

**Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta**

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Kateřina Procházková

**Analýza prahových hodnot srážek jakožto spouštěče
svahových deformací**

The analysis of precipitation thresholds on landslides

Typ závěrečné práce:

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Praha 2018

Prohlášení:

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

V Praze, dne 9. července 2018

.....

Kateřina Procházková

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu prof. RNDr. Vítovi Vilímkovi, CSc za odborné rady a pomoc při zpracování bakalářské práce. Dále mé díky patří panu doc. RNDr. Josefu Ježkovi, CSc. za pomoc a rady v oblasti matematiky a statistiky. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za psychickou podporu.

Zadání bakalářské práce:**Název bakalářské práce:**

Analýza prahových hodnot srážek jakožto spouštěče svahových deformací

Cíl práce:

Bakalářská práce se snaží shrnout sepsanou literaturu na třídění svahových deformací dle určitých kritérií. Dále podává přehled o modelech, které analyzují prahové hodnoty srážek. Cílem práce je porovnat popsané modely a kriticky zhodnotit jejich metody a postupy. Dalším cílem je zjistit, zda lze vybraným modelem (*Forecasting Landslides Induced by Rainfall*, dále FLaiR) určit prahovou hodnotu srážek, která by byla porovnatelná s prahovými hodnotami srážek vypočtenými modelem API a prahovou hodnotou určenou z naměřených hodinových srážek v dané lokalitě.

Použité pracovní metody a datové zdroje

Bakalářská práce je rešeršního charakteru. Velká část práce spočívala v hledání a překládání cizojazyčných článků od zahraničních, ale i českých autorů. Praktická část práce se zakládala na datovém souboru srážek z oblasti Jizerských hor. Data byla použita k výpočtům hodnot vybraného modelu. Výpočty modelu byly prováděny programem Matlab.

Datum zadání:

Jméno studenta: Kateřina Procházková

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: prof. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Podpis vedoucího práce:

Abstrakt

Tato bakalářská práce analyzuje možnosti několika modelů, které slouží k nalezení prahových hodnot srážek spouštějících svahové deformace. Věnuje se jak jejich popisu, tak jejich vzájemnému porovnávání a aplikaci. Modely práce třídí nejdříve podle principu výpočtů a posléze podle jejich územního určení. Práce rovněž prakticky zkoumá existující data z oblasti Jizerských hor. Pro výzkum byl použit moderní model FLaIR a výsledek toho výzkumu práce porovnává s výsledky z modelu API a se zobrazením hodinových srážek. Ty byly odvozeny ze stejného datového souboru. Dále práce zkoumá, zda je možné užitím modelu FLaIR určit přesnou prahovou hodnotu srážek, která by fungovala jako spouštěč svahové deformace a dochází k závěru, že z dostupných informací tuto hodnotu stanovit nelze.

Klíčová slova: sesuvy, prahové hodnoty srážek, FLaIR model, API

Abstract

This bachelor thesis analyzes the possibilities of several models that serve to find threshold values of rainfall to trigger landslides. It first describes these models and then tries to compare and apply them. It sorts the models both by the principle of their method of computation and by destination of use. The thesis also examines existing data from Jizerské hory. Model FLaIR is used for this research and the computed results are then compared with those taken from model API and with a display of hourly rainfall (derived from the same data set). Lastly, the thesis examines whether it is possible to use FLaIR model to find an accurate threshold value of rainfall that would serve as a trigger for a landslide. It comes to an end that it is not possible given available information.

Keywords: landslides, rainfall thresholds, FLaIR model, API

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek.....	7
Seznam grafů.....	7
1 Úvod.....	8
2 Metodika práce.....	10
3 Třídění svahových deformací.....	13
3.1 Svahové deformace podle mechanismu.....	13
3.1.1 Ploužení.....	13
3.1.2 Sesouvání.....	13
3.1.3 Tečení.....	13
3.1.4 Řícení.....	14
3.2 Svahové deformace podle rychlosti.....	14
3.3 Svahové deformace podle tvaru.....	14
3.4 Svahové deformace podle aktivity.....	15
3.5 Svahové deformace podle hloubky kluzné plochy.....	15
4 Analyzované metody prahových hodnot srážek.....	16
4.1 Druhy modelů.....	17
4.2 Analyzované Modely.....	19
5 Zhodnocení metodik.....	27
5.1 Porovnání modelů.....	27
5.2 Aplikace modelu FLaIR.....	31
6 Diskuze.....	37
7 Závěr.....	40
Seznam použitých zdrojů.....	42
Literatura.....	42
Internetové zdroje.....	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Svahové deformace podle tvaru.....	16
Obrázek 2: Rozložení událostí tečení během měsíce v procentech z celkového počtu (N) a období nebezpečí tečení.....	27
Obrázek 3: Výsledky modelu API pro 30 dní před srážkovými maximy.....	39

Seznam tabulek

Tabulka 1: Fyzikální modely.....	28
Tabulka 2: Empirické modely.....	28
Tabulka 3: Maximální hodnoty pohybové funkce z grafů 3-7.....	35
Tabulka 4: Maximální hodnoty pohybové funkce grafů 8-10.....	37
Tabulka 5: Detailní srážková data pro jednotlivé roky.....	40

Seznam grafů

Graf 1: Křivka přenosové funkce.....	32
Graf 2: Křivka pohybové funkce.....	32
Graf 3: 30denní srážky pro rok 1997 (maximum v červenci).....	33
Graf 4: 30denní srážky pro rok 2002 (maximum v srpnu).....	33
Graf 5: 30denní srážky pro rok 2006 (maximum v srpnu).....	34
Graf 6: 30denní srážky pro rok 2010 (maximum v srpnu).....	34
Graf 7: 30denní srážky pro rok 2011 (maximum v červenci).....	34
Graf 8: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 1997.....	36
Graf 9: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 2010.....	36
Graf 10: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 1997.....	36

1 Úvod

Svahové pohyby vznikají působením mnoha činitelů a díky tomu je jejich původ velmi různorodý. Do faktorů ovlivňujících jejich vznik patří například gravitační síla, eroze, tektonické pohyby nebo atmosférické procesy, ve kterých mají velký účinek srážky. Nesmí se zapomínat ani na lidskou činnost, která je rovněž spojena se vznikem svahových deformací. Ty se řadí do častých environmentálních rizik a mají mezi nimi neobvyklý význam. Stojí na rozhraní endogenních a exogenních činitelů.

V minulosti proběhlo mnoho katastrofických sesuvů (tečení na Peruánské hoře Huascarán v roce 1970, Armerská tragédie v roce 1985, tragédie ve Vergasu v roce 1999). Tam, kde se vyskytují intenzivní sezónní deště, jsou sesuvy běžným ukazatelem přírodního rizika. Při takovýchto událostech nebývají poničeny jen domy či komunikace, ale bývají i ztráty na životech. Tyto přírodní katastrofy se dějí po celém světě. Vlivem geologické různorodosti patří i Česko mezi země s vysokým výskytem svahových nestabilit, proto má i dlouholetou a vyspělou tradici dokumentování tohoto fenoménu, které je velmi důležité pro rozvoj prevence proti sesuvům (ČGS 2012).

Pro předpověď a ochranu před svahovými deformacemi je zásadní výzkum prahových hodnot srážek a definování modelů na určení těchto prahových hodnot. Tento výzkum je relativně mladý. Jeden z prvních modelů, který slouží k určení prahových hodnot srážek, definoval geograf Caine (1980) ve své studii zaměřené zejména na tečení a mělké sesuvy ve spojitosti s intenzitou a trváním srážek. Dalšími autory, kteří se věnovali počátkům této problematiky, jsou Crozier a Eyles (1980). Ti poprvé definovali jednoduchý *Antecedent Daily Rainfall* model.

Tato práce se zabývá dvěma typy svahových deformací, kterými jsou mělké sesuvy a tečení. Oba typy vznikají z důvodu nadměrných dešťových srážek. Občas se stává, že proces je zahájen mělkým sesuvem a postupně se může přetransformovat do tečení. Informace práce čerpá zejména ze zahraničních článků, které se zabývají danou tematikou. Autoři těchto článků se věnují především vymýšlení nových metod a modelů na odvození prahových hodnot srážek. Využití mají hlavně v systémech včasného varování, které se vyvíjejí v nejvíce postižitelných oblastech, například v Itálii, Španělsku nebo na Novém Zélandu.

Následující práce je rešeršního typu a klade si několik cílů.

Prvním z nich je snaha o shrnutí sepsané literatury, která se vztahuje na třídění kritérií, podle nichž se klasifikují svahové deformace, a syntéza poznatků týkajících se již

zmíněných prahových hodnot srážek fungujících jako spouštěč sesuvů. Práce nejdříve vysvětluje základní pojmy vztahující se k modelům, které analyzují prahové hodnoty srážek, dále popisuje druhy modelů (empirické, fyzikální) a poté jednotlivé odvozené modely. Práce postupuje od jednoduchých modelů, jako je například *Antecedent Precipitation Index* (dále jen API) nebo model *Soil Water Status*, až po ty složitější, které jsou řešeny Bayesovským nebo frekvenčním přístupem.

Druhý cíl je zaměřen na srovnání uvedených modelů a práce se snaží o kritické zhodnocení jejich metod a postupů. Zvažuje také jejich potenciální využití.

Posledním cílem je zjistit, zda lze vybraným modelem (*Forecasting Landslides Induced by Rainfall*, dále FLaIR) určit prahovou hodnotu srážek, která by byla porovnatelná s prahovými hodnotami srážek vypočtenými modelem API a prahovou hodnotou určenou z naměřených hodinových srážek v dané lokalitě. Model FLaIR byl vybrán, protože oproti ostatním modelům pracuje s pohyblivou funkcí (mobility function) a přenosovou funkcí (filter function). Je to jeden z nejnovějších modelů k určení prahových hodnot srážek, proto v literatuře (Capparelli, Tiranti 2010; Capparelli, Versace 2011) chybí jeho dostatečné otestování v praxi.

Druhá kapitola se zabývá metodikou a popisuje použité zdroje a data. Třetí kapitola představuje klasifikování svahových deformací podle určitých kritérií. Předposlední kapitola seznamuje s druhy modelů na určení prahových hodnot srážek a následně je analyzuje. Poslední kapitola zhodnocuje metodiky popsané ve čtvrté kapitole a uvádí aplikaci vybraného modelu FLaIR.

2 Metodika práce

Tato bakalářská práce je rešeršního typu. Tudiž hlavní náplň práce spočívá v hledání a překládání cizojazyčných článků od zahraničních, ale i českých autorů. Dosud sepsané literatury o prahových hodnotách srážek a o modelech analyzujících tyto prahové hodnoty lze najít velmi mnoho. Články se nejlépe hledají pomocí vědeckých serverů. Například prostřednictvím akademické online služby Web of Science, která poskytuje přístup k 7 vědeckým databázím, a dále pak přes sociální síť ResearchGate, speciálně vytvořenou pro vědeckou komunitu. Stále však nejsou přístupné všechny články, což znesnadňuje tvoření práce.

V první části práce je čerpáno z české, slovenské a částečně i z další zahraniční literatury. Záruba (1987) a Ondrášik (2011) se věnují základním informacím o svahových deformacích a jejich zabezpečování. Práce tyto publikace využívá k dělení svahových deformací podle určitých kritérií. Jejich údaje jsou doplněny informacemi z webových stránek České geologické služby (ČGS 2007).

Ve třetí kapitole se velmi zúročil článek o klimatických faktorech ovlivňujících tečení od autorů Wiczoreka a Gladea (2005), kde tyto faktory hodnotí. Oba autoři si také kladli za cíl sumarizovat dostupnou literaturu týkající se výzkumu k lepšímu porozumění tohoto komplexního geomorfologického jevu. Studie byla vhodným zdrojem pro čerpání základních pojmů týkajících se problematiky prahových hodnot srážek jako spouštěče sesuvů. Těmito pojmy se mimo jiné myslí předchozí srážky, intenzita a trvání srážek nebo minimální a maximální prahové hodnoty srážek. Rovněž jsou odtud brány údaje o metodách a modelech použité výzkumníky z různých regionů. Tyto regiony jsou většinou vzhledem k sesuvům velmi rizikové. Autoři článku současně poukazují na to, že každý výzkum vnímá zkoumaný fenomén z jiného pohledu.

