínosy pro ekosystémy.
Jiná nebezpečí	Živé kůly a fašiny lze integrovat s dalšími protierozními opatřeními, jako jsou protipovodňové bariéry a hrázky, aby se zvýšila stabilita svahu a snížil objem plavených sedimentů. Zlepšený vegetační pokryv zvyšuje biologickou rozmanitost a poskytuje prostor pro život pro volně žijící živočichy. Kořenové systémy živých kůlů pomáhají regulovat průtok vody a v některých případech snižují riziko přívalových povodní. Účinky živých kůlů a fašin mohou být sníženy na strmých svazích a invazními druhy nebo chorobami. Úspěšná implementace závisí na zapojení komunity a průběžné údržbě.

Opatření: Hydroosev

Případová studie	Hydroosévání bylo ve Spojených státech široce používáno ke zmírnění sesuvů v kopcovitých oblastech a oblastech postižených požáry. Po lesních požárech pomáhá hydroosévání rychle založit vegetaci, aby se zabránilo sesuvům po požáru.
------------------	---

	Nový Zéland zavedl hydroosevní výsev v oblastech náchylných k erozi a sesuvům, zejména ve strmých terénech a podél dálnic, aby posílil stabilitu svahů.
Krátké shrnutí	Hydroosévání je technika stabilizace svahu používaná při zmírňování sesuvů (Chen et al. 2014) a kontrole eroze (Montoro et al. 2000), která představuje postřik směsí vody, semen, mulče a často stabilizátorů na erodovatelné svahy nebo svahy náchylné k sesuvům. Tato směs, známá jako hydrosemenná suspenze, podporuje růst vegetace, zvyšuje stabilitu, snižuje povrchovou erozi a minimalizuje riziko sesuvu.
Příklad případové studie	https://tme1.com/blog/when-hydroseeding-isnt-enough-stabilizing-steep-slopes-landslide-prone-terrain/ https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1099-145X(200007/08)11:4%3C315::AID-LDR394%3E3.0.CO;2-4
Proveditelnost	Hydroosevní práce je obecně proveditelná v oblastech s vhodným přístupem a zásobou vody. Při posuzování specifík dané lokality by se měly vzít v úvahu faktory, jako jsou půdní podmínky, sklon svahu a výběr osiva, aby se určila proveditelnost. Účinek hydroosevu na strmých svazích je poměrně omezený (https://tme1.com).
Efektivita nákladů	Hydroosévání může být nákladově efektivní ve srovnání s tradičními technickými řešeními. Jeho nákladová efektivita pramení ze snížených nákladů na materiál a pracovní sílu, rychlejší realizace a dlouhodobých výhod stabilizovaných svahů a snížené eroze. Hydroosévání je účinným opatřením ke zmírnění mělkých sesuvů tím, že zvyšuje soudržnost a smykovou pevnost, sesuvů vyvolané erozí vytvořením ochranného vegetačního krytu na svahu, sesuvů po lesních požárech rychlým zakládáním vegetace a kontrolou eroze. Hydroosevní práce může mít omezení při řešení hlubokých sesuvů nebo sesuvů způsobených faktory, jako je prosakování podzemních vod, geologické zlomy nebo intenzivní infiltrace srážek do hlubších vrstev.
Údržba	Udržování hydroosetých ploch vyžaduje pravidelné monitorování a případný opětovný výsev. Pravidelná kontrola a řízení invazních druhů mají zásadní význam pro zajištění trvalé účinnosti zmírňujících opatření. Emeka et al. (2021) uvádějí studii z Malajsie, která analyzuje různé účinky čtyř druhů semen. Výběr vhodného osiva pro konkrétní podmínky je zásadní. Xiao et al. (2017) uvádí experimentální studii, která zdůrazňuje roli specifického složení směsi používané pro stabilizaci svahů.
Změna klimatu	Hydroosévání přispívá ke zmírňování změny klimatu tím, že zachycuje oxid uhličitý prostřednictvím růstu rostlin a zlepšuje ukládání uhlíku do půdy. Podporuje přizpůsobení se změně klimatu tím, že snižuje erozi a obecně zvyšuje zadržování vody v krajině.
Jiná nebezpečí	Hydroosevní výsev může doplnit další protierozní opatření, jako jsou protipovodňové bariéry a hrázky, stabilizací svahů a snížením objemu plavených sedimentů do vodních ploch. Zlepšený vegetační pokryv zvyšuje biologickou rozmanitost a poskytuje prostor pro život volně žijícím živočichům. Hydroosevní činnost lze začlenit do opatření ke snížení povodňového rizika, protože stabilizované svahy jsou méně náchylné k erozi při silných deštích. Mezi omezení patří dostupnost vhodných osiva a půdních stabilizátorů a strmý nebo nepřístupný terén.

Sesuvy – hybridní opatření

Opatření: Dřevěné hrázky (woody dams)	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření použito:	Dřevěné hrázky byly celosvětově využívány jako účinná opatření ke zmírnění sesuvů. Mezi významné příklady patří jejich použití v italských Alpách, Japonsku, Španělsku nebo Spojených státech. Dolomity, Itálie: dřevěné hrázky, často postavené z klád, větví a suti, jsou umístěny v oblastech náchylných k úlomkotokům³ a sesuvům. Toto opatření je navrženo tak, aby zpomalilo odtok povrchové vody a zachycovalo nečistoty, čímž se snižuje možnost mělkých sesuvů během silných dešťů nebo tání sněhu. Japonsko: Japonsko zažívá časté silné deště a je náchylné k sesuvům, zejména v zalesněných oblastech. Dřevěné hrázky se používají ke snížení rizika sesuvů. Tyto přehrady pomáhají stabilizovat svahy a regulovat průtok povrchové vody, čímž snižují pravděpodobnost sesuvů. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004EO150001 Španělsko: V některých oblastech Španělska se používají dřevěné hrázky ke zmírnění eroze a mělkých sesuvů po lesních požárech. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611400336X Spojené státy americké: zejména v oblastech náchylných k požárům se dřevěné hrázky používají jako strategie zmírňování následků požárů a eroze. Lesní požáry mohou zvýšit riziko úlomkotoků a sesuvů v důsledku ztráty vegetace a změněných vlastností. https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/xxvi/1/109/137372/Long-Term-Landslide-Hazard-Mitigation-Programs
Krátké shrnutí	Propustné hrázky z různých materiálů (zejména klády či kámen) jsou přírodě blízká opatření používaná pro snížení rizika sesuvů a eroze. Tyto konstrukce se skládají z kmenů, větví a dalších dřevních zbytků strategicky umístěných ve svažitém terénu, aby se zmírnilo nebezpečí sesuvu. Jejich primárním účelem je zpomalit odtok povrchové vody, regulovat erozi a stabilizovat půdní a skalní svahy, čímž se snižuje možnost sesuvů.
Proveditelnost	Dřevěné hrázky jsou obecně považovány za proveditelné, zejména v zalesněných a kopcovitých terénech s dostatečnou dostupností původního dřevního materiálu. Vyžadují zásobu dřevního odpadu, který je v takových oblastech obvykle k dispozici. Jejich proveditelnost může být ovlivněna místními předpisy a územním plánováním, stejně jako dostupností kvalifikované pracovní síly pro výstavbu. UNISDR (2013) ukazuje, že hrázky lze použít v kombinaci se zalesňováním ke zmírnění nebezpečí sesuvů.
Efektivita nákladů	Nákladová efektivita netěsněných hrázek jako opatření ke zmírnění sesuvů se liší v závislosti na typu sesuvu a místních podmínkách. Jsou nákladově efektivní pro menší a mělké sesuvy a jsou zvláště výhodné v oblastech, kde tradiční technická řešení mohou být nepraktická nebo příliš drahá. Mohou také pomoci jako lapač sedimentů proti proudům a protierozní opatření, čímž nepřímo pomáhají zmírnit předpoklady pro sesuvy. U větších, hlubokých a strukturálně předpokládaných hlubokých gravitačních deformací svahů se může nákladová efektivita výrazně snížit a mohou být vyžadována další opatření.