Geomorfolog Thomas Glade se tomuto tématu věnoval mnohem více a napsal další studie, věnující se určitým modelům více do hloubky. Svůj výzkum zaměřil na Nový Zéland, kde je problematika svahových deformací stále aktuální. Zabýval se například modelem *Antecedent Daily Rainfall* (Glade a kol. 2000) nebo dále vylepšoval model *Soil Water Status* (Glade 2000), který poprvé představili autoři Crozie a Eyles (1980). Vypočtené regionální prahové hodnoty dešťových srážek z tohoto modelu by mohly být použity jako předpovědní ukazatele v rámci systémů včasného varování před sesuvy.

Velmi důležitým příspěvkem byla studie od geomorfologa Guzzettiho a kol. (2007), kde se zabýval stanovením prahových hodnot srážek. Určil obecnou rovnici, která

s pomocí dalších výpočtů stanovuje prahové hodnoty srážek. Lze ji proto použít pro výpočet celosvětových, regionálních a v neposlední řadě také lokálních prahových hodnot srážek pro vznik sesuvů. Mimo tohoto problému se věnoval další pro tuto práci důležité otázce, kterou je dělení modelů. Modely se dají dělit mnoha způsoby. V Guzzettiho a kol. (2007) studii, stejně jako v této práci, se bere v úvahu jejich základní dělení na fyzikální a empirické. Guzzetti a kol. (2007) také sjednotili proměnné používané v literatuře pro definování prahů srážek. Názvosloví pro stejné nebo podobné proměnné nebylo v literatuře pevně dané a používaly se různé definice. Nakonec byl článek použit jako podklad pro definování Bayesovské metody. Posledními analyzovanými metodami jsou model FLAIR a model *Saturated Unsaturated Simulation for Hillslope Instability* (dále jen SUSHI), kterým se věnuje zejména Capparelli (2011). Právě možnosti využití modelu FLAIR a jeho obecné analýze se tato práce věnuje hlouběji v páté kapitole.

Pátá kapitola představuje praktickou část práce, která se dělí na dvě části. První z nich porovnává uvedené modely. Přitom jsou využity poznatky prezentované ve čtvrté kapitole. K porovnání slouží tabulky, které modely třídí podle jejich založení (empirického nebo fyzikálního) a dále je k nim přiřazeno územní určení a typ. Druhá část se věnuje aplikaci modelu FLAIR. Na jeho výpočty se aplikují data ze studie Smolíkové a kol. (2016). Klíčová informace, která by měla vyplynout z praktického rozboru FLAIR modelu, je určení prahové hodnoty srážek, jež by byla porovnatelná s prahovými hodnotami indexu API, vypočítaného na základě zmíněných dat z Jizerských hor. Model FLAIR je poměrně nová metoda, proto má široké možnosti v dalším vývoji (De Luca, Versace 2017). Ve speciálních případech může API vycházet právě z modelu FLAIR.

Ve výpočtu modelu FLAIR jsou použita data srážek z let 1983–2013. Data byla získána z Jizerských hor ze srážkových měřidel umístěných v oblasti Smědavy a Smědavské hory (Smolíková a kol. 2016). Při sběru těchto dat docházelo k nepřesnostem. Například byly údaje z měřidel ovlivněny svou orografickou pozicí a umístěním v dané nadmořské výšce. Dále nasbíraná data nebyla kompletní. Jejich výpadky byly způsobeny občasnými poruchami měřicí jednotky. Z tohoto důvodu bylo nutné použít lineární regresi, aby se nastavily chybějící hodnoty a data tak byla vhodná k výpočtům. Postup výpočtu lineární regrese provedli autoři studie zabývající se analýzou tečení v Jizerských horách, ze které se čerpala data i pro výpočet FLAIR modelu (Smolíková a kol. 2016).

Výpočet FLAIR modelu probíhal následovně. Pracovalo se s rovnicí pohybové funkce (viz str. 21, funkce 9). Křivka přenosové funkce se použila ve tvaru rovnice 11

(viz str. 22), protože model FLAIR se považuje za obecný rámec empirických modelů. To je případ modelu intenzity-trvání, který bývá nejvíce používán pro analýzu mělkých sesuvů v regionálním měřítku. Jeho křivka je v této práci uvedena pod číslem 4 (viz str. 16). Prahová hodnota určená pro celý svět se z této křivky vypočítá pomocí vztahu (Guzzetti a kol. 2007):

$$I_{cr} = 14,82D^{-0,39}. \quad (1)$$

Tento vztah může být reprezentován přenosovou funkcí z FLAIR modelu (Capparelli, Versace 2011):

$$\psi(t) = 0.035t^{-0,61}. \quad (2)$$

Výpočty probíhaly v programu Matlab, kde se vytvořil program na výpočet konvoluce funkcí modelu FLAIR. Dále se naprogramovala samotná konvoluce. Místo integrálu se vyčíslila suma, neboť se jedná o tzv. konvoluční integrál s danou hodnotou, v tomto případě jde o denní hodnoty. Rovnice sumy má tvar:

$$Y_t(i) = \sum \psi(i - j + 1) \times I(j), \quad (3)$$

kde se volí postupně $i=1$ až maximální časová hodnota a j probíhá od 1 do i . Matlab indexuje až od hodnoty 1, proto se k rozdílu přičítá hodnota 1.

Z výše popsaných rovnic a výpočtů se v Matlabu vygenerovaly grafy, které se pak v kapitole 5.2 blíže zanalyzovaly. V diskuzi se poté uvažuje nad přijatými výsledky a porovnáním z hlediska modelu API a prahovými hodnotami uvedenými ve studii Smolíkové a kol. (2016).

3 Třídění svahových deformací

Svah je tvar reliéfu. Zabírá většinu povrchu Země a představuje tak základní prvek krajiny (Goudie 2004). Díky porušení stability svahu vznikají svahové pohyby, závislé na účinku zemské gravitace, kdy se hmoty pohybují po svahu dolů (Záruba 1987). V této kapitole bude prezentováno stručné roztrídění sesuvů, a to podle mechanismu, rychlosti pohybu, tvaru, a nakonec i podle jejich aktivity.

3.1 Svahové deformace podle mechanismu

Podle mechanismu vymezuje Marshalko a kol. (2017) čtyři hlavní skupiny, které se posléze dále podrobněji rozčleňují. Těmito skupinami jsou: ploužení, sesouvání, stékání a řícení.

3.1.1 Ploužení

Plouživé pohyby, které lze také nazvat *creep*, je pomalé stékání svahových hlín a sutí (Wilson 1968). V zimě je toto ploužení způsobeno nakypřením suťových úlomků a zdvižením povrchových vrstev mrazem. V průběhu jarního tání se úlomky nevrací zpět do své původní polohy, ale posouvají se působením gravitace po svahu. Pohyb sutí je zapříčiňován hlavně změnami teploty a s nimi souvisejícím roztahováním a smršťováním (Záruba 1987).

Ploužení může být hlubinné, kdy svahy podléhají pomalému deformování hornin v několika desítkách až stovkách metrů pod povrchem země (ČGS 2007) anebo povrchové, kdy se ploužením přetváří povrchové vrstvy svahů.

3.1.2 Sesouvání

Svahové deformace, způsobené sesouváním, jsou už poměrně rychlé pohyby hornin, při nichž jsou sesouvající se hmoty odděleny od pevného podloží smykovou plochou (Záruba 1987). Tímto se stane svah nestabilním. Typické pro sesouvání je nasunutí části sesuvného materiálu na původní terén v předpolí. Částice se zde pohybují jako jeden celek podél smykové plochy. Výslednou formou tohoto pohybu je sesuv. U sesouvání významně záleží na geologické struktuře, na typu hornin a na již zmíněných smykových plochách, podle kterých se pak sesuvy mohou dále dělit (Ondrášek a kol. 2011).

3.1.3 Tečení

Do této skupiny patří sesuvy, kdy je nezpevněný materiál nasycen vodou a pohybující se hmota má charakter tečení (Záruba 1987). Pro stékání je typická nepřesně

vymezená smyková plocha a turbulentní složka pohybu. Často se jedná o náhlé a časově omezené pohyby, vzniklé v horní části svahu a odtékající ve formě proudu. Směr a polohu tohoto proudu většinou udává erozní rýha nebo koryto potoka. Uvolněný materiál se ukládá při úpatí svahu, mnohdy ve velké vzdálenosti od odlučné oblasti (Záruba 1987).

Tento typ sesuvu lze rozčlenit na další vlastní pohyby. Dělí se podle převažujícího materiálu, např. tečení hlinitých a úlomkovitých uloženin na strmých svazích, nazývané kamenito-hlinité proudy. V Alpách jsou tyto přívalové proudy označovány jako mury (Ondrášik a kol. 2011).

3.1.4 Řízení

Posledním typem dělení podle mechanismu sesuvu je řízení, což je náhlý a krátkodobý pohyb ze strmých skalních stěn. Od sesouvání se liší tím, že aspoň část pohybu probíhá volným pádem a také tím, že pohyb nenastává po smykové ploše (Goudie 2004). Opět se dělí na další typy podle velikosti odpadávajících úlomků. Mohou to být jak úlomky velikosti středních kamenů, které se kutálejí po svahu dolů, tak části ve velikosti skalních stěn (Záruba 1987).

Při skalním řízení působí mnoho činitelů. Jedná se např. o klimatické vlivy, jako je namrzající voda v puklinách, vodní eroze, ale i seismická nebo vulkanismus. Do činitelů se řadí i antropologické vlivy (ČGS 2007).

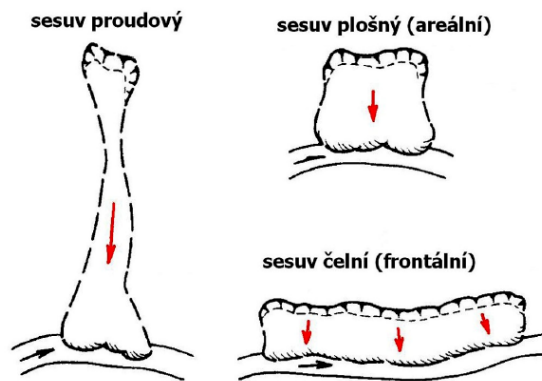
3.2 Svahové deformace podle rychlosti

V návaznosti na dělení sesuvů podle mechanismu následuje dělení sesuvů podle rychlosti. Svahové deformace mohou být pomalé, to znamená, že se pohybují rychlostí v řádech milimetrů až centimetrů za rok (Wilson 1968). Touto deformací je například ploužení (creep). Sesuvy mohou být i relativně rychlé, u těch se rychlost uvádí až jeden metr za den (příkladem je sesouvání), anebo rychlé, kdy je rychlost odhadovaná na metry až kilometry za hodinu (příkladem je tečení). Posledním typem sesuvu dle rychlosti je náhlý krátkodobý pohyb, při kterém se rychlost uvádí v metrech za sekundu a patří sem řízení (ČGS 2012), které může dosahovat rychlosti až 55 m/s (Záruba 1987).

3.3 Svahové deformace podle tvaru

Dělení spadá do tzv. vedlejších kritérií klasifikace, kam patří například klasifikace podle věku, stupně aktivity nebo i podle geneze. Dle tvaru se svahové deformace rozdělují na proudový tvar, kdy délka deformovaného území několikrát převyšuje jeho šířku. Dále existuje plošný (areální) tvar. V tomto případě se délka přibližně rovná šířce.

Posledním tvarem je čelní (frontální) sesuv. U tohoto tvaru šířka převyšuje délku (Ondrášek a kol. 2011).



Obr. 1: Svahové deformace podle tvaru. (Ondrášek a kol., 2011)

3.4 Svahové deformace podle aktivity

Svahové deformace lze dělit i podle aktivity. Rozeznáváme aktivní (živé), dočasně uklidněné a trvale uklidněné (stabilizované). Aktivní svahové deformace jsou v současnosti v pohybu. Určí se vcelku snadno podle morfologie, jejich tvary nejsou zatím ovlivněné dešťovým ronem nebo erozí. Cesty bývají přerušené a stromy vychýlené ze své polohy (Záruba 1987). Následují dočasně uklidněné svahové deformace, kde je pohyb v současnosti uklidněný, ale stále přetrvávají příčiny sesuvu a za jistých okolností se sesuv může obnovit (Ondrášek a kol. 2011). Posledním typem svahové deformace podle aktivity jsou trvale uklidněné, stabilizované sesuvy. U tohoto typu zanikly příčiny pohybu nebo byly lidskými zásahy odstraněny. Bývají zarostlé nebo porušené erozí, stopy po sesuvu obvykle nejsou znatelné.

3.5 Svahové deformace podle hloubky kluzné plochy

Podle hloubky se rozlišují sesuvy na povrchové, mělké, hluboké a velmi hluboké. Jako povrchové se označují ty, u kterých pohybující se vrstva bývá mělká než 1,5 m (Hutchinson 1968). Mělké sesuvy jsou určeny hloubkou do 5 m. Hluboké sesuvy mohou být hluboké od 5 do 20 m a velmi hluboké sesuvy mají hloubky větší než 20 m (Koňářiková 2004). Hloubka se přitom obvykle měří kolmo k povrchu svahu (Koňářiková 2004). Tato práce se zabývá zejména mělkými sesuvy, které nejvíce podléhají vlivu dešťových srážek.

4 Analyzované metody prahových hodnot srážek

Nejprve je potřeba uvést několik faktorů, které stékání i prahové hodnoty srážek ovlivňují. Na tečení a mělké sesuvy působí klimatické faktory. Ty mohou být primární a sekundární. Primární faktory přímo spouští svahovou deformaci. Patří do nich například přívalové srážky s intenzivními srážkami nebo rychlé tání sněhu. Tyto jevy jsou spojené s téměř okamžitým spuštěním sledovaných svahových deformací. Do sekundárních faktorů spadají předešlé srážky nebo předešlá tání sněhu a mají vliv na to, zda svahové deformace vzniknou během zemětřesení, vulkanické události nebo přívalových dešťů (Wieczorek a Glade 2005).

Význam předchozích srážek může být ovlivňován evapotranspirací, na kterou působí sezónní změny v úhrnu srážek a teploty. Působení předchozích klimatických podmínek se liší v závislosti na regionu. Lze to reprezentovat na výzkumech v Itálii a na Novém Zélandu, kdy bylo zjištěno, že předešlé srážky hrají velkou roli při spouštění tečení. Naproti tomu výzkum v Hong Kongu ukázal opak, tedy malý význam předcházejících klimatických podmínek. Jako jediný významný faktor se ukázala intenzita dešťových srážek (Wieczorek a Glade 2005). Také tání sněhu a vysoká půdní vlhkost mohou ovlivnit významnost předešlých srážek.

Prahová hodnota je určitá úroveň výskytu daného jevu ve vztahu ke konkrétnímu procesu. Prahové srážkové hodnoty se dělí na minimální a maximální, s tím, že maximální hodnoty vymezují úroveň, nad kterou se vždy proces vyskytuje a minimální hodnota definuje nejnižší úroveň, pod kterou se proces nevyskytuje (Guzzetti a kol. 2007). Tato práce se zabývá procesy svahových deformací (mělkými sesuvy a tečeními) a prahové hodnoty jsou zde míněny jako hodnoty srážek. Pravděpodobnost výskytu tečení se zvyšuje, jak se srážky stupňují z minimálních prahových hodnot směrem k maximálním prahovým hodnotám (Wieczorek a Glade 2005).

Dva další důležité údaje, týkající se srážek, jsou intenzita a trvání srážek. Hodnoty z různých měření intenzity a trvání srážek bývají základem většiny modelů na prahové hodnoty srážek. Kombinace intenzity a trvání dešťových srážek je užitečná pro porovnání regionálních spouštěčů tečení a mělkých sesuvů. Vysoká intenzita srážek poměrně krátkého trvání (několik hodin) může sice způsobovat vysoký povrchový odtok, ale nedostatečná infiltrace do půdy zamezí vzniku toku úlomků. Na druhou stranu nízká intenzita srážek poměrně dlouhého trvání (srážky trvající více dnů) může zvyšovat úroveň

hladiny podzemní vody, ale nezpůsobí dostatečný kapilární tlak v povrchové půdě pro spuštění svahových deformací (Wieczorek a Glade 2005).

Dále existují další fyzicko-geografičtí činitelé, kteří ovlivňují míru nasycení, obecnějšího významu. Těmi jsou morfologie svahů, geologické a hydrologické poměry, vegetace a jiné.

4.1 Druhy modelů

Existují dva základní druhy modelů, které analyzují prahové hodnoty srážek. Jsou jimi fyzikální modely, které se dále dělí na procesní a koncepční modely, a empirické modely. Ty bývají založeny na statistických, eventuálně na historických základech (IRPI 2018).

Fyzikálně založené modely potřebují ke své analýze prostorové informace o hydrologických, morfologických a půdních vlastnostech, které pak řídí zahájení sesuvů. Tyto údaje se obtížně zjišťují pro velké oblasti a málokdy jsou k dispozici mimo speciální experimentální území (Guzzetti a kol. 2007). Modely se určují pomocí srážkových událostí, kdy je známo měření, lokalita a trvání srážek. To vše pomáhá předpovědět svahové deformace, zejména pokud se jedná o typ mělkých sesuvů a tečení. Méně účinné bývají pro předpověď sesuvů hlubokých (Guzzetti a kol. 2007). Příkladem fyzikálního modelu je model *Soil Water Status*, který je zjednodušeným koncepčním modelem (Guzzetti a kol. 2007).

Empirické modely jsou definovány zkoumáním srážkových událostí, které vedly k sesuvu půdy. Prahové hodnoty srážek bývají získány z minimálních hranic podmínek dešťových srážek vykreslených v kartézských, semilogaritmických nebo logaritmických soustavách souřadnic. To znamená, že jsou použity hodnoty, které předcházejí vzniku sesuvů (vlastně podprahové hodnoty). V těchto soustavách souřadnic jsou prahové hodnoty srážek většinou vykresleny bez matematických či fyzikálních kritérií (Guzzetti a kol. 2007). Důležitým aspektem k sestavení empirického modelu pro předpověď sesuvů je intenzita srážek, což je množství srážek naakumulovaných za jedno období, případně rychlost srážek v období. Většinou se intenzita měří v milimetrech za hodinu. Délka období je významnou veličinou, protože při krátkém časovém úseku intenzita představuje okamžité měření rychlosti srážek v minutách, hodinách nebo dnech. Na druhou stranu, při dlouhé pozorovací periodě se intenzita prezentuje průměrnou hodnotou. Jedná se tedy o průměrnou hodnotu za celé období v určitých časových úsecích (minuty, hodiny, dny). Právě průměrování hodnot srážek za dlouhé období pozorování má tendenci

podhodnocovat vrcholy (maxima) intenzity srážek. Tím může dojít k opomenutí kritické hodnoty. Intenzita měřená v krátkém období má jiný fyzický význam než intenzita měřená v období dlouhém. Tento fakt pak ztěžuje vymezení srážkových modelů (Guzzetti a kol. 2007).

Prahové hodnoty lze rozdělit na globální, regionální a lokální (Smolíková a kol. 2016). Globální hodnoty se snaží určit celkovou minimální úroveň pro spuštění sesuvu. Tyto hodnoty nejsou závislé na místních morfologických, litologických či hydrologických podmínkách (Crosta, Frattini 2001). Regionální prahové hodnoty se vymezují pro oblasti s rozlohou několika tisíců čtverečních kilometrů. Oblast má podobné meteorologické, klimatické a celkově fyzicko-geografické charakteristiky. Tyto oblasti jsou potenciálně vhodné pro systémy včasného varování. Tyto systémy bývají založené na kvantitativních prognózách, odhadech nebo měřeních prostorových srážek. Místní prahové hodnoty přímo berou v potaz lokální klimatické režimy a geomorfologické vlastnosti hornin a aplikují se na jednotlivé sesuvy v daném území, případně na seskupení sesuvů v oblastech s rozlohou několika stovek čtverečních kilometrů (Guzzetti a kol. 2007). Místní a regionální prahové hodnoty fungují velmi dobře v územích, kde byly vymezeny, ale nedokáží fungovat v jiných oblastech. Nelze z nich tedy abstrahovat a jsou velmi specifické. Globální prahové hodnoty mají význam tam, kde místní a regionální hodnoty nemůžou být určeny, ale často tyto hodnoty vedou k falešným zprávám o sesuvech, které se nikde nevyskytly. Dále, na základě měření, mohou být empirické prahové hodnoty srážek rozděleny do třech kategorií (Guzzetti a kol. 2007):

- I. prahové hodnoty, které kombinují měření srážek získané pro konkrétní srážkovou událost,
- II. prahové hodnoty, které berou v úvahu předchozí podmínky,
- III. jiné prahové hodnoty.

Nejpoužívanější typ prahových hodnot trvání a intenzity, navrhovaný v literatuře (Caine 1980; Guzzetti a kol. 2007), má obecný tvar rovnice:

$$I = c + \alpha \times D^\beta, \quad (4)$$

kde I znamená střední intenzitu dešťových srážek, D značí dobu srážek a $c \geq 0$, α a β jsou empiricky odvozené parametry. Navrhované prahové hodnoty zaujímají velký rozměr délek trvání a intenzity, ale většina pokrývá rozsah trvání od 1 do 100 hodin a rozsah intenzity od 1 do 200 mm (Guzzetti a kol. 2007).

Důležitou roli hraje i četnost srážek a průměrný roční úhrn srážek. Wilson (2000) porovnával frekvenci srážek v amerických státech tichomořského pobřeží. Výsledkem je nejistota existence jednoduchého vztahu mezi prahovými hodnotami srážek a klimatickými oblastmi.

4.2 Analyzované Modely

Prahové hodnoty srážek mohou být modelovány jednoduše, ale i velmi složitě. Jednodušší modely prostě porovnávají událost tečení či sesouvání s množstvím srážek za jeden časový interval. Tím je myšleno například období jedné srážkové epizody, jednoho dne, měsíce, jedné sezóny nebo jednoho roku. Většina modelů prahových hodnot se vztahuje na svahové deformace na svazích a zanedbávají místo spuštění, ale některé se zajímají o svahové deformace od místa počátku až po akumulaci pod svahem.

První přístup pro určení prahových hodnot srážek je nazýván metodou *Daily Rainfall*. Metoda zvažuje jen srážky v době vzniku sesuvu. Má sice jednoduché použití, ale zanedbává podmínky předcházející spuštění události. Proto podléhá vysoké nepřesnosti (Glade 2000). Jedním z klíčových faktorů vzniku je půdní vlhkost, poněvadž pokud je nezpevněná hornina nasycená vodou, zvyšuje se kapilární tlak a napětí materiálu je velmi nízké. V takové situaci může jakkoliv malé množství dešťových srážek způsobit svahové deformace.

Modely *Antecedent Daily Rainfall* a *Soil Water Status* zahrnují tyto aspekty předešlých podmínek a jsou vhodné k regionálnímu určení prahových hodnot (Glade 2000). Model *Soil Water Status* patří k jednoduchým koncepčním (fyzikálním) modelům. Zahrnuje faktory jako jsou srážky, odtok vody, ztráta vody prostřednictvím evapotranspirace a schopnost nezpevněné horniny zadržet vodu. Všechny tyto faktory pomáhají stanovit prahové hodnoty srážek vyvolávající tečení. Model představili Crozier a Eyles (1980) a následně jej upravil Glade (2000). V modelu bylo důležité určit kritickou délku období předcházející vzniku sesuvu. Tato délka byla později definována na 10 dní (Glade 2000). Délka období ale nemůže být stejná pro všechny regiony. Záleží na mnoha podmínkách, mimo jiné i na hloubce kluzné plochy. Glade (2000) definoval funkci rozpadu (decay function) pro ztrátu vody díky odtoku a evapotranspiraci. Použil k tomu recesní křivky z hydrografů různých pramenů s odlišnou velikostí povodí ve studované oblasti (Wieczorek a Glade 2005). Při této metodě je předpokládáno, že svahová deformace je spouštěna maximálními denními srážkami v regionu. Za další předpoklad spuštění se bere v úvahu umístění vyvolaných svahových deformací. To znamená místo,

kde na svahu v místě začátku tečení nebo mělkých sesuvů byly zaznamenány maximální denní srážky. Model dává každodenní informaci o stavu nasycení půdní vody. Tím dokáže poskytnout vyhovující stupeň předpovědi svahové deformace během sesuvné aktivity. Použití modelu lze vylepšit přidáním dat denních srážek s denním množstvím vody v půdě (Glade 2000). Model není ještě plně vyvinut, aby byl používán jako systém včasného varování před nebezpečím (Wieczorek a Glade 2005).