³ Z anglického *debris flow* (suťový proud). Jedná se o proces při němž dochází k relativně rychlému pohybu masy netříděných úlomků hornin různých velikostí, zpravidla po dráze lineární prohlubně či koryta. Pojem úlomkotok je užíván i v české odborné literatuře, avšak mezi širokou veřejností není příliš znám

Flexibilita	Dřevěné hrázky mohou mít pozitivní interakce s jinými opatřeními ke zmírnění přírodních nebezpečí. Mohou například také pomoci snížit riziko povodní a přinést výhody pro kvalitu vody. Podobně mají synergický efekt pro kontrolu eroze v prostředí bez vegetace (většinou po požáru). Margiorou et al. (2022) prokázali jejich působení a stabilitu v dlouhodobém horizontu na místě zasaženém požárem před 20 lety. Je však nezbytné vzít v úvahu potenciální dopady po proudu, protože zvýšené zadržování sedimentů může vést ke zvýšení koryta řeky a souvisejícím povodňovým rizikům. To lze vyřešit hybridními hrázkami (Schwindt et al. 2018).
Údržba	Pravidelná údržba je nezbytná pro zajištění trvalé účinnosti netěsněných přehrad. To zahrnuje odstranění nahromaděných nečistot, zajištění správného průtoku vody a výměnu zhoršujícího se dřeva. Náklady na údržbu jsou obecně nižší ve srovnání se složitějšími technickými řešeními, ale vyžadují pracovní sílu, která pravidelně kontroluje a udržuje přehrady.
Změna klimatu	Hrázky pozitivně přispívají k přizpůsobování se změně klimatu tím, že snižují riziko rozptýlenými mělkých sesuvů, které mohou být zhoršeny zvýšenými srážkami a měnicími se srážkami. Pomáhají také zadržovat vlhkost v půdě, což může napomáhat regeneraci lesů a sekvestraci uhlíku, což přispívá k odolnosti vůči změně klimatu.
Příklad případové studie	https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004EO150001 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611400336X https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/xxvi/1/109/137372/Long-Term-Landslide-Hazard-Mitigation-Programs

Opatření: Terasy	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno	Terasy se používají po celém světě jako účinné opatření ke snížení nebezpečí sesuvů s významnými aplikacemi v Himalájích, Andách a jihovýchodní Asii nebo Středomoří, ale jsou také dobře známé ze zemědělských oblastí střední Evropy. Nepál: Kopcovitý terén Nepálu se vyznačuje rozsáhlým terasovým zemědělstvím. Terasy, známé jako „Dhan“ nebo „Ropai“, se v regionu běžně používají pro zemědělství. Tyto terasy umožňují zemědělcům nejen pěstovat plodiny na strmých svazích, ale také hrají roli při stabilizaci svahů a prevenci eroze, což pomáhá snižovat riziko sesuvů. https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-005-0025-y Indie: V oblasti indických Himalájí některé státy používají rozsáhlé terasovité zemědělské techniky na členitých svazích. Tyto terasy podporují pěstování plodin, jako je rýže, pšenice a kukuřice. Andy: Ve vysokohorských Andách v Peru nebo Bolívii se historicky používaly terasovité zemědělské techniky známé jako „andenes“. Jedná se o kamenné terasy využívané k zemědělským účelům. Zabraňují erozi, regulují odtok vody a stabilizují strmé svahy. https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=geologia
Krátké shrnutí	Terasy, často označované též jako lavicové terasy nebo vrstevnicové terasy, jsou přírodě blízká opatření, která se používají ke snížení rizika sesuvu. Tyto opatření zahrnují vytvoření vodorovných nebo mírně se svažujících plošin v

	kopcovitém nebo hornatém terénu, které regulují odtok povrchové vody, minimalizují erozi a stabilizují svahy, což v konečném důsledku zmírňuje riziko sesuvů.
Proveditelnost	Proveditelnost teras se liší v závislosti na terénu a místních ovlivňujících faktorech. V oblastech se strmými svahy a historií sesuvů jsou terasy často schůdnou možností. Faktory, jako je typ, vegetace a územní plánování, hrají klíčovou roli při určování jejich proveditelnosti. Jejich implementaci mohou ovlivnit také místní předpisy a zapojení komunity.
Efektivita nákladů	Hospodárnost teras jako opatření proti sesuvům je příznivá pro širokou škálu typů sesuvů. Jsou zvláště nákladově efektivní pro mělké sesuvy, úlomkotoky a pomalu se pohybující sesuvy. Terasy lze často stavět z lokálně dostupných materiálů, což snižuje náklady na výstavbu a je levnější než složitější technická řešení. Na druhou stranu bylo také konstatováno, že špatně vybudované zemědělské terasy mohou být náchylné k sesuvům (Galve et al. 2014; Ažman 2015; Wen et al. 2021) a s rostoucím rozsahem teras může být sesuvy postiženo více a trpět dalšími dopady.
Flexibilita	Terasy mohou dobře fungovat s dalšími opatřeními ke zmírnění přírodních rizik. Mohou například pomoci snížit riziko povodní tím, že kontrolují odtok povrchové vody a zlepšují infiltraci vody. Je nezbytné vzít v úvahu možné vlivy nebo dopady jako je sedimentace v řekách nebo změny kvality vody, a koordinovat je s dalšími strategiemi řízení rizik.
Údržba	Aby terasy zůstaly účinné, vyžadují pravidelnou údržbu. To zahrnuje zajištění funkčnosti odvodňovacích systémů, opravu poškozených teras a správu vegetace. Správná údržba je rozhodující pro jejich dlouhodobý výkon a může být nákladově efektivní ve srovnání s opravou nebo sanací sesuvu. Zásadní roli v jejich stabilitě hraje také plánování a projektování (suché stavby).
Změna klimatu	Terasy přispívají k adaptaci na změnu klimatu tím, že snižují erozi, zadržují vlhkost v půdě a podporují růst vegetace. Tyto vlastnosti zvyšují stabilitu a odolnost vůči extrémním povětrnostním jevům, včetně silných dešťů a zvýšených srážek, které mohou vyvolat sesuvy.
Příklad případové studie	https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..17.9680A/abstract https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=geologia https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-005-0025-y https://www.mdpi.com/2073-445X/11/7/963

Opatření: Poldry	
Některé příklady použití:	Zatímco poldry zadržující vodu jsou většinou budovány pro snížení rizika povodní, mohou být také použity v nížinných oblastech kvůli erozi břehů a pro kontrolu sesuvů, zadržování vody a snižování nebezpečí sesuvů v horských oblastech. Nížinné země Evropy: Poldry zadržující vodu, místně známé jako „waterbergingen“, se používají v Nizozemsku nebo Belgii. Tyto poldry jsou strategicky umístěny v oblastech náchylných k sesuvům, jako jsou zvlněné oblasti Limburgu, kde dočasně zadržují přebytečnou dešťovou vodu a zabraňují nasycení svahů a sesuvům. https://thinkhazard.org/en/report/2163-netherlands-limburg/LS