Antecedent Daily Rainfall model zajišťuje metody k počítání vztahu mezi denními a předešlými srážkami. V tomto modelu jsou dešťové srážky zastupovány dvěma faktory – srážkami, vyskytujícími se před událostí tečení či mělkých sesuvů, a srážkami v den tečení (Glade a kol. 2000). Metoda, založená autory Crozierem a Eylesem (1980), používá k výpočtům index předešlých srážek, vypočtený jako (Bruce and Clark 1966):

$$r_{a_0} = kr_1 + k^2r_2 + \dots + k^nr_n, \quad (5)$$

kde r_{a_0} jsou předešlé denní srážky, založené na maximálních regionálních hodnotách srážek (mm) pro den 0, k se rovná konstantě reprezentující odtok regolitu a r_n je maximum regionálních srážek (mm) v n -tý den před dnem 0. Model bere v úvahu jen maximální hodnotu srážek každého dne. Tento fakt se opírá o skutečnost, že maximální srážky nejčastěji způsobují tečení. K získání prahových hodnot byly použity statistické metody, nejlépe rozdělující podmínky srážek (Wieczorek a Glade 2005). Modelové techniky byly rozvinuty v kombinaci s měřením týkajícím se předešlých srážek a jejich vlivu na kapilární tlak vody a nasycení půdy. Nespolehlivost v těchto výpočtech zapříčiňuje několik faktorů. Těmi jsou například řídké údaje o reálných událostech svahových deformací, velké datové soubory, které bývají náročné na výpočty, a také, že stanovené prahové hodnoty nerozlišují rozdíly mezi různým využitím půdy, i když se projevilo, že využívání půdy je jedním z rozhodujících faktorů pro analýzu sesuvů (Glade a kol. 2000). Naopak, výhoda tohoto modelu oproti metodě *Soil Water Status* ční v nepoužití faktoru vlhkosti půdy a omezení se na použití hodnoty denních srážek, které lze jednodušeji změřit. Model by mohl být zlepšen rozšířením analýzy o další informace, především zavedením typů a velikostí sesuvů (Glade a kol. 2000).

Dalším modelem, který vytvořil Wilson (2000), je numerický model, založený na jednoduchém principu *Leaky Barrell* (děravého sudu). Svým principem spadá do fyzikálních procesních modelů. Model přijímá vodu shora určitou rychlostí a vodu ztrácí spodem pod jinou rychlostí, než je voda přijímána. Tento model se používá k vytvoření představy o akumulaci infiltrovaných srážek za účelem vytvoření zóny

nasycení. Model byl testován a je vhodný pro malé oblasti s vysokou náchylností k spuštění svahových deformací (Wieczorek a Glade 2005).

Následující model pro určení prahových hodnot srážek se nazývá *Antecedent Precipitation Index* (dále API). Poprvé ho definoval M. A. Kohler v roce 1940, kdy vědci hledali techniku, která by zjednodušovala vztah mezi srážkami a odtokem (Benkhaled a kol. 2004). Nejjednodušší rovnice podle Kohlera a Linsey (1951) vypadá následovně:

$$API_n = \sum_{i=1}^n c^i \times P^i [mm], \quad (6)$$

kde:

n je celkový počet dnů přecházejících příčinným dešťům, obvykle 5, 10, 20, 30 dnů,

i je počet dnů, počítaných zpětně od data, na který byl API určený,

c je konstanta evapotranspirace (liší se region od regionu),

P_i je množství srážek i dnů předchozích k příčinným srážkám (v mm).

Index se řadí mezi hydrologické modely. Dobře kombinuje srážky a výpary a dává je do jednoho parametru. Další výhodou je jeho jednoduchost a početní nenáročnost. Používá se hlavně k odhadům množství vody v půdě v určitých oblastech, zejména v oblastech bohatých na srážky (Benkhaled a kol. 2004). V této práci je tento index uveden proto, že odhad vody v půdě je velmi důležitým faktorem pro předpověď zahájení svahové deformace. Nahrazuje konvenční techniky, které v těchto oblastech nemohou pracovat z důvodu velké heterogenity půdní vlhkosti (Zhao a kol. 2011). Model simuluje půdní vlhkost v tenkých vrstvách blízko povrchu (Cascón a kol. 2017). Bylo zjištěno, že největší vliv má hloubka do 20 cm od povrchu (Xie a Yang 2013). Do výpočtu zahrnuje účinné předchozí srážky (ovlivňují zahájení tečení) a hodnotu povrchového a podzemního odtoku. Dále model používá parametry, kterými jsou denní množství srážek, jednorázové přívalové deště a kumulativní srážky. Kumulativní srážky jsou většinou v rozmezí 5, 10, 20 a 30 dnů s tím, že nejlepší hodnoty vykazuje index po 5 dnech, což je významná informace pro pozdější analýzy indexu (Benkhaled 2004). Dále se do některých výpočtů zahrnuje koeficient zeslabení, označený K (Xie, Yang 2013). Hodnota K se liší podle fyzicko-geografických charakteristik, jako je teplota, vlhkost nebo odpařování. Model také popisuje přibližný obsah vody v půdě; tím může odrážet vlastnosti půdy, způsobené meteorologickými prvky, jako je evapotranspirace (Xie, Yang 2013). Existuje více verzí těchto modelů, v některých bývá zahrnuta i mírná závislost na teplotě vzduchu (Cascón a kol. 2017). Na základě API se vyvíjejí další jednoduché

modely, například deterministický model podle Descroa (2002). Metoda API je významným faktorem v transformačním procesu srážek a tečení (Benkhaled 2004).

Příkladem empirické statistické metody je Bayesovský přístup, založený na relativní pravděpodobnosti výskytu dvou nebo více jevů. V problematice svahových deformací se používá k definování prahového modelu pro pravděpodobný výskyt sesuvů. Také se s jeho pomocí odvozují křivky prahových hodnot. U tohoto přístupu se předpokládá prahová křivka v nejpoužívanější obecné formě (viz rovnice 1, str. 12). Je potřeba připomenout, že tato volba mocninné křivky nezávisí na fyzicko-geografických (geomorfologických, geologických, hydrologických, meteorologických) podmínkách (Brunetti a kol. 2010). Pravděpodobnostní proměnná nabývá hodnot od 0 do 1 a znázorňuje kombinované šance výskytu přívalových srážek s nejvyšší intenzitou a trváním, následného vzniku sesuvu a pozdějšího pozorování a hlášení o událostech sesuvů. Dále se definuje pravděpodobnost tzv. Bernoulliho datového bodu $dbern$ ($0 \leq p \leq 1, p \in \mathbb{R}^+$), který se vyskytuje při dané hodnotě intenzity srážek I a trvání dešťových srážek D (Brunetti a kol. 2010):

$$P(I, D) \approx dbern[\mu(I, D)] \quad (7)$$

pomocí:

$$\mu(I, D) = \{(1 - \delta)\theta[z(I, D)] + \delta\}exp[-\eta|z(I, D)|]. \quad (8)$$

V rovnici 8 θ značí Haevisidovu funkci, δ a η společně představují šíření datových bodů v prostoru $D-I$ v zadaném prahu (Brunetti a kol. 2010). Bayesovský přístup se používá k vymezení křivky minimálního prahu intenzity a trvání dešťových srážek a je vhodný pro analýzu malých datových sad. Tato metoda pro další studie pomůže zvětšit objektivitu a snížit interpretační chyby. Bayesovský přístup lze také aplikovat do různých oblastí a na odlišné datové množiny (Guzzetti a kol. 2007).

Bayesovskou metodu lze porovnat s frekvenčním přístupem. Obě metody jsou sice založené na stejné rovnici prahové křivky, oproti Bayesovské se ale liší tím, že frekvenční metoda se používá na velké datové sady. Frekvenční přístup vychází z frekvenční analýzy empirických srážkových podmínek. Dále používá složitější statistické funkce a porovnává regresní funkce spočítané různými metodami (Brunetti a kol. 2010). Frekvenční přístup poskytuje podrobnější výsledky. Pokud se použije správná velikost dat, umožňuje tento přístup určit vícenásobné minimální prahové hodnoty v závislosti na různých úrovních jejich překročení, z nichž každý vychází z odlišné úrovně pravděpodobnosti překročení. Jde o určité zlepšení oproti stávajícím

metodám, ale stále existuje omezení s vizuální interpolací empirických datových bodů a malé zkušenosti s používáním této metody (Brunetti a kol. 2010).

Empirických statistických metod počítání prahových hodnot je celá řada. V jedné ze studií byly testovány následující tři metody. Jednalo se o metodu nejmenších čtverců (Least Squares Method – LSM), kvantilovou regresi (Quantile Regression – QR) a metodu nelineárních nejmenších čtverců (Non-linear Least Square Method – NLSM) (Rossi a kol. 2017). Data trvání srážek a kumulativní hodnoty srážek zde byly získány z pozemních dešťových měřidel nebo byly odhadnuty na základě několika satelitních senzorů. Výhoda satelitních senzorů, na rozdíl od pozemních dešťových měřidel, spočívá v tom, že dokáží získat informace i z odlehlých území a pokryjí tak oblasti, ve kterých není tak hustá síť pozemních měřidel (Rossi a kol. 2017). Použity byly dva přístupy na odhad srážek ze satelitních dat. První, manuální expertní přístup, je časově náročný a kvalita výsledků závisí na zkušenostech výzkumníka. Druhý přístup se nazývá automatický postup. Oproti expertní metodě umožňuje odhadovat nejistotu spojenou s dešťovými podmínkami, které pravděpodobně vedly k sesuvům půdy (Rossi a kol. 2017). Právě pro podmínky srážek, získané automatickým postupem, byly navrženy výše zmíněné statistické metody pro definování empirických prahových hodnot srážek. Všechny tři metody pracovaly s hladinou alfa 5 %. Nejlépe vycházela NLSM, která je účinnou metodou pro odvození prahů srážek. Tato metoda je cenná zejména při chybějících datech o sesuvu. Metoda QR funguje také velmi dobře, především pro delší dobu srážek s trváním delším než 24 hodin. Dokonce poskytuje velice podobné výsledky jako NLSM, ale je méně vhodná pro kratší dobu srážek s trváním kratším než 24 hodin. LSM metoda vycházela nejhůře (Rossi a kol. 2017).

Model, který je spojen s odvozováním prahových hodnot srážek, se jmenuje *Forecasting Landslides Induced by Rainfall* (FLaIR). FLaIR model patří k hydrologickým modelům a může být považován za obecný rámec empirických modelů (De Luca, Versace 2017). Ve zvláštních případech zahrnuje nejčastěji používané modely založené na prahových hodnotách intenzity. Oproti jiným empirickým přístupům má model FLaIR několik výhod. Model odhaduje predispozice svahu k nestabilitě identifikováním pohyblivé funkce Y , která se získá konvolucí mezi intenzitou dešťových srážek I a tzv. přenosovou funkcí ψ . Obecná forma pohybové funkce (mobility function) má podle Capparelli, Tiranti (2010) tvar:

$$Y(t) = \int_0^t \psi(t - \tau)I(\tau)d\tau \quad (9)$$

Pohybovou funkci lze považovat za ukazatel podmínek svahové stability, který může být porovnáván s referenčními kritickými hodnotami. Ve skutečnosti model FLAIR spojuje hodnotu pohybové funkce s pravděpodobností nového pohybu P v čase t pomocí různých schémat. Nejjednodušší schéma se запиše následovně (Capparelli, Tiranti 2010):

$$P[E_t] = \begin{cases} 0 & \text{if } Y_{(t)} < Y_{cr} \\ 1 & \text{if } Y_{(t)} \geq Y_{cr} \end{cases}, \quad (10)$$

kde Y_{cr} je hodnota pohybové funkce. Tato proměnná určuje kritické hodnoty a rozhodující podmínky svahu (Capparelli, Tiranti 2010). V praktickém použití je konvoluce (rovnice 9, str. 23) řešena přijetím různých přenosových funkcí ψ . Tvar funkce závisí na zkoumané studii. Tato práce se věnuje případům, ve kterých je vhodný mocninný tvar funkce ψ (Capparelli, Versace 2011):