	Čína: Poldry jsou tradičním přístupem k řízení v nížinných oblastech Číny, ale mohou být také použity ke snížení rizika přesycených toků a rychlých mělkých sesuvů v horských i nížinných oblastech. https://www.xjtlu.edu.cn/en/news/2023/02/why-is-the-polder-landscape-an-important-water-heritage-of-china https://www.adrc.asia/publications/TDRM2003Dec/11_MR.%20HONGTAO%20WAN%20_FINAL_.pdf Andy: Poldry zadržující vodu se používají v oblastech s častým výskytem úlomkotoků a sesuvů. Tyto struktury zadržují přebytečnou vodu z přívalových srážek a jsou nedílnou součástí místních plánů na snížení rizika katastrof. https://www.fao.org/3/i2232e/i2232e.pdf
Krátké shrnutí	Poldry zadržující vodu jsou hybridní řešení primárně určená ke zmírnění nebezpečí povodní a nebezpečí nečistot, bahna a dalšího přesycení toků, ale mohou také pomoci při zmírňování nebezpečí sesuvů kontrolou hladiny vody v náchylných oblastech. Tyto umělé prohlubně nebo nádrže dočasně zadržují přebytečné srážky a povrchový odtok, čímž snižují nasycení svahů a tím minimalizují výskyt sesuvů.
Příklad případové studie	https://www.fao.org/3/i2232e/i2232e.pdf https://www.xjtlu.edu.cn/en/news/2023/02/why-is-the-polder-landscape-an-important-water-heritage-of-china
Proveditelnost	Proveditelnost poldrů zadržujících vodu jako opatření ke zmírnění sesuvů závisí na místní topografii, hydrologii a dostupné půdě. Jsou zvláště vhodné pro oblasti se sezónním nebo periodickým rizikem sesuvů, které jsou spouštěny silnými dešti (tajfun, monzun a další události), a kde je možné vytvořit prohlubně pro zadržování vody. Kromě topografie by posouzení proveditelnosti mělo brát v úvahu faktory, jako je vlastnictví, využití a dostupnost vhodných lokalit, protože poldry vyžadují určitou minimální plochu, aby byly účinné.
Efektivita nákladů	Poldry zadržující vodu jsou obecně nákladově efektivní pro širokou škálu typů sesuvů. Jsou zvláště výhodné pro mělké sesuvy, suťové proudy a oblasti s opakujícími se sesuvy vyvolanými srážkami. I když se počáteční náklady na výstavbu mohou lišit, dlouhodobá nákladová efektivita je příznivá ve srovnání s náklady spojenými se škodami způsobenými sesuvy a obnovou. Retenční nádrže mohou být strategicky umístěny v oblastech náchylných k mělkým sesuvům, aby zachytily a uložily přebytečné srážky nebo odtok, čímž se sníží infiltrace vody do svahu a zabráni se vzniku kritického pórového tlaku vody, který vyvolává sesuvy. S podobnými mechanismy mohou vodní retenční nádrže také poskytovat opatření ke zmírnění nebezpečí pro bahenní toky a úlomkotoky. V pobřežních oblastech mohou poldry v kombinaci s dalšími opatřeními (např. fašiny) pomoci snížit sesuvy na březích řek a pobřeží. Retenční poldry mohou zadržovat vodu nad podříznutými svahy vysečenými svahy, které se nacházejí v dopravní infrastruktuře, a poskytovat tak podporu při přívalových srážkách, které vyvolávají sesuvy svahů. V neposlední řadě mohou být použity k regulaci a hospodaření s přebytečnou vodou z dešťových nebo jiných zdrojů v těžebních lokalitách a odkalištích.
Údržba	Pravidelná údržba je nezbytná pro zajištění trvalé účinnosti poldrů zadržujících vodu. Údržbářské činnosti zahrnují bagrování za účelem odstranění nahromaděných sedimentů, kontrolu a údržbu odtokových struktur a zajištění řádného managementu vegetace. Správně udržované poldry pomáhají zachovat jejich funkčnost.
Změna klimatu	Poldry zadržující vodu významně přispívají k adaptaci na změnu klimatu tím, že snižují riziko sesuvů tváří v tvář zvyšujícím se srážkám a extrémním meteorologickým jevům. Řízením průtoku vody a snižováním nasycení svahů tyto konstrukce zvyšují odolnost vůči rizikům sesuvů souvisejícím s klimatem.

	Tyto účinky jsou však většinou zřejmé pro kontrolu povodňových rizik a zachování biologické rozmanitosti.
Jiná nebezpečí	Poldry zadržující vodu mohou dobře fungovat s jinými opatřeními ke zmírnění přírodních rizik, většinou s protipovodňovou ochranou a hospodařením s vodními zdroji. Pomáhají při řízení toku vody, což může snížit riziko sesuvů i povodní. Podobně jako u hrázek a terasování svahů by plány a návrhy poldrů pro zadržování vody měly jasně zohledňovat potenciální vlivy na sedimentární bilanci a interakce v měřítku záplavového území a povodí.

Opatření: Geotextilie na svahy	
Některé příklady použití:	 Obrázek 1: Example of biotechnical slope protection in Slovenia (Reference: Tomaž Cej, Rejda d.o.o.).
Krátké shrnutí	Bioinženýrská metoda stabilizuje povrch půdních svahů propletením kořenů, což maximalizuje průsak odtoku do zachycením dešťových srážek a zpomalením rychlosti odtoku (Ahn et al., 2002). Prevenici sesuvů pomocí geosyntetiky lze realizovat různými způsoby (Damians et al., 2023): • použití geotextilií a geomembrán k provádění bariérové funkce a/nebo filtrační funkce, která zabraňuje účinkům prosakování vody; • použití vysokopevnostní geosyntetiky ke zpevnění, čímž je stabilní i pro velmi strmé svahy; • použití georohoží a geobuněk pro udržení ornice na místě, čímž se zabrání sesuvu; • použití geokompozitních drenáží, které umožňují bezpečný rozptyl přebytečné dešťové vody, aniž by došlo k odplavení; • Aplikace geosyntetiky pro protierozní ochranu povrchů svahů s cílem podpořit růst nové vegetace a zajistit ukotvení ke kořenovým strukturám, čímž se zvýší jejich odolnost proti erozi při značném hydraulickém namáhání a dále se stabilizují svahy přírodními prostředky.
Příklad případové studie	Ve Slovinsku není biotechnický systém ochrany svahů využívající geosyntetický materiál příliš běžnou metodou používanou pro ochranu před sesuvem. Používá se spíše jako doplňkové opatření v kombinaci s dalšími opatřeními pro protierozní ochranu a stabilizaci umělých svahů.

Proveditelnost	Geosyntetika se kotví do výkopu o hloubce 150 mm a šířce 150 mm na vrcholu svahu a poté se rozvine podél svahu, aniž by se natáhla. Před umístěním pokrývek by měl být aplikován trvalý výsev (transportation.alberta.ca). Na základě (https://www.larimit.com/mitigation_measures/1021/) implementace tohoto opatření jsou následující výhody a nevýhody Výhody: • protierozní ochrana i v narušených oblastech, kde se vegetace zapojuje pomalu; • syntetické rohože lze použít jako výztuž pro zvýšení pevnosti v tahu do půdní matrice; • vhodné i podél strmých svahů (> 3:1 H:V) nebo svahových kanálů s vysokým průtokem vody Nevýhody: • není vhodné pro velmi strmé skalnaté lokality; • některé syntetické materiály mohou znečišťovat ovzduší/vodu, a pokud se používají ke stabilizaci břehů toků, představují hrozbu pro vodní druhy; • některé geotextilie jsou pevně tkané, což ztěžuje zakořenění travního semene do podkladové nebo utlumí rostliny během jejich růstu; • svahy musí být před instalací rovnoměrné a relativně hladké, aby byl zajištěn úplný kontakt s půdou. Související náklady na pracovní sílu mohou být vysoké.
Efektivita nákladů	Tyto systémy jsou multifunkční a relativně levné a pro instalaci nevyžadují složité vybavení. Udržování biotechnické ochrany svahů není náročné ani drahý, protože systém je samoobnovující (Ahn et al., 2002). Podle Damianse et al. přináší geosyntetika 2023 významné sociální, technické a funkční výhody ve srovnání s jinými metodami stabilizace jako je drenáž, výkop nebo nahrazení určitými zrnitými materiály nebo chemická stabilizace. Ve srovnání s tradičními metodami odvodnění (tj. pískem a štěrkem) je klíčovou výhodou to, že opatření na bázi geosyntetiky výrazně snižují požadovanou tloušťku vrstev kameniva ve srovnání s konvenčními řešeními.
Údržba	Geosyntetický materiál je buď biologicky odbouratelný (např. přírodní vlákna), nebo biologicky nerozložitelný (polyester, polypropylen nebo polyethylen). S pokrokem technologie se koncept a funkce biologicky nerozložitelných geotextilií a dalších geosyntetik staly preferovanou volbou. S technologickým pokrokem se koncept a funkce biologicky nerozložitelných geotextilií a dalších geosyntetik staly preferovanou volbou. Opakované terénní studie zkoumaly životní cyklus geosyntetik pozorovaných za UV záření, chemických a biologických podmínek. Díky svému složení z polymerů (např. polyester, polypropylen nebo polyethylen) se geotextilie staly praktickým a snadno udržovatelným produktem používaným v geotechnických aplikacích. Údržba geosyntetik prokázala, že geosyntetické materiály mají dlouhý životní cyklus, zejména ty, které nejsou biologicky odbouratelné. (Odkaz: https://bluestonesupply.com/pages/geosynthetics-how-do-they-prevent-landslides)
Změna klimatu	Použití geosyntetiky se stalo základním materiálem pro dosažení udržitelnosti životního prostředí. Geosyntetika jsou odolné polymery, které poskytují vysoký výkon a často přispívají k tomu, aby byly infrastruktury v mnoha ohledech udržitelnější (Damians et al., 2023).
Jiná nebezpečí	Mezi funkce a aplikace biotechnické ochrany svahů patří zpevnění, separace, odvodnění, filtrace a ochrana, které všechny podporují zmírnění sesuvů (Fang et al., 2023).

	Jedná se o jednu z metod zmírňujících opatření používaných pro kontrolu eroze a pro zabránění zranitelnosti svahu vůči pohybům svahových hmot (například: mělké sesuvy, malé skalní řícení).
--	--

Opatření: Mělké povrchové odvodnění (kombinace drenážních žeber a příkopů)	
Některé příklady použití:	 Obrázek 2: Stone drainage ribs have a dual function: (1) first as a drainage system on a slope and (2) then as a supporting structure. (Reference: Engineering geology Facebook).
Krátké shrnutí	Povrchová drenáž je hlavním opatřením při sanaci sesuvů. Jeho hlavním účelem je zachycovat a regulovat přímé povrchové vody (Mihalić Arbanas & Arbanas, 2015). Drenáž zvyšuje stabilitu a snižuje hmotnost kluzné hmoty. Drenáž může být buď povrchová, nebo podpovrchová. Opatření pro odvodnění povrchu vyžadují minimální konstrukci a náklady, mají také podstatné výhody pro stabilitu. Doporučují se na jakékoli potenciální nebo existující svahy (Highland a Bobrowsky, 2008). Povrchová drenáž může být realizována jako příkopy, kanály nebo potrubí.
Příklad případové studie	Povrchová drenáž zřídka stojí samostatně, obvykle doplňuje další inženýrská konstrukční opatření, jako jsou opěrné zdi, podpovrchová drenáž atd. Ve Slovinsku se povrchová drenáž používá také jako nouzové opatření kvůli nestabilitě svahů v důsledku dešťových srážek. Je efektivní a snadno implementovatelná. Může se stát problematickou, pokud povrchová drenáž není správně provedena a udržována nebo zůstává opuštěna. V tomto případě může mít tento zásah do svahu opačný účinek a vést k nevhodné distribuci vody na svahovitém povrchu. Níže jsou uvedeny některé příklady povrchové drenáže:



Obrázek 3: Surface ditches implemented in the upper part of landslide Betel (Jesenice, Slovenia) (Archive GeoZS).



Obrázek 4: Example of inappropriate implementation and maintenance of drainage system caused that surface water flows uncontrolled along the landslide and across the road (spring Urbas, landslide Urbas, Jesenice)..

Proveditelnost	Opatření pro odvodnění povrchu vyžadují minimální konstrukci a náklady a mají podstatné výhody pro stabilitu. Doporučují se na jakémkoli potenciálním nebo stávajícím svahu. Přestože je povrchová drenáž nízkonákladové a snadno proveditelné opatření, je nezbytné ho provádět s pečlivým zvážením, včetně předběžných průzkumů a projektových plánů.
Nákladová efektivita	Ve srovnání s jinými sanačními opatřeními má provádění povrchové drenáže obecně nejnížší náklady a nejvyšší účinnost opatření (Mihalić Arbanas & Arbanas, 2015).
Údržba	Údržba povrchových odvodňovacích systémů je zásadní pro zajištění jejich funkce a účinnosti. Chcete-li provést správnou údržbu, zvažte následující kroky: Pravidelné kontroly, pravidelné čištění a odstraňování nánosů, opravy, Údržba je jednoduchá, levná a obvykle nevyžaduje sofistikované vybavení.
Změna klimatu	Realizace povrchové drenáže nemá žádný přímý vliv na změnu klimatu. V důsledku změny klimatu se očekává zvýšení četnosti a intenzity srážek, a tím i

Evaluation of hazard-mitigating hybrid infrastructure under climate change scenarios

	zvýšení nestability svahů. V důsledku toho bude povrchová drenáž hrát důležitou roli při prevenci a sanaci sesuvů. Na druhou stranu drenáž způsobuje odvodnění svahu a tím může zhoršit i retenci vody v krajině.
Jiná nebezpečí	Povrchová odvodňovací opatření mají obecně pozitivní vliv na stabilitu svahů, zejména protierozní a záplavové.

Sesuvy – šedá opatření

Opatření: Flexibilní bariéry	
Některé příklady použití:	 Obrázek 5: Flexible net barrier in Lukenjski graben torrent in Slovenia (Jošt Sodnik).
Krátké shrnutí	Flexibilní bariéry slouží jako účinná ochrana proti sesuvům, zejména proti úlomkotokům nebo skalnímu říčení. Tento typ zmírňujícího opatření je velmi flexibilní a silně deformovatelný, díky čemuž je vhodný pro absorpci dynamických rázových zatížení (Volkwein et al., 2011). Typický flexibilní systém ochrany proti skalnímu říčení se skládá z ocelové sítě připevněné podélně k tzv. nosným lanům (Volkwein et al., 2011). Výhody flexibilních bariér spočívají v tom, že se relativně snadno instalují do strmého přírodního terénu, jsou vizuálně méně nápadné a mají menší dopad na životní prostředí ve srovnání se železobetonovými bariérami (Choi a Cheung, 2013).
Příklad případové studie	Zatímco flexibilní bariéry se používají již více než dvacet let jako ochranné opatření proti pádu balvanů a kamení, aplikace flexibilních bariér pro odolávání dopadu přírodních terénních sesuvů je relativně novým konceptem (Choi a Cheung (2013). Flexibilní ocelové síťové bariéry se běžně používají v horských oblastech ke zmírnění geologických rizik, jako jsou skalní říčení a úlomkotoky (Wendeler et al. 2006). Choi a Cheung (2013) představují soubor zmírňujících opatření, která byla uplatněna v Hongkongu.
Proveditelnost	Je důležité zvolit vhodné zmírňující opatření na základě konkrétních podmínek prostředí a charakteristik průtoku vody v dotčené oblasti. Pevné hrázky jsou vhodné pro oblasti, kde je vyžadováno stabilní a dlouhodobé opatření, zatímco flexibilní bariéry se lépe přizpůsobují měnícím se podmínkám a jsou vhodnější v oblastech s častými událostmi, které vyžadují rychlou reakci a údržbu. Flexibilní síťové bariéry jsou velmi vhodné pro odlehlé a těžko přístupné oblasti.
Efektivita nákladů	Podle Volkweina et al. (2015) slouží flexibilní síťové bariéry jako nákladově efektivní opatření ke zmírnění dopadů sesuvů. Ve srovnání s přísnými zmírňujícími opatřeními (Hu et al., 2020; Su et al., 2021) lze snadno a hospodárně instalovat, udržovat a vyměňovat flexibilní bariéry, zejména v horských oblastech. Nákladová efektivita těchto zmírňujících opatření však závisí na několika faktorech, jako je účel (skalní říčení, úlomkotoky, přivalové povodně atd.), konstrukce bariéry (kapacita, energetická zátěž atd.), umístění (hory, městská oblast, těžko přístupné oblasti atd.), instalace, údržba a místní podmínky (vystavení UV záření, kolísání teplot atd.).
Údržba	Flexibilní bariéry jsou navrženy tak, aby odolaly dynamickému i statickému rázovému zatížení. Vyžadují neustálou údržbu, aby byl zajištěn optimální výkon, včetně pravidelného čištění za účelem odstranění vegetace a drobných událostí. Po jakékoli významné nárazové události je nezbytné provést kontroly

	a údržbu. Je důležité si uvědomit, že flexibilní bariéry se mohou během nárazu deformovat (Vicari et al., 2021).
Změna klimatu	Výhody flexibilních bariér spočívají v tom, že se relativně snadno instalují do strmého přírodního terénu, méně vizuálně obtěžují a mají menší dopad na životní prostředí ve srovnání se železobetonovými bariérami (Choi a Cheung, 2013).
Jiná nebezpečí	S flexibilními sít'ovými bariérami můžete chránit oblast před různými pohyby svahových hmot, jako je skalní řícení, úlomkotoky, přívalové povodně a/nebo jejich kombinace.