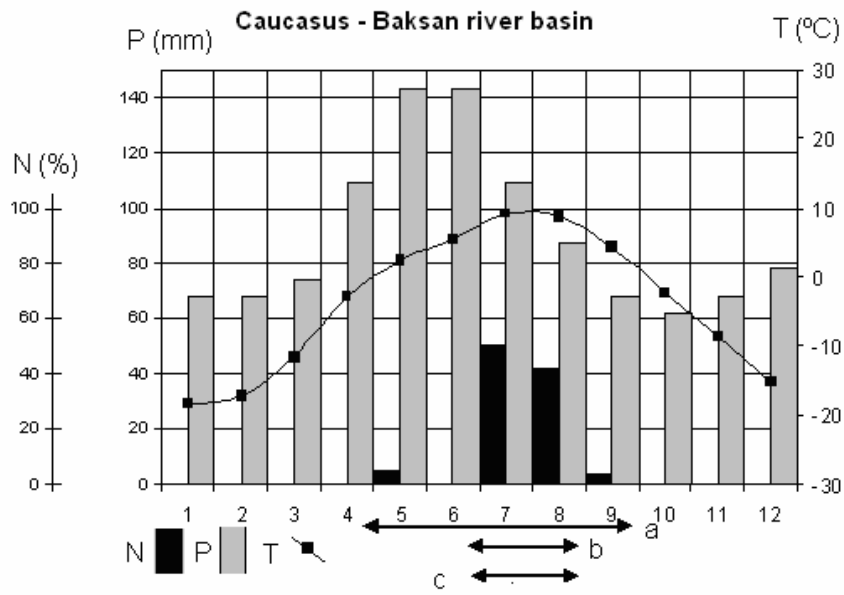
$$\psi(t) = mt^{-q}. \quad (11)$$

Model také uvažuje reálné vzorce srážkových vstupů, protože poskytují různé hodnoty pohybové funkce pro dešťové srážky, které mají stejnou průměrnou intenzitu, avšak s různými hyetogramy. Ostatní modely, například model intenzity a trvání, poskytují jen jednu hodnotu pro pohybovou funkci. Další výhodou je určitá jednoduchost, jelikož při srovnávání aktuálních hodnot dešťových srážek se lépe porovnávají dvě hodnoty než dvě křivky. A v neposlední řadě v modelu FLAIR se váha připočítává krátkému a intenzivnímu pulzu měnícímu se s v čase. Jiné empirické modely používají pouze kumulativní hodnoty srážek (Capparelli, Versace 2011). Model FLAIR lze propojit s modely předpovědi počasí, jako jsou meteorologické nebo stochastické generátory, které předpovídají pravděpodobnost dešťových srážek. Tyto modely pak dávají vstupní data pro model FLAIR. Ten pak vyvodí pravděpodobnost se kterou pohybová funkce v určitém čase t překročí kritickou hodnotu a tím poskytne užitečné informace o předcházejících podmínkách. Vlivem toho, že funkce ve FLAIR modelu mohou mít různé tvary, je model oproti jiným modelům mnohem flexibilnější. Také dokáže reprezentovat různé druhy svahových reakcí (od velmi rychlých až po pomalé reakce) s ohledem na vstup dešťových srážek. Pomocí FLAIR modelu se dá realizovat mnoho aplikací. Tyto aplikace lze dále vyvíjet, neboť pohybová funkce může vzájemně souviset s údaji týkajícími se svahových sesuvů půdy nebo změn tlaku v pórech. Model FLAIR je velmi flexibilní a může být použit pro různé účely (Capparelli, Versace 2011).

Saturated Unsaturated Simulation for Hillslope Instability (SUSHI) je lokální kompletní (fyzikální) model pro popis hydraulických jevů ve svahu. Obsahuje dva moduly. Jeden hydrologicko-hydraulický (Hydro SUSHI), zaměřený na studium

oběhu podzemní vody. Tento modul je založený na Richardsově rovnici, a i když svým zaměřením vypadá na čistě hydrologické úkony, ve skutečnosti studuje ztráty vody v nenasyčené zóně, které mohou mít významný vliv na napájení podzemních vod, a tím výsledné hladiny a následně vliv na stabilitu svahu (Paniconi a kol. 1991). Druhý modul se nazývá geotechnický (Geo SUSHI) a jeho úkolem je hodnocení stability svahu. Jeho funkce se opírají o známé metody obecné limitní rovnováhy a používá rovnici pro destabilizaci svahu podle Frelunda a Rahardja (1993). Pro použití modelu SUSHI je potřeba zjistit určité charakteristiky pro danou oblast, například stratigrafii, topografický profil nebo posloupnost vrstev. Model je schopný odhadnout aktuální evaporaci a její účinky na absorpci (Capparelli, Versace 2011).

Posledním mírně specifickým modelem je jediný globální model založený Belayem (2003). Jedná se o celosvětově rozšířený model, který je určen hlavně pro predikci hlavního výskytu tečení. Závisí na časových odlišnostech klimatických faktorů v různých oblastech (Wieczorek a Glade 2005). Jedním z úkolů modelu je systematická klasifikace regionů s podobnými klimatickými podmínkami, které jsou příznivé pro spuštění tečení. V modelu jsou používány měsíční teploty a hodnoty srážek. Pomocí těchto dat jsou charakterizovány tři období nebezpečí (obr. 2). Prvním z nich je období nebezpečí tečení, ve kterém nastane 100 % veškerých událostí tečení (obr. 2a). V rámci tohoto časového intervalu se vymezuje období hlavního nebezpečí tečení, ve kterém nastane 90 % všech tečení (obr. 2b). Posledním je perioda extrémního nebezpečí tečení, opět zahrnutá v předchozím intervalu, ve které nastává 50 % všech tečení (obr. 2c). Počet tečení za určitý čas se zvyšuje společně s periodou. To znamená, že nejméně tečení nastane v období nebezpečí tečení a nejvíce pak v období extrémního nebezpečí tečení (Wieczorek a Glade 2005). Pro ověření platnosti byl model použit ve všech regionech s výskytem této svahové deformace. Model roztrídí do skupin regiony s podobnými klimatickými podmínkami (Belaya 2006). Tyto skupiny by se pak mohly propojit s vhodným modelem na určení prahové hodnoty srážek a snažit se určit jednu prahovou hodnotu pro všechny tyto regiony.



Obr 2: Rozložení událostí tečení během měsíce v procentech z celkového počtu (N) a období nebezpečí tečení: a) nebezpečí tečení, b) období hlavního nebezpečí tečení, c) extrémní nebezpečí tečení (Belaya 2006)

5 Zhodnocení metodik

5.1 Porovnání modelů

Výskyt tečení a mělkých sesuvů se týká geomorfologických rizik. Řadí se mezi velmi ničivé přírodní katastrofy, a to díky vysokému počtu postižených lidí a počtu úmrtí, způsobených jednotlivými událostmi (Nikolopoulos a kol. 2014). Cílem modelů, které analyzují prahové hodnoty srážek, je zlepšit schopnost předpovědět výskyt událostí v čase i prostoru. V této kapitole se porovnávají výše uvedené modely prahových hodnot srážek. Je vždy potřeba porovnávat modely pro stejně velká území (globální, regionální, lokální). Nemá smysl srovnávat například globální model s lokálním. Pro lepší představu poslouží tabulka 1 a 2.

Fyzikální modely	Územní určení modelu	Typ
Soil Water Status	regionální	koncepční
Antecedent Daily Rainfall *	regionální	procesní
Leaky barel	lokální	procesní
SUSHI	lokální	koncepční

Tab. 1: Fyzikální modely

Empirické modely	Územní určení modelu	Typ
Daily Rainfall	regionální	historický
Antecedent Daily Rainfall *	regionální	statistický
API	regionální	historický
Bayesovský přístup	regionální	statistický
Frekvenční přístup	regionální	statistický
NLSM	regionální	statistický
FLaIR	regionální	historický

Tab. 2: Empirické modely

**Antecedent Daily Rainfall* model, který spadá pod oba druhy modelů, kdy se fyzikálně určí koeficient pro výpočet předešlých srážek. Statistické metody se pak použijí k získání prahových hodnot (Glade a kol. 2000).

Modely na určení prahových hodnot srážek se mezi sebou velmi liší. Jejich odlišnosti spočívají v geologických charakteristikách povrchu a příslušných procesech vlivu dešťových srážek na stabilitu svahu. Další rozdíly v modelech navíc závisí na (Capparelli, Versace 2011):

- I. úrovní detailů použitých k popisu hydrologických a geotechnických procesů v příslušném svahu,
- II. rozměru svahu, od velkých oblastí s mnoha sesuvy po malé oblasti zahrnující jedinou svahovou deformaci,
- III. kvalitě a množství dostupných dat (hydrologických, geotechnických).

Výzkumy a výpočty modelů se provádějí pomocí záznamů o sesuvech z období několika, třeba i desítek let. Vznikají pak různě velké katalogy, ve kterých má každý sesuv tři záznamy: datum sesuvu a známý nebo předpokládaný vznik sesuvu, zeměpisné umístění a typ svahové deformace (určuje se zejména pomocí klasifikace navržené Crudenem a Varnesem (1996). Datová sada také obsahuje informace o nejistotě s časovou a prostorovou identifikací sesuvu (Rossi a kol. 2017).

Výše v práci byly modely rozděleny na empirické a fyzikální. Empirické přístupy se liší v délce předcházejících dešťových srážek, které je třeba vzít v úvahu pro analýzu povrchu. Pro mělké sesuvy obvykle stačí uvažovat pouze předcházející srážky v intervalu několika hodin. Omezení empirických metod spočívá v tom, že přijímají zjednodušené předpoklady o velmi složitých jevech v kombinaci mimořádně širokého spektra informací. Další omezení záleží na použití kumulativních srážek a průměrné intenzity srážek v pohybové funkci, která nerozlišuje jednotlivé dešťové události. Také použití prahové funkce zavádí nadměrné aproximace, což může vést k nepřesnostem. Výhoda empirických modelů je založena na jejich jednoduchosti z hlediska použití, ale jejich aplikace mimo data, na kterých byly odvozeny, ztrácí smysl uplatnění (Krása 2010).

Účelem fyzikálních modelů je reprodukovat fyzikální chování procesů, které se vyskytují na zkoumaném svahu. Tím, jak modely potřebují měření nebo celkově shromažďování různých environmentálních, geotechnických či dalších parametrů, mohou být použity jen na malé plochy, tedy na jednotlivé sesuvy nebo malá území (Rossi a kol. 2017). Tyto modely umožňují pracovat s výsledky na vyšší úrovni. Na druhou stranu to bývají modely složité jak na vstupní data, tak na výpočetní techniku a vyžadují mnoho šetření na místě (Capparelli, Versace 2011). V neposlední řadě jsou náročné na kvalifikaci uživatele.

Kvalita modelu záleží i na vstupních datech srážek. Data se získávají z měřidel. Zde může nastat problém malé hustoty těchto měřidel. Měřidla nedokáží pokrýt celý region, zvláště pokud se jedná o orograficky složité oblasti. Proto se pak hodnoty získávají odhadem z nejbližších dostupných sousedních měřidel. V Alpách je typická vzdálenost mezi jednotlivými měřidly a místy sesuvů 4 až 15 kilometrů (Nikolopoulos a kol. 2014). Takto hustá síť se nalézá spíše ve vyspělých oblastech (Itálii), v méně vyspělých státech je vzdálenost měřidel mnohem větší a jejich síť řidší (Nikolopoulos a kol. 2014). Odhadnuté hodnoty podléhají významným nejistotám, což může mít za následek falešné popluchy. Tedy jen v případě, že dané území disponuje systémem včasného varování. V poslední době se čím dál více začínají používat meteorologické radary a srážky detekované satelitem na odhadování srážek jako údaje do prahových modelů. Družicová data mohou být obzvláště užitečná v místech, kde chybí dešťová měřidla nebo jsou prospěšná v odlehlých a rozsáhlých oblastech. Při porovnání parametrů prahových hodnot srážek získaných z pozemních měřidel s hodnotami z družic se většinou zjišťuje, že hodnoty získané z družic jsou nižší než hodnoty získané z pozemního měření. Toto zjištění se pak uplatňuje v dalších analýzách (Rossi a kol. 2017).

Pro prahové hodnoty srážek má význam uvažovat jen lokální nebo regionální modely. Globální zkoumají příliš velká území a výsledky mohou být až příliš nepřesné. Jediný globální model nalezený v načtené literatuře byl založený Belayem (2003) a nesnaží se poskytovat nové prahové hodnoty. Umožňuje však roztřídění podobných klimatických oblastí do skupin a určit tak období, ve kterém je v těchto oblastech možný výskyt tečení. Model sice nedokáže přesně určit, kdy nastane sesuv, avšak alespoň vymezí nebezpečné období roku, což je prospěšné v místech, kde se nachází řídká síť srážkových měřidel (Belaya 2006).