Opatření: Hrázky

Některé příklady použití:



Obrázek 6: Sekvence hrázek (Koroška Bela, Jesenice, Slovenie).

Krátké shrnutí

Hrázky jsou malé hráze pro ukládání sedimentů budované v korytech strmých roklí kvůli jejich stabilizaci. Běžně se používají k redukci frekvence a objemu úlomkotoků (Highland a Bobrowsky, 2008). Hrázky jsou příčné inženýrské konstrukce různé velikosti a výšky, které jsou konstruovány z různých materiálů, jako jsou betonové bloky, sypké kameny, kameny v gabionových koších nebo dřevo (Lucas-Barja et al., 2021). Hrázky jsou nejdůležitějším kontrolním opatřením, protože snižují rychlost proudění vody a omezují erozi, zachycují sedimenty, stabilizují břehy roklí a regulují sesuvy na svazích kopců (Castillo et al., 2014, Mekonnen et al., 2015; Quiñonero-Rubio et al., 2016).

Příklad případové studie

Přehled literatury ukázal, že mnoho studií představuje různé případové studie, kde byly hrázky zavedeny jako strukturální opatření ke zmírnění sesuvů. Nejnovější:

	Jedna z nejnovějších studií k hrázkám byla prezentována Zhou et al., 2023. Ukazuje hodnotící analýzu hrázek a zalesňování kvůli zmírňování úlomkotoků na základě studie lokality Loagan Gully v Číně. Ve Slovinsku byly realizovány hráčky s retenčním objemem 14 000 m³ v soutěskách Brezovški a Lukenjski pod lyžařským areálem Krvavec (Bezák et al., 2020).
Proveditelnost	Hrázky jsou často budovány v kaskádě, aby se snížila eroze dna, transport sedimentů, rychlost proudění a destabilizace břehů (Zeng et al., 2009). I když jsou hráčky navrženy s ohledem na geomorfologické podmínky po analýze minulých událostí, nemusí být reprezentativní pro budoucí události (Hübl et al., 2005).
Efektivita nákladů	Hrázky slouží různým účelům a jsou považovány za nákladově efektivní a dlouhodobé zmírňující opatření. Retenční přehrady slouží různým účelům a jsou považovány za nákladově efektivní a dlouhodobé opatření ke zmírnění dopadů. Kromě ochrany před sesuvy se používají také pro regulaci bystřin, zlepšení zásobování vodou, rozvoj zemědělské a obnovu povodí. Konstrukce konkrétních ochranných hrází a jejich nákladová efektivita se liší v závislosti na kontextu prostředí. Přehled efektivnosti hrázek je podrobně znázorněna v Lucas Barja et al. (2023): The diagram illustrates the effectiveness of check dams across different time scales and functions. It is organized into three main sections: Hydrology, Geomorphology, and Ecology. The diagram shows the progression of a check dam from an empty state to a fully integrated system over time, with a vertical axis labeled 'Time' and a horizontal axis labeled 'Time general direction'. Hydrology Functions: WATER STORAGE, GROUNDWATER RECHARGE, RUNOFF CONTROL, DEBRIS FLOW REGULATION*. The diagram shows side view (AA) and transverse view (BB) of a check dam. The functions include water storage (transient), peak flow buffering, and infiltration during storage. Geomorphology Functions: SEDIMENT RETENTION, CHANNEL STABILIZATION, HILLSLOPE CONSOLIDATION*. The diagram shows the progression from an empty check dam to a state with sediment retention, channel stabilization, and hillslope consolidation. The functions include sediment retention (upstream), jet scouring (at check dam toe), and sediment starvation, incision (downstream). Ecology Functions: VEGETATION RESTORATION, LAND RECLAMATION**. The diagram shows the progression from bare soil to a state with vegetation growth and land reclamation. The functions include organic matter sedimentation and carbon sequestration. Time Scales: Flood time-scale: Shows the immediate effects of a flood, including water storage, peak flow buffering, and infiltration during storage. The diagram shows the progression from an empty check dam to a state with water storage, peak flow buffering, and infiltration during storage. Check dam filling time-scale: Shows the effects of sediment retention and channel stabilization over time. The diagram shows the progression from an empty check dam to a state with sediment retention, channel stabilization, and hillslope consolidation. Life-cycle time-scale: Shows the long-term effects of vegetation restoration and land reclamation. The diagram shows the progression from bare soil to a state with vegetation growth and land reclamation. Legend: AA: Side view, BB: Transverse view. The diagram uses AA and BB to indicate the side and transverse views of the check dam. Footnotes: * Rather specific to alpine catchments (debris flows and debris floods) ** Rather specific to catchments with very fine sediment transport (e.g., loess plateau in China)

Údržba	Vyžadují rozsáhlou údržbu po událostech s vysokou rychlostí proudění (zejména u vysokogradientových koryt). Zejména se doporučuje, aby byly přehrady kontrolovány minimálně jednou týdně, před předpovídanými dešti, denně během delších dešťů a po skončení dešťových událostí. Musí se vyměňovat chybějící kameny či jiné konstrukční komponenty (pytle, role atd.). Je nutné měnit kameny, pytle nebo role, které degradovaly nebo se poškodily (California Stormwater BMP Handbook Construction, 2009). Pokud se hrázky zřítí nebo částečně poškodí v důsledku extrémních událostí, špatné údržby a/nebo jejich nesprávné lokalizace, uvolněné bystrinné sedimenty z těchto struktur mohou zhoršit hydrologický dopad záplav a katastrofy souvisejících se sedimenty v oblastech po proudu, což vede ke katastrofickému jevu podobnému selhání sesuvné hráze (Wang, 2013; Zhang et al., 2019; Motagh a Akhemi, 2023).
Změna klimatu	Do budoucna se očekává nárůst výskytu extrémních srážek a s nimi i výskyt pohybů svahových hmot spojených s intenzivními srážkovými událostmi. Podle Luana et al. (2022) budou hrázky hrát důležitou roli při adaptaci na změnu klimatu. Zhou et al. (2023) také představili kombinaci hrázky a zalesňování jako nejdůležitější kontrolní opatření.
Jiná nebezpečí	V závislosti na struktuře a tvaru hrázky se její cíle a funkce mohou lišit (Zhou et al., 2023). Je známo, že přehrady účinně chrání níže po proudu před povodněmi tím, že regulují vypouštění vody v horním úseku řeky. Méně častým využitím hrázky je kontrola odtoku a mělkých sesuvů ve zdrojové oblasti úlomkotků (Highland a Bobrowsky, 2008).

Opatření: Hlubkové odvodnění (podpovrchová drenáž)

Některé příklady použití:	 Obrázek 7: Drainage wells (landslide Slano Blato, Slovenia).
Krátké shrnutí	Drenáž je hlavním opatřením používaným při sanaci sesuvů (Hutchinson, 1977). Účelem podpovrchové drenáže je snížit prosakovací sílu snížením pórových tlaků. Podpovrchová drenáž může být vytvořena z: drenážních studní (Pulko et al., 2012), horizontálních drenáží (Cook et al., 2012), drenážních tunelů (Yan et al., 2019) atd.

	Podpovrchová drenáž je často kombinací opatření, jako jsou drenážní studny s horizontálními odtoky (Cotecchia, 2020) nebo drenážní studny a podpůrné kesony (Pulko et al., 2012). Drenážní systém nejčastěji pracuje gravitací, ale někdy se k odstraňování vody ze studní používají čerpadla. Horizontální odtoky: Horizontální odtoky jsou nejčastěji používanými hlubokými drenážemi a obvykle se používají, když je výkop drenážního příkopu náročný kvůli problémům s hloubkou nebo stabilitou během výkopu. Tyto odtoky jsou tvořeny řadou vodorovných vrtů opatřených perforovanou (plastovou) trubicí, typicky o průměru 120 až 150 mm, paralelně s ventilátorem. Typický úhel instalace je nastaven na 2 až 5 ° nad vodorovnou rovinou, aby se usnadnilo gravitační proudění vody. Instalace filtrační vrstvy je přinejlepším problematická, takže geosyntetické filtry by mohly být omotány kolem drenážního potrubí. Odvodňovací studny a vertikální odtoky malého průměru: Podpovrchové studny se používají k odvodnění nestabilních svahů, když požadované hloubky znemožňují výstavbu odvodňovacích příkopů. V některých případech jsou menší drenážní studny umístěny tak blízko, že se překrývají a vytvářejí propojený drenážní systém připomínající odvodňovací příkop. Pro připojení drenážní studny a odvádění vody ze studní je vyvrtán horizontální odtok, nebo se k čerpání vody ze studní používají čerpadla, pokud horizontální odtok není možný. Odvodňovací tunely, štoly: Odvodňovací tunely se používají tam, kde výstavba drenážních studní není ekonomicky proveditelná. Často se používají k sanaci velkých hlubokých sesuvů v dálničních a hydroenergetických projektech. Odvodňovací tunely jsou často kombinovány s drenážními vrtly (vertikální nebo subhorizontální).
Příklad případové studie	Existuje mnoho případových studií pro různé aplikace hluboké drenáže: Shrestha et al., 2008, studovali podzemní odtok při sesuvu Nuta-Yone v Japonsku a důvody sesuvu pro různé horizontální drenáže a hledali potenciálně lepší lokality pro budoucí sanační opatření sesuvu. Pulko et al., 2012 prezentovali využití drenážních vrtů pro sanaci dvou slovinských hlubokých sesuvů (Slano blato a Macesnik). Yan et al., 2019 prezentovali účinnost drenážního tunelu pro stabilizaci sesuvu Donglingxing poblíž nádrže vodní elektrárny Sanbanxi v Číně.
Proveditelnost	Podpovrchová drenáž je možná pouze tam, kde průzkum terénu odhalí přítomnost vody a projektové studie prokážou významné snížení potenciálu poruch. Výstavba studní by mohla být problematická v případě aktivních sesuvů (Pulko et al., 2012). Odvodňovací štoly jsou budovány ve stabilním podloží a do sesuvného tělesa jsou vrtány svislé drenáže. Horizontální i vertikální drenáže je možné odstříhnout od drenážního systému v případě velkých sesuvných pohybů a nutnosti rekonstrukce.
Efektivita nákladů	Podpovrchové drenáže jsou obvykle nákladově efektivním opatřením pouze v případě rozsáhlých hlubokých sesuvů, a proto se používá téměř výhradně při velkých projektech, jako jsou výstavby dálnic a vodních elektráren.
Údržba	Použití drenáže jako dlouhodobého řešení představuje značnou výzvu, protože vyžaduje pravidelnou a nákladnou údržbu, aby byla zajištěna jejich trvalá funkčnost (Bromhead, 1992).

	Horizontální a vertikální trubky je často nutné převrtat kvůli ucpání a/nebo poškození v důsledku sesuvů. Monitoring podzemních vod je nutný k ověření designu a prokázání jeho funkčnosti. Elektrická čerpadla potřebují ke správnému fungování neustálé elektrické napájení a údržbu.
Změna klimatu	Očekává se, že změny klimatu zvýší četnost „extrémních“ srážek. To má za následek snížení stability přirozených svahů (Bernardie et al., 2021). Vzhledem k tomu, že systémy hluboké drenáže jsou často navrženy tak, aby pouze omezovaly pohyby hmoty nebo umožňovaly reaktivaci při „extrémních“ srážkách, zvýšení četnosti takových událostí může odhalit nedostatky v současném návrhu.
Jiná nebezpečí	Odvodňování by mohlo změnit průtok vody a vysušit studny pro zavlažování nebo zásobování pitnou vodou, nebo by mohlo změnit vodní podmínky na povrchu do té míry, že již nepodporuje jedinečné rostlinné společenstvo (Popescu a Sasahara, 2009). Odtok z drenážního systému by mohl mít za následek lokální problém s erozí v případě, že není správně navržen. Podzemní voda by mohla být kontaminována a mohla by změnit povrchové vody.

Opatření: Úprava geometrie svahu

Některé příklady použití



Obrázek 8: Slope reshaping at landslide Slano Blato (Slovenia). Smoother slopes at front are reshaped, rougher slopes at back are natural slopes after activation of landslide..

Krátké shrnutí

Přetváření sesuvného tělesa je druhou nejpoužívanější metodou sanace sesuvů (Hutchinson, 1977).

Změnou geometrie svahu lze zvýšit odporové síly nebo snížit hnací síly. Obě metody zvyšují stabilitu svahů. Predispozice k sesouvání se snižují změnou tvaru nebo snížením sklonu svahu. Zatěžováním špičky sesuvu se zvyšují odporové síly. Běžně se nakládka provádí z kamenné výplně (opěry).

	Poznámka: Některé úpravy svahů se provádějí v případě jiných podpůrných prvků.
Příklad případové studie	Sesuvy Slano Blato.
Proveditelnost	Snížení sklonu svahu je možné v případě, že oblast sesuvu je relativně ploché. Musí být připraveny velké skládky vytěženého materiálu. Snížení sklonu svahů pro aktivovaný sesuv při stavbě silnice by mohlo být problematické kvůli omezením spojenými s dostupností pozemků. Skalní opěry jsou možné v případě, že je na úpatí sesuvu kvalitní podloží.
Efektivita nákladů	Efektivita nákladů závisí na geometrii pozemku a je třeba ji porovnat s jinými alternativními řešeními (odvodnění, opěrné zdi atd.).
Údržba	Počáteční korekce sklonu v případě, že došlo k erozi. Pozdější sekání trávy, sekání keřů atd. V některých případech je nutný monitoring sesuvných pohybů.
Změna klimatu	Očekává se, že změny klimatu zvýší četnost „extrémních“ srážek. To má za následek snížení stability přirozených svahů (Bernardie et al., 2021). Stejně tak by měla být snížena stabilita sanovaných svahů.
Jiná nebezpečí	V případě málo odolných hornin (weak/soft rocks) by zvětrávání mohlo snížit pevnost horniny a způsobit reaktivaci sesuvu. Nově vybudované svahy jsou náchylné k erozi.

Opatření: Opěrné konstrukce

Některé příklady použití:	 Obrázek 9: Anchored pile wall on highway Razdrto-Vipava (landslide Rebernice, Slovenia) (photo B. Pulko).
Krátké shrnutí	Opěrné konstrukce zvyšují odporové síly na patě sesuvu. Existuje mnoho možností, například: gravitační opěrné zdi (zdívo, crick-block walls ⁴ , gabionové stěny*, železobetonové stěny), konzolové nebo kotvené pilířové stěny, kesonové nebo štětové stěny atd.

⁴ Jedná se o prefabrikované betonové či umělohmotné mřížové matrice ve tvaru konzolových stěn, v nichž lze každý rám (otvor) vyplnit šterkem či vegetací. Dále používáme pojem konzolové stěny.