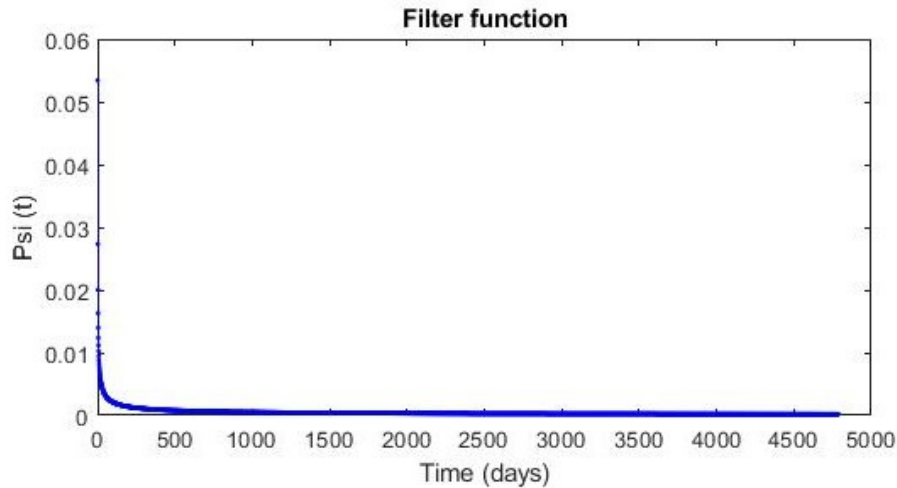
Největší skupinou jsou regionální modely. První z uvedených modelů, *Daily Rainfall*, vyniká svou jednoduchostí, ale zanedbává mnoho informací, proto jsou pro určení prahových hodnot srážek preferovány jiné modely. Například *Antecedent Daily Rainfall* model je kombinací fyzikálního a empirického modelu (viz tabulka 1 a 2). Prostřednictvím této kombinace má k dispozici přesnější měření (Glade a kol. 2000). Tím jsou přesnější i odvozené prahové hodnoty srážek. Oblíbený a detailně popsáný model API je opět o něco přesnější než předchozí dva modely, neboť dává do souvislosti srážky a evapotranspiraci (Benkhaled a kol. 2004). Na tento model bylo sepsáno mnoho studií a model je stále vyvíjen. Jedná se o velmi perspektivní model pro výpočet

prahových hodnot srážek. Následující dvě čistě statistické metody, Bayesovský a frekvenční přístup, je velmi těžké porovnat s ostatními regionálními modely, neboť mají značně složité statistické funkce a není jednoduché jim porozumět. Porovnání dále velmi znesnadňuje málo dosavadních zkušeností s těmito metodami (Brunetti a kol. 2010). U metod nelineárních nejmenších čtverců, kvantilové regrese a metody nejmenších čtverců záleží na oblasti, pro kterou se odvozují prahové hodnoty srážek, na postupu získání těchto potřebných dat a na dostupnosti těchto dat (Brunetti a kol. 2010). Od toho se pak odvíjí výběr vhodné metody. Vcelku nově se vyvíjející model FLAIR uvažuje komplexní předchozí informace o místě vzniku sesuvných událostí. Tím dává dobré předpoklady nejen pro další výzkum v oblasti prahových hodnot srážek, ale i pro využití v systému včasného varování před svahovými deformacemi (Capparelli, Versace 2011). Modelem FLAIR se nadále zabývá následující podkapitola (5.2). Jediný uvedený fyzikální regionální model je model *Soil Water Status*. Stejně jako v modelu API se zde bere v úvahu evapotranspirace. Oproti API bude model *Soil Water Status* na výpočty složitější, na druhou stranu ale přesnější, protože se jedná o fyzikální model.

Lokální modely bývají většinou fyzikální. Zajímají se o malé území, a tím mohou být přesnější než jiné modely. V práci jsou uvedeny dva takovéto modely. Jedná se o modely *Leaky barel* a SUSHI. Nelze je porovnat jako dva naprosto stejné modely, při porovnání je třeba brát ohled na rozdílný typ modelu (procesní, koncepční). *Leaky barel* je oproti modelu SUSHI velmi jednoduchý, zejména svými technikami a výpočty (Wieczorek a Glade 2005). Na druhou stranu SUSHI ve svých modulech posuzuje i určité fyzicko-geografické charakteristiky pro danou oblast, tudíž se do modelu zahrnuje větší množství informací, a díky tomu se model stává přesnější. Další výhodou modelu je jeho schopnost odhadnout aktuální evaporaci a její účinky na absorpci (Capparelli, Versace 2011). Nelze říci, který z modelů je nejlepší. Každý má své výhody a je primárně určen pro různá území. Je potřeba najít kompromis a použít model tak, aby byl vhodný pro zvolenou oblast.

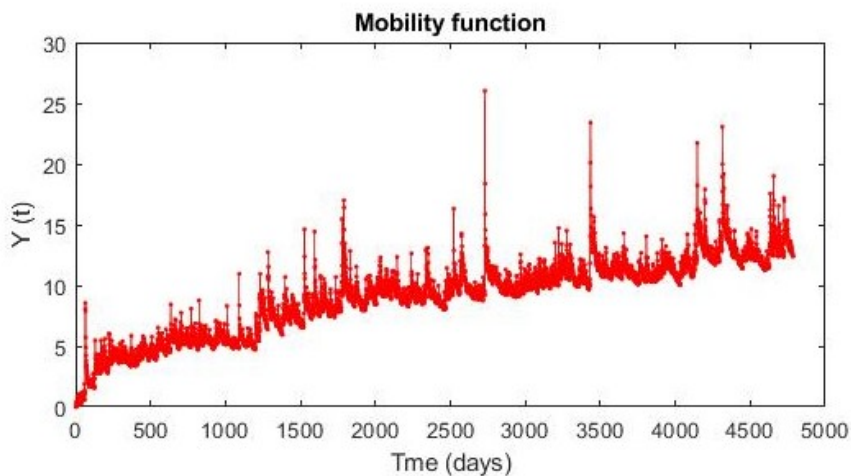
5.2 Aplikace modelu FLAIR

Počtní postup modelu je popsán v kapitole 4.2. Tato část práce prezentuje výsledky jednotlivých výpočtů. Nejprve se podle rovnice 2 spočetla přenosová funkce $\psi(t)$ s exponenciálním tvarem křivky (viz graf 1).



Graf 1: Křivka přenosové funkce

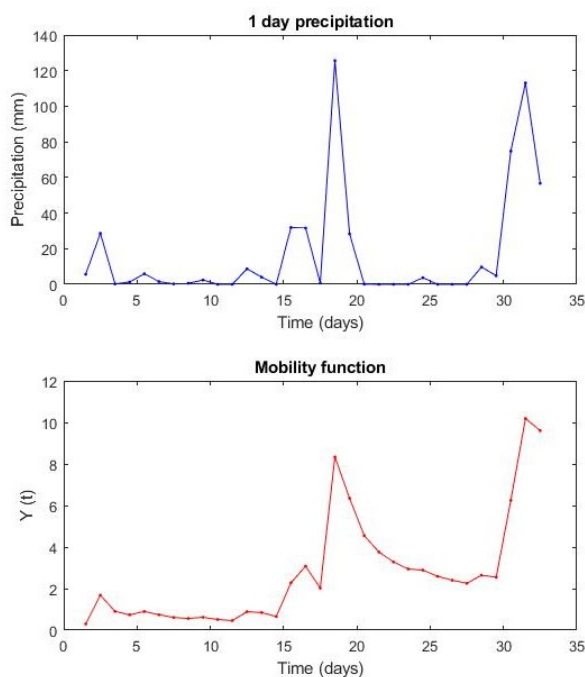
Graf 1 znázorňuje, že s každým předchozím dnem se vliv srážek snižuje. Největší vliv mají srážky v den, ve kterém nastanou. Poté se použije funkce s rovnicí 3. Jedná se o konvoluci, která dává do souvislosti předcházející funkce. Zde už hraje roli akumulace srážek. Funkce nasčítá konvoluční integrál s určitou danou vahou. Při výpočtech se postupně snižuje váha srážek z prvního dne počítaného období (např. 1. hodnota ze 30 má nejnižší možnou váhu) a větší váha se přikládá pozdějším dnům vybraného období (např. 30. hodnota ze 30 má nejvyšší možnou váhu). Z těchto výpočtů je následně vygenerován graf pohybové funkce (viz graf 2).



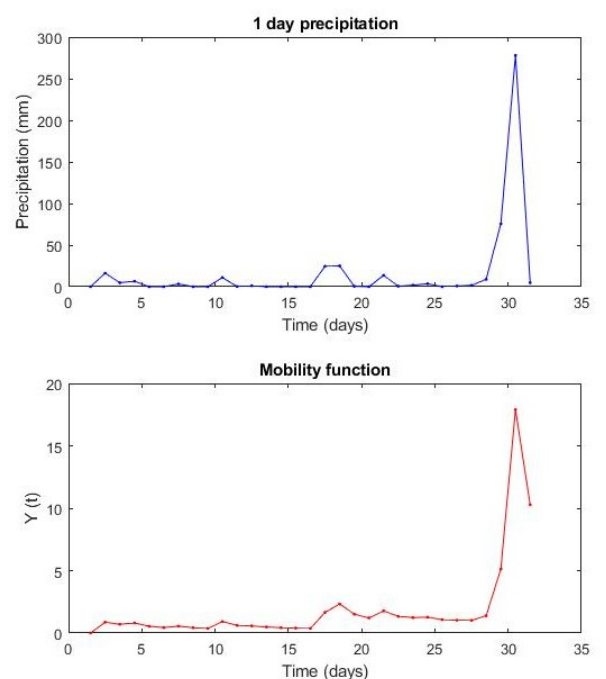
Graf 2: Křivka pohybové funkce

Tento graf vykresluje denní srážky v průběhu 30 let (1983-2013). Pro analýzu svahových deformací se ukázaly jako důležité pouze roky s intenzivními dešti. Ty jsou v grafu dobře patrné. Zobrazuje je 5 největších maxim v průběhu křivky.

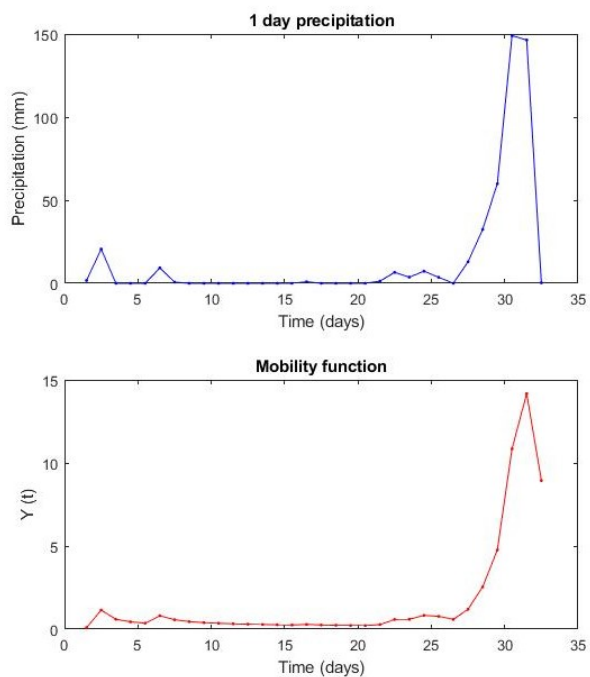
V případě použitých dat jsou roky s intenzivními dešti roky 1997, 2002, 2006, 2010 a 2011. Z těchto let bylo vybráno 30 hodnot denních srážek, které předcházely ročnímu maximu srážek. Tyto úseky hodnot jsou vybrány z důvodu úvahy, že v nejvyšším ročním maximu srážek se spustí svahová deformace. Průběh srážek a následně křivku pohybové funkce ukazují grafy 3 - 7.