	Opěrné zdi podpírají zeminu přes váhu konstrukce a s tuhostí a pevností konstrukce přenášejí zatížení ze země za konstrukcí (O'Rourke a Jones, 1990). Často jsou nakloněny proti svahu, aby se snížily síly působící na svah a momenty převrácení. Konzolové stěny využívají tíhu zeminy či jiné výplně ke snížení momentů při převrácení. Pilířové nebo podobné stěny zajišťují přenos sil do hlubších vrstev terénu. Pilíře musí samy odolávat ohybovým momentům způsobeným působením. U ukotvených pilířových stěn se část působení zeminy přenáší pomocí kotev do stabilního podloží, aby se snížily ohybové momenty v konstrukcích. * popsáno v samostatných kapitolách.
Příklad případové studie	Sesuv Rebernice na dálnici Razdrto-Vipava ve Slovinsku byl stabilizován řadou pilířových stěn (Pulko et al., 2005).
Proveditelnost	Opěrné konstrukce jsou poměrně dobře popsány a snadno realizovatelné. Tyto struktury jsou relativně pevné, ale pokud by došlo k významným sesuvům, mohou prasknout či být jinak poškozeny. Konzolové stěny a gabionové stěny jsou naopak flexibilnější a mohou odolávat dílčím deformacím. Opěry je třeba neustále sledovat, aby byla zajištěna správná funkce. V případě, že je síla působící materiálem vyšší než návrhová, je třeba nainstalovat další opěry.
Efektivita nákladů	Nákladová efektivita závisí na velikosti konstrukce. Opěrné stěny jsou nákladově nejefektivnější, ale mohou být postaveny pouze v malých výškách. Náklady na konzolové stěny by mohly být problematické kvůli relativně velkým výkopům a podpoře potřebné během výkopů. Pilířové stěny jsou nejdražší, ale umožňují sanaci hlubokých sesuvů. Zpevnění je obvykle nákladově efektivnější než opěrné stěny (Sahu et al., 2021).
Údržba	Správně navržené opěrné konstrukce vyžadují minimální údržbu. Některé opravy mohou být nutné kvůli degradaci materiálu, zejména v případě betonu. Plevel, mráz a soli jsou primárními faktory přispívajícími k degradaci materiálu. Opěrné konstrukce mohou být postaveny s drenážními systémy, které musí být pravidelně udržovány, aby byla zajištěna jejich správná funkce. Větší opěrné konstrukce nebo konstrukce zajišťující kritickou infrastrukturu musí projít monitorováním, aby se zjistily případné deformace. U opěrných pilířových stěn je třeba měřit opěrné síly a pravidelně kontrolovat opěrné hlavy, zda nejsou poškozené. Poškozené opěry je třeba vyměnit.
Změna klimatu	Očekává se, že změny klimatu zvýší četnost „extrémních“ srážek. To má následně za následek snížení stability přirozených svahů (Bernardie et al., 2021). Stejně tak by měla být snížena stabilita sanovaných svahů.
Jiná nebezpečí	Není relevantní.

Opatření: Modifikace mechanických vlastností zeminy v terénu

Některé případy použití:



Obrázek 10: Anchored reinforced concrete frame on highway Razdrto-Vipava (landslide Rebernice, Slovenia) (photo B. Pulko).

Krátké shrnutí	Zpevnění lze použít ke zvýšení vnitřní pevnosti zásypu. U geopásové nebo geomřížové geosyntetiky se smykové síly přenášejí na stabilní zemní těleso. Používají se k obnově svahů po sesuvu. Ke stabilizaci sesuvu se používá hřebíkování zeminy nebo předpjaté opěrné železobetonové nosníky. Svislá stěna by mohla být vyrobena pomocí gabionů nebo betonového obkladu. Hřebíkování zeminy zvyšuje smykovou odolnost zeminy a málo odolných hornin instalací ocelových tyčí. Stabilita povrchu je zajištěna torkretováním vyztuženým ocelovou drtí. Používá se hlavně při dočasných výkopech, protože ocelové zemní hřebíky nejsou odolné proti korozi nebo oblasti s potenciální nestabilitou. Zemní opěry jsou podobné zemním hřebíkům, ale jsou předepnuté. Místo ocelových tyčí se používají ocelové dráty. Obvykle existuje "volná" část, kde nedochází k třecímu kontaktu s okolní půdou/horninou, a "ohraničená" část, která je injektována, aby se vytvořil dobrý kontakt s okolní půdou/horninou. Betonový rám se běžně používá k přenosu opěrných sil do zeminy.
Příklad případové studie	Turner a Jensen (2005) popisují hřebíky používané ke stabilizaci aktivního sesuvu na dálnici ve Wyomingu v USA. Nguyen et al. (2020) popisují zemní opěry používané ke stabilizaci hlubokého sesuvu Thong Nhat ve Vietnamu. Rimoldi et al. (2021) uvádí příklad výztuže zeminy používané pro obnovu svahů po aktivaci sesuvu v Asii.
Proveditelnost	Zemní hřebíky a zemní opěry jsou relativně pevné a nemohou pojmout větší sesuvy. Nedávný vývoj navrhl specializované konstrukce, které lze přizpůsobit větším pohybům terénu (Brezzi et al. 2021). Obecně se má za to, že trvalé opěrné systémy mají životnost 75 až 100 let. Aby byla zajištěna správná funkce, je třeba je neustále sledovat. V případě, že je síla působící materiálem vyšší než návrhová, je třeba nainstalovat další opěry. Poškození opěrné hlavy může způsobit problémy s korozi. Hřebíky jsou náchylné ke korozi.
Efektivita nákladů	Výztuž zeminy se ukázala jako efektivnější z hlediska doby výstavby a nákladů ve srovnání s jinými řešeními (Rimoldi et al. 2021).

Evaluation of hazard-mitigating hybrid infrastructure under climate change scenarios

	Zemní opěry jsou spolehlivým, ale nákladným opatřením ke stabilizaci sesuvů půdy ve srovnání s jinými opatřeními. Ve srovnání s hřebíky poskytují zemní opěry větší odolnost proti sesuvu a používají se hlavně pro větší sesuvy půdy.
Údržba	U předpjatých zemních opěr je třeba měřit síly a pravidelně kontrolovat opěrné hlavy, zda nejsou poškozené. Poškozené opěry je třeba vyměnit.
Změna klimatu	Očekává se, že změny klimatu zvýší četnost „extrémních“ srážek. To má za následek snížení stability přirozených svahů (Bernardie et al. 2021). Stejně tak by měla být snížena stabilita sanovaných svahů.
Jiná nebezpečí	Není relevantní.

References

- Ahn, T.B., et al. (2002). Stabilization of soil slope using geosynthetic mulching mat. Geotextiles and Geomembranes, [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00002-X).
- Bezák, N., Jež, J., Sodnik, J., Jemec Auflič, M., Mikoš, M. (2020). An extreme May 2018 debris flood case study in northern Slovenia: analysis, modelling, and mitigation. Landslides, 17, 2373-2383. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01325-1>.
- Bouroullec, I. (2021). Modelling landslide hazards under global changes: the case of a Pyrenean valley, Natural Hazards Earth Systems Science, 21, 147–169.
- Brezzi, L., Bisson, A., Pasa, D., & Cola, S. (2021). Innovative passive reinforcements for the gradual stabilization of a landslide according with the observational method. Landslides 18:2143-2158.
- Bromhead, E.N. (1992). The stability of slopes. Blackie Academic and Professional, London: 217.
- Castillo, V. M., Mosch, W. M., García, C. C., Barberá, G. G., Cano, J. N., López-Bermúdez, F. (2007). Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). Catena, 70(3), 416-427. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.11.009>.
- Carlyle-Moses, D.E., Gash, J.H.C. (2011) Rainfall interception loss by forest canopies, chapter Forest Hydrology and Biogeochemistry, Ecological Studies, 216, Springer, pp. 407-423.
- Chen, Y.C., et al. (2014). Mechanisms of Forest Restoration in Landslide Treatment Areas. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su6106766>.
- Choi, K. Y., Cheung, R. W. (2013). Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5(5), 354-365. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.007>.
- Colleran, B., et al. (2020). Invasive Japanese knotweed (*Reynoutria japonica* Houtt.) and related knotweeds as catalysts for streambank erosion. River Research and Applications. <https://doi.org/10.1002/rra.3725>.
- Cook, D., Santi, P., Higgins, J. (2012). Prediction of piezometric surfaces and drain spacing for horizontal drain design. Landslides 9:547-556.
- Cotecchia, F., Petti, R., Milella, D., Lollino, P. (2020). Design of Medium Depth Drainage Trench Systems for the Mitigation of Deep Landsliding. Geosciences 10: 1-24.
- Damians, I.P., et al. (2022). Sustainability of Geosynthetics-Based Landslide Stabilization Solutions. Progress in Landslide Research and Technology, Volume 1 Issue 1, https://doi.org/10.1007/978-3-031-16898-7_14.
- Emeka, O.J., et al. (2021). Evaluation of the Effect of Hydroseeded Vegetation for Slope Reinforcement. Land, <https://doi.org/10.3390/land10100995>.
- Fang, K. et al. (2023). Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review. Geoscience Frontiers, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101493>.
- Galve, J.P., et al. (2015). Assessment of shallow landslide risk mitigation measures based on land use planning through probabilistic modelling. Landslides, <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0478-9>.
- Highland, L. M., Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia, CO: U.S. Geological Survey (USGS) National Landslide Information Center (NLIC). <https://doi.org/10.3133/cir1325>.
- Hu, H., Zhou, G. G., Song, D., Cui, K. F. E., Huang, Y., Choi, C. E., Chen, H. (2020). Effect of slit size on the impact load against debris-flow mitigation dams. Engineering Geology, 274, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105764>.
- Hutchinson, N. (1977). Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 16: 131–155.
- Hübl, J., Holub, M., Suda, J. (2005, November). Structural mitigation measures. In 3rd Probabilistic Workshop: Technical Systems+ Natural Hazards, edited by: Bergmeister, K., Rickenmann, D., Strauss, A., Wieshofer, S., Curbach, M., and Proske, D., Universität für Bodenkultur, Department für Bautechnik und Naturgefahren (pp. 115-126).
- Lucas-Borja, M. E., Piton, G., Yu, Y., Castillo, C., Zema, D. A. (2021). Check dams worldwide: Objectives, functions, effectiveness and undesired effects. Catena, 204, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105390>.
- Margiorou, S., et al. (2022). Pre/Post-Fire Soil Erosion and Evaluation of Check-Dams Effectiveness in Mediterranean Suburban Catchments Based on Field Measurements and Modeling. Land, <https://doi.org/10.3390/land11101705>.