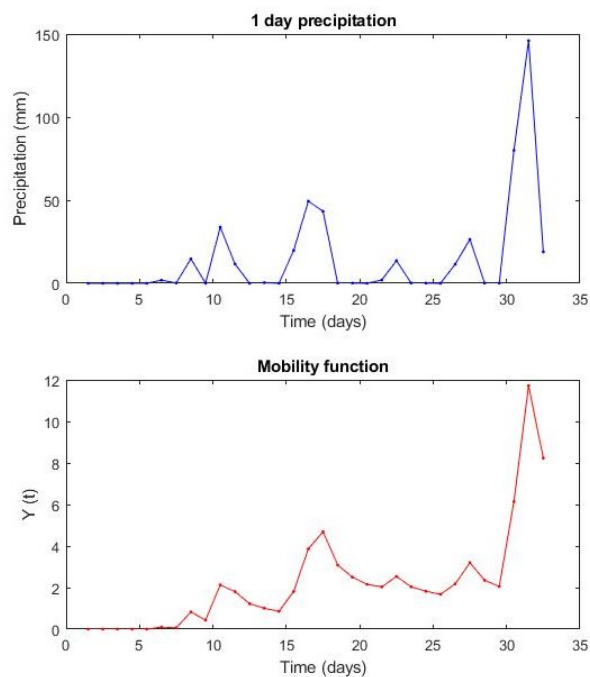
Graf 3: 30denní srážky pro rok 1997 (maximum v červenci)



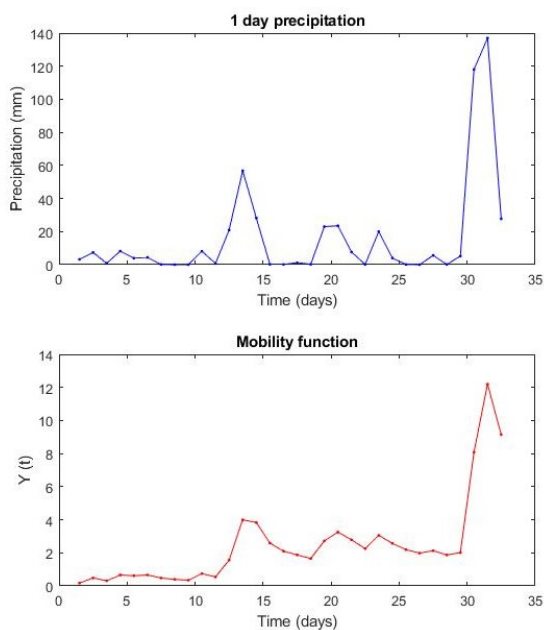
Graf 4: 30denní srážky pro rok 2002 (maximum v srpnu)



Graf 5: 30denní srážky pro rok 2006 (maximum v srpnu)



Graf 6: 30denní srážky pro rok 2010 (maximum v srpnu)



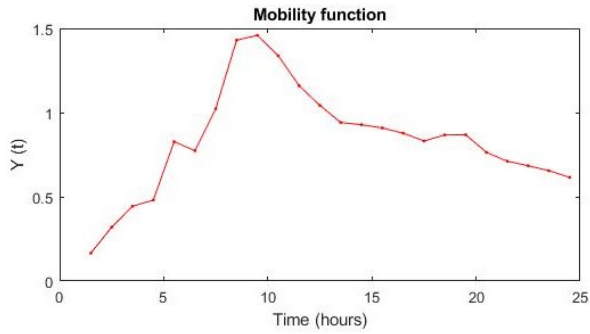
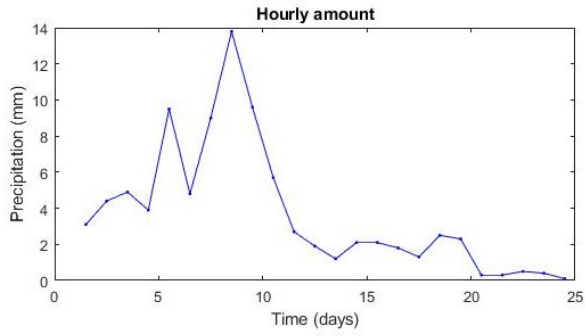
Graf 7: 30denní srážky pro rok 2011 (maximum v červenci)

Graf č.	Maximální hodnota pohybové funkce
3 (1997)	10,19
4 (2002)	17,9
5 (2006)	14,17
6 (2010)	11,72
7 (2011)	12,2

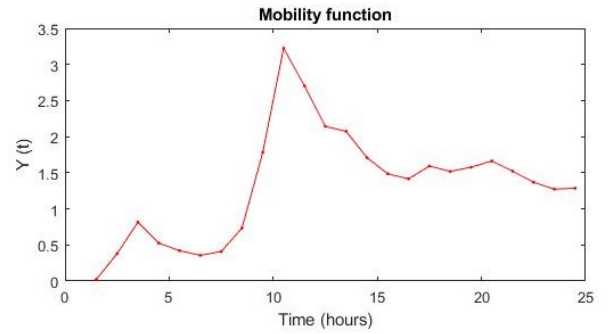
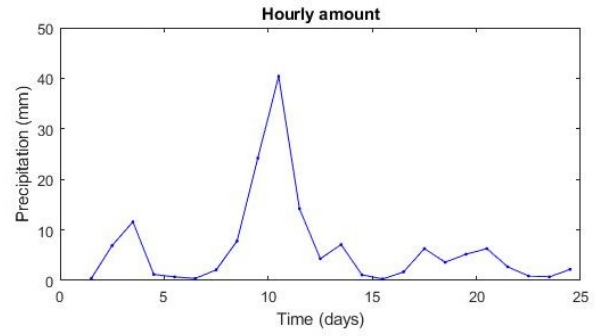
Tab. 3: Maximální hodnoty pohybové funkce z grafů 3 – 7

Z grafů je možné usoudit, jak velké by mohlo být nasycení půdy, podle kterého lze snáze odhadnout prahové hodnoty srážek pro spuštění svahové deformace. Možné sesuvy mohly nastat v letech 1997, 2010 a 2011, neboť srážky v těchto obdobích vykazují jak vysoké maximální hodnoty srážek, tak i značné množství srážek v průběhu předešlých dní před dosažením srážkového maxima, což může mít za následek významné nasycení půdy. Z bližšího prozkoumání grafů 3, 6 a 7 je vidět, že nejvyšší možné hodnoty pohybové funkce (mobility function) dosahuje graf 7, a proto lze rok 2011 označit za velmi rizikový z hlediska svahových deformací. Grafy z let 2002 a 2006 ukazují sice nejvyšší maximální srážky i největší hodnotu pohybové funkce (viz tabulka 3), ale srážky v nejbližších předchozích dnech od maxima byly nulové nebo jen velmi nízké. To má za následek nízké nasycení, a tedy i nízkou pravděpodobnost spuštění sesuvu.

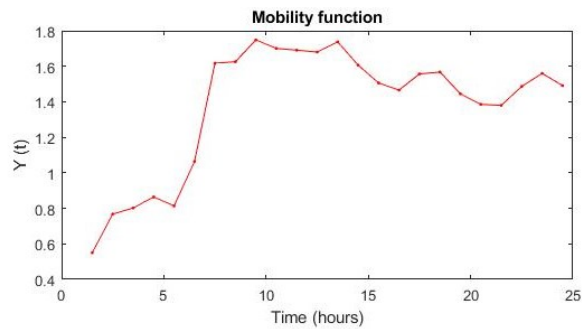
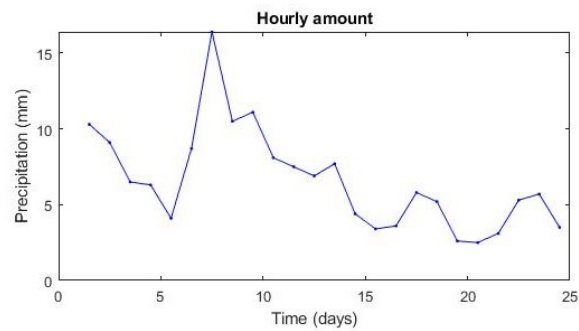
Dalšími důležitými intervaly pro analýzu svahových deformací jsou úhrny srážek za hodinu. Vycházelo se z grafů 30denních srážek (grafy 3 - 7), ze kterých byly vybrány jen ty s vyššími předešlými srážkami před ročním maximem, tedy roky 1997, 2010 a 2011. V těch byl zvolen den s maximálním úhrnem. Průběh hodinových srážek z vybraného dne ukazují grafy 8 - 10.



Graf 8: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 1997



Graf 9: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 2010



Graf 10: Hodinové srážky pro den s maximálním úhrnem srážek v roce 2011

Graf č.	Maximální hodnota pohybové funkce
8 (1997)	1,459
9 (2010)	3,225
10 (2011)	1,719

Tab. 4: Maximální hodnoty pohybové funkce grafů 8 – 10

Z tabulky je možné vidět, že výrazně vyšších hodnot dosahuje graf 9. Tedy rok 2010, který v 30denních úhrnech dosahoval hned druhých nejvyšších hodnot. Lze ho tedy také považovat za velmi rizikový rok z hlediska spuštění sesuvu. Z grafů je zajímavé vyčíst, že nejvyšší srážky spadly během dopoledních nebo ranních hodin.

Z dostupných dat a použitého modelu nelze zjistit prahovou hodnotu v podobě přesně daného čísla. Pro výpočet prahové hodnoty z tohoto modelu nejsou dostupné potřebné parametry. S přesnou prahovou hodnotou by šla grafy proložit přímkou a s její pomocí by bylo možné určit minimální množství srážek pro vznik sesuvu.

6 Diskuze

Modely analyzující prahové hodnoty srážek jakožto spouštěče svahových deformací není jednoduché porovnávat. V práci se porovnávaly hlavně regionální a lokální modely. Globální model je v práci uveden jen od autora Belaye (2003). Jedná se o specifický model, který neurčuje prahové hodnoty srážek, ale spojuje oblasti do určitých kategorií se stejnými klimatickými vlastnostmi. Pro tyto kategorie by pak mohla jít určit celková prahová hodnota srážek. Nabízí se možnost dalšího výzkumu v této oblasti, který by zjišťoval, jaký model by nejlépe určil prahové hodnoty srážek v těchto kategoriích.

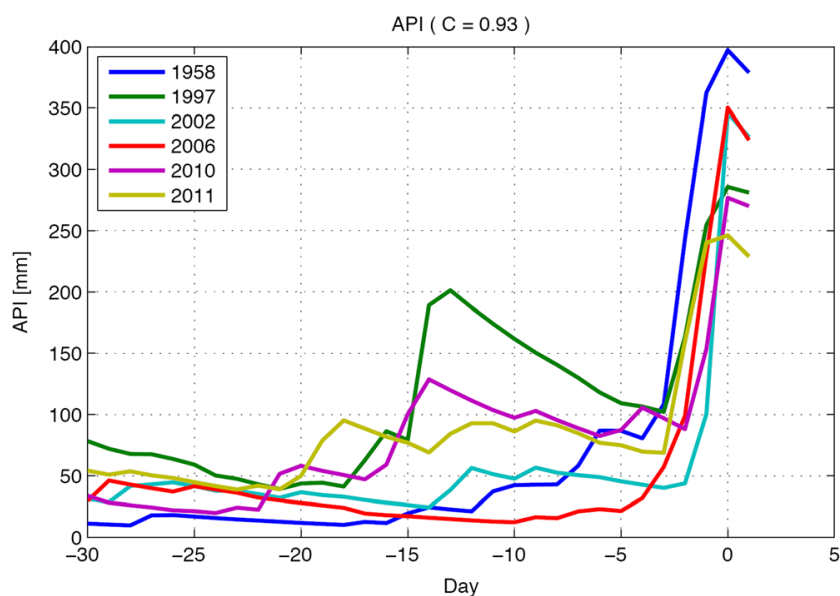
Většina modelů zahrnuje do výpočtů předešlé dešťové srážky. Tento parametr berou jako jeden z klíčových. Problém je určit přijatelnou délku kritického období. Například u modelu *Soil Water Status* vyšla jako nejvhodnější délka 10 dnů (Glade 2000), ale v jedné studii, kde se počítalo s modelem API, vyšla jako vhodná délka 5 dnů (Benkhaled a kol. 2004). Tento rozdíl mohl být způsoben jiným typem modelu (viz tabulka 1 a 2) nebo výsledek mohl být ovlivněn oblastí, kde byly modely testovány. Tyto skutečnosti jen potvrzují nevhodnost užití všech modelů na libovolné oblasti.

U indexu API může docházet k nepřesnostem. Například parametrem c , což je konstanta evapotranspirace lišící se region od regionu. Velikost regionu není přesně určena a v tomto případě se bere v úvahu jako region celé Česko, pro které se zadává jen jediná hodnota (0,93) (Steinhart 2010). Z hlediska svahových deformací se jedná o velkou rozlohu, kde se mohou fyzicko-geografické podmínky vcelku lišit. Tím model zkresluje výsledky a následné prahové hodnoty.

V této práci byl podrobněji zkoumán model FLAIR, který by mohl být přesnější než model API z důvodů uvedených výše. Z výsledků plyne, že z dostupných zdrojů (Capparelli, Versace 2011; Capparelli, Tiranti 2010) nelze určit přesnou prahovou hodnotu srážek, neboť k tomu nejsou dostupné všechny potřebné parametry. Ale z vypočtených grafů je možné usoudit jisté souvislosti. Z grafů 30denních srážek vyšel jako nejrizikovější rok 2011 (graf 7), ale vysoké hodnoty dosahoval i rok 2010 (graf 6). Tento rok byly výrazně nejvyšší i hodinové úhrny srážek (tabulka 3). Podle studie Smolíkové a kol. (2016) nastane svahová deformace v období, kdy všechny hodnoty dosahují maxima, což zde byl rok 2010 (tab. 4). Toto tvrzení potvrzuje i fakt, že v oblasti, odkud pochází data, sesuv opravdu nastal (Smolíková a kol. 2016).