- Mekonnen, M., Keesstra, S. D., Stroosnijder, L., Baartman, J. E., Maroulis, J. (2015). Soil conservation through sediment trapping: a review. *Land degradation & development*, 26(6), 544-556. <https://doi.org/10.1002/ldr.2308>.
- Mihalić Arbanas, S., et al. (2015). Landslides: A Guide to Researching Landslide Phenomena and Processes. *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering*, 10.4018/978-1-4666-7336-6.
- Montoro, J. A., et al. (2000). Three hydro-seeding revegetation techniques for soil erosion control on anthropic steep slopes. *Land Degredation & Development*, [https://doi.org/10.1002/1099-145X\(200007/08\)11:4<315::AID-LDR394>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1099-145X(200007/08)11:4<315::AID-LDR394>3.0.CO;2-4).
- Motagh, M., Akhiani, H. (2023). The cascading failure of check dam systems during the 28 July 2022 Emamzadeh Davood flood in Iran. *Natural Hazards*, 116(3), 4051-4057. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05814-4>.
- Nguyen, L.C., Tien, P.V., Do, TN. (2020). Deep-seated rainfall-induced landslides on a new expressway: a case study in Vietnam. *Landslides* 17: 395–407.
- Papathoma-Köhle, M., Glade, T. (2013) The role of vegetation cover change for landslide hazard and risk. In: Renaud FG, Sudmeier-Rieux K, Estrella M (eds) *The role of ecosystems in disaster risk reduction*. UNU-Press, Tokyo, pp 293–320
- Popescu, M. E., Sasahara, K. (2009). Engineering Measures for Landslide Disaster Mitigation. In. *Landslides Disaster Risk Reduction*: 609-631.
- Pulko, B., Majes, B., Mikoš, M. (2014). Reinforced concrete shafts for the structural mitigation of large deep-seated landslides: an experience from the Macesnik and the Slano blato landslides (Slovenia). *Landslides* 11: 81–91.
- Pulko, B., Popović, Z., Majes, B. (2005). Stability analysis and rehabilitation measures of landslide Rebernice. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*: 2563-2566.
- Quiñonero-Rubio, J. M., Nadeu, E., Boix-Fayos, C., de Vente, J. (2016). Evaluation of the effectiveness of forest restoration and check-dams to reduce catchment sediment yield. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1018-1031. <https://doi.org/10.1002/ldr.2331>.
- Richet, J.B., et al., (2017). The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects: Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.008>.
- Rimoldi, P., Lelli, M., Pezzano, P., Trovato, F. (2021). Geosynthetic Reinforced Soil Structures for Slope Stabilization and Landslide Rehabilitation in Asia. In: *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction. Springer, Cham. 397-404.
- Schiwndt, S., et al. (2018). Sediment traps with guiding channel and hybrid check dams improve controlled sediment retention. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-647-2018>.
- Sahu, S.R., Shrotriya, D., Kumar, B. (2021) Study of Cost Effectiveness of Reinforced Earth Wall Over Conventional Retaining Wall Considering Different Heights. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development* 5(6): 1166-1169.
- Shrestha, H.K., Yatabe, R., Bhandary, N.P. (2008). Groundwater flow modeling for effective implementation of landslide stability enhancement measures. *Landslides* 5: 281–290.
- Shu, H., et al. (2019). Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d'Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.363>.
- Su, L. J., Xu, X. Q., Geng, X. Y., Liang, S. Q. (2017). An integrated geophysical approach for investigating hydro-geological characteristics of a debris landslide in the Wenchuan earthquake area. *Engineering Geology*, 219, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.020>.
- Stokes, A., et al. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plan and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>.
- Tadsuwan, K. (2017). THE STUDY OF THE EFFECTS OF VEGETATION ON SLOPE STABILIZATION FOR LANDSLIDE PREVENTION IN THAILAND. PhD thesis, available at: http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5922040455_8719_7216.pdf.
- Tasser, E., et al. (2003). Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. *Basic and Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00153>.

- Turner, J. P., Wayne, G. J. (2005). Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(2): 141-150.
- Vergari, C. et al. (2017). Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.002>.
- Vicari, H., Ng, C. W., Nordal, S., Thakur, V., De Silva, W. R. K., Liu, H., Choi, C. E. (2022). The effects of upstream flexible barrier on the debris flow entrainment and impact dynamics on a terminal barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(6), 1007-1019. <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0119>.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., et al. (2011). Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617-2651.
- Volkwein, A., Wendeler, C., Stieglitz, L., Lauber, G. (2015). New approach for flexible debris flow barriers. In IABSE symposium report (Vol. 105, No. 48, pp. 1-7). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- UNISDR. (2013). Forests and Landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia. Available at: https://www.unisdr.org/preventionweb/files/53056_i3245e.pdf.
- Xiao, H., et al. (2017). Experimental study on the soil mixture to promote vegetation for slope protection and landslide prevention. *Landslides*, <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0634-x>.
- Wen, Y., et al. (2021). Experimental Study on Landslides in Terraced Fields in the Chinese Loessial Region under Extreme Rainfall. *Water*, <https://doi.org/10.3390/w13030270>.
- Wang, G. L. (2013). Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China. *Natural Hazards*, 69, 1835-1847. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0772-1>.
- Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W., & Bartelt, P. (2019). Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(6), 893-910. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0157>.
- Yan, L., Xu, W., Wang, H., Wang, R., Meng, Q., Yu, J., Xie, W.-C. (2019). Drainage controls on the Donglingxing landslide (China) induced by rainfall and fluctuation in reservoir water levels. *Landslides* 16: 1583–1593.
- Zeng, Q. L., Yue, Z. Q., Yang, Z. F., & Zhang, X. J. (2009). A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia stream, China. *Environmental Geology*, 58, 897-911. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1570-z>.
- Zhang, F., Yan, B., Feng, X., Lan, H., Kang, C., Lin, X., et al. (2019). A rapid loess mudflow triggered by the check dam failure in a bulldoze mountain area, Lanzhou, China. *Landslides*, 16, 1981-1992. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01219-2>.
- Zhou, G., Lyu, L., Xu, M., Ma, C., Wang, Y., Wang, Y., et al. (2023). Assessment of check dams and afforestation in mitigating debris flows based on dendrogeomorphic reconstructions, field surveys and semi-empirical models. *Catena*, 232, 107434. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107434>.