Sesuv byl zkoumán modelem API, poté se zkoumala hodinová intenzita a krátká intenzita srážek. Model FLAIR byl proložen daty denních srážek (graf 2) a hodinových srážek (grafy 8 - 10). Výpočet hodnot krátké intenzity nelze tímto modelem provést, neboť do modelu jsou potřeba kontinuální data, což u krátké intenzity chybí. Ale při porovnání výsledků z modelu FLAIR s výsledky z modelu API (obr. 3) a s úhrny hodinových srážek je vidět vzájemná spojitost. Tuto spojitost lze vidět při porovnání grafů 3 – 7, na obrázku 3, a také při srovnání tabulek 2, 3 a 4. Výsledky modelů se velmi podobají. Jsou vidět podobné průběhy křivek. Tedy rok, který má nejvyšší hodnotu API, má nejvyšší hodnotu i v průběhu křivek. U tabulek je také možné zpozorovat shodu. Z toho vyplývá, že tato práce početně potvrzuje teoreticky odvozené prahové hodnoty ze studie Smolíkové a kol. (2016). Dále se prokázalo, že model FLAIR lze použít pro analýzy podobných oblastí jako jsou Jizerské hory.

Je potřeba si také uvědomit, že hodnoty srážek mohou být nepřesné. Srážková měřidla mají své limity, například malou hustotu stanic, poruchy a tím výpadky měření anebo měřidla mohou být nepřesně umístěna (ve velké vzdálenosti od místa sesuvu).



Obr. 3: Výsledky modelu API pro 30 dní před srážkovými maximy (Smolíková a kol. 2016)

Date	MAX mm/ 15/10* min	Intensity (mm/h)	Rain gauge	1 hour amount (mm)				Total daily amount (mm)			API 30
				KN	SM	SMH	PC	KN	SM	SMH	
03 Jul 1958 (DF)	-	-	-	-	-	-	-	68.7 (DS)	153.2 (BD)	141.6 (MN)	243.2 (BD)
07 Jul 1997	4.4	17.6	SM	18.4	15.8	17.9	-	125.6	119.2	124.8	189.2
20 Jul 1997	-	-		10.9	-	13.8	-	46.7	43.7	56.7	254.5
29 Jul 2001	10.0	40.0	KN	18.3	11.3	9.2	-	30.9	22.0	22.5	106.7
31 Jul 2002	14.8	59.2	KN	24.4	-	16.4	-	24.5	-	16.5	24.4
13 Aug 2002	6.3	25.2	SMH	23.1	-	22.4	-	278.0	-	271.1	100.5
29 Aug 2002	15.3	61.2	KN	23.4	-	17.5	-	25.9	-	17.9	129.9
23 Jul 2003	18.7	74.8	KN	26.2	-	30.0	-	30.1	-	30.7	39.2
23 Aug 2005*	13.4*	80.4	SM	20.3	22.5	14.8	-	58.1	60.2	53.2	65.3
21 Jun 2006	17.6	70.4	KN	20.9	15.1	13.7	-	36.3	30.0	27.3	38.3
07 Aug 2006	5.8	23.2	KN	20.0	12.8	-	-	146.4	146.1	-	230.3
07 Aug 2006*	6.4*	38.4	SM	-	15.4	-	-	146.4	146.1	-	230.3
10 Aug 2007	10.6	42.4	KN	15.1	1.9	11.6	-	32.4	27.5	31.1	29.6
09 Jun 2010	15.1	60.4	SMH	22.2	19.3	25.1	-	32.4	29.7	30.8	75.1
07 Aug 2010 (DF)	13.4	53.6	SM	32.0	40.4	-	-	123.1	133.4	146.0	153.5
20 Jul 2011*	5.9*	35.4	PC	17.3	-	18.2	20.9	118.0	110.0	116.0	68.7
21 Jul 2011*	3.7*	22.2	SMH	17.8	-	16.8	14.6	126.5	137.0	128.3	159.6
19 Aug 2011*	15.6*	93.6	SM	19.3	25.2	26.2	24.1	45.7	49.2	49.4	77.2
25 Aug 2011*	18.0*	108.0	KN	41.6	35.9	42.6	29.7	49.5	44.6	50.3	94.7
16 Jun 2012*	15.1*	90.6	KN	19.0	15.2	14.4	21.1	21.8	18.0	18.0	40.8
28 Jul 2012*	12.7*	76.2	KN	27.8	17.5	28.0	28.3	46.9	39.3	48.5	33.7
29 Jul 2013*	14.9*	89.4	KN	42.9	31.4	39.5	50.1	62.7	54.4	66.1	32.6

Tab. 4: Detailní srážková data pro jednotlivé roky (Smolíková a kol. 2016)

7 Závěr

Problematika svahových deformací je značně široké téma. Tato práce se zaměřila pouze na dva typy svahových deformací, kterými jsou mělké sesuvy a tečení. K těmto dvěma typům byly z dostupných zdrojů shromážděny dosud publikované modely na určení prahových hodnot srážek, tedy jakési meze, po jejímž překročení se sesuv spustí. Prahové hodnoty srážek jsou klíčové pro predikci svahových deformací a následné zdokonalení systému včasného varování před těmito sesuvy.

Rešerše literatury stručně představila problematiku prahových hodnot srážek jakožto spouštěče svahových deformací. První kapitola krátce uvedla do tématu a shrnula základní členění svahových deformací. Dále vysvětlila podstatné pojmy týkající se prahových hodnot srážek a modelů analyzujících tyto prahové hodnoty. Tato část také představila jednotlivé druhy modelů a jejich dělení a následně jednotlivé modely popsala. U většiny modelů (zejména u empirických) popis obsahuje i formální definice modelů (rovnice výpočtů), ale největší pozornost byla věnována rovnicím modelu FLAIR, který je v práci pomocí programu Matlab početně otestován.

V páté kapitole byly modely rozčleněny do dvou tabulek na empirické a fyzikální, kde se ke každému modelu uvedlo jejich územní určení (na jak velkou oblast je model vhodný) a typ. Poté následovalo kritické zhodnocení modelů. Zhodnocení se opět rozdělilo podle druhu modelu (fyzikální/empirický) a podle území, na které je model určen, tedy na regionální a lokální. Příklady globálních modelů, určujících přímo prahové hodnoty srážek, nebyly v načtené literatuře zmíněny, proto v kritickém zhodnocení chybí. V práci je uvedený specifický globální model podle Belaye (2003). Tento model však pouze klasifikuje klimatická území do určitých kategorií, což sice může být významné k určení prahových hodnot srážek k jednotlivým kategoriím, ale neurčuje prahové hodnoty srážek přímo.

Jedním z hlavních výstupů této práce je přehled a srovnání modelů analyzujících prahové hodnoty srážek, neboť takovýto přehled nebyl dosud sepsán. Srovnání ukázalo velkou specifičnost při používání jednotlivých modelů, což potvrzuje odlišná délka kritického období modelu *Soil Water Status* (10 dní) (Glade 2000) a modelu API (5 dní) (Benkhaled a kol. 2004). Tato specifičnost se také ukazuje na zdrojích dat, které jsou potřeba na výpočty modelu. Velmi záleží, zda se uvažují jen dešťové srážky (model *Antecedent Daily Rainfall*) nebo i odtok vody, evapotranspirace a vlastnosti horniny (model *Soil Water Status*). V případě, že zdrojem dat jsou jen srážky, pak výsledek

kriticky záleží na frekvenci odečtu, tedy zda jsou v daném modelu použity denní srážky, hodinové srážky nebo srážky krátké intenzity. Dále bylo zjištěno, že u některých modelů silně záleží na homogenitě datové řady, neboť většina modelů pracuje s kontinuálními daty bez výpadku měření. V praxi jsou ale časté výpadky měření z různých důvodů, většinou technických. Chybějící hodnoty je potom potřeba dopočítat tak, aby datová řada byla kompletní. Způsob dopočtu dat (v práci je použita lineární regrese) tak ve svém důsledku ovlivňuje výsledek modelu.

Rozdělení a porovnání druhů modelů přineslo zjištění, že výhodou fyzikálních modelů je jejich vysoká přesnost, ale lze je použít jen na malé území. Nevýhodou je pak jejich náročnost jak na kvalitu vstupních dat, tak na kvalifikaci uživatele. Bylo shledáno, že výhodou empirických modelů je jejich jednoduchost a nenáročnost z hlediska použití. Omezením těchto druhů modelů je nemožnost použití jiných než původních typů dat.

Poslední cíl práce se týkal otázky, zda lze modelem FLAIR určit prahovou hodnotu srážek a následně ji porovnat s prahovými hodnotami srážek vypočtenými jinými modely. K porovnání byl použit model API a odvozené hodinové srážky z tabulky 4. Hodnoty srážek krátké intenzity nebyly použity z důvodu nekompletní datové řady. Porovnání ukázalo, že oba modely generují podobné výsledky. Model FLAIR je možné použít na podobné analýzy jako model API. Dále bylo zjištěno, že model FLAIR potvrzuje prahové hodnoty srážek intuitivně odvozené ve studii Smolíkové a kol. (2016).

Přínosem této práce je aplikace relativně nového modelu (FLAIR) na historická srážková data a ex post analýza kvality modelu FLAIR. Z aplikovaného modelu FLAIR a z dostupných informací o tomto modelu nicméně není možné zjistit přesnou prahovou hodnotu srážek. Hodnota srážek se vypočítává mimo rovnici 3 (viz str.12). Výpočty přesné prahové hodnoty srážek z tohoto modelu by měly být záměrem dalšího výzkumu.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

GOUDIE, A. (2004): Encyclopedia of geomorphology, 1. vyd. London: Routledge, ISBN 0-415- 27298-X

BELAYA, N. L. (2003): Distribution model for periods of debris-flow danger. In: D. Rickemann and C-L. Chen (eds), Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment: Proceedings of the 3rd International Conference, Davos, Switzerland, September 10-12 (pp. 59-70). Millpress, Rotterdam.

BELAYA, N. (2006): Estimation of monthly distribution of debris-flow events for the territory of the USA (using the distribution model for periods of debris-flow danger). Proceedings of the iEMSs 3rd Biennial Meeting, " Summit on Environmental Modelling and Software".

BENKHALED, A., REMINI, B., MHAIGUENE, M. (2004): Influence of antecedent precipitation index on the hydrograph shape. Society, April, I, 81–87.

BRUCE, J. P., CLARK, R. H. (1966): Introduction to Hydrometeorology. In: Pergamon Press, 317

BRUNETTI, M. T., PERUCCACCI, S., ROSSI, M., LUCIANI, S., VALIGI, D., GUZZETTI, F. (2010): Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. Natural Hazards and Earth System Science, 3, 10, 447–458.

CAPPARELLI, G., TIRANTI, D. (2010): Application of the MoniFLaIR early warning system for rainfall-induced landslides in Piedmont region (Italy). Landslides, 4, 7, 401–410.

CASCÓN, C. R, PELLARIN, T., GIBON, F., BROCCA, L., COSME, E., CROW, W., PRIETO, D. F., YANN, H. K., MASSARI, CH. (2017): Correcting satellite-based precipitation products through SMOS soil moisture data assimilation in two land-surface models of different complexity: API and SURFEX. In: Remote Sensing of Environment, Elsevier, 295-310

CROSTA, G., FRATTINI, P. (2001): Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: Proc. 2nd EGS Plinius Conf. on Mediterranean Storms (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, ds). Siena, 463–487

CROZIER, M. J., EYLES, R. J. (1980): Assessing the probability of rapid mass movement. In: Technical Groups, Proceedings of 3rd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. New Zealand, Wellington, 247–251

CRUDEN, D. M., VARNES, D. J. (1996): Landslide types and processes. In: Turner, A. K., Schuster, R. L., Landslides, Investigation and Mitigation, Transportation Research Board. Special Report 247, 36–75

- CAPPARELLI, G., VERSACE, P. (2011): FLaIR and SUSHI: Two mathematical models for early warning of landslides induced by rainfall. *Landslides*, 1, 8, 67–79.
- DE LUCA, D. L., VERSACE, P. (2017): A comprehensive framework for empirical modeling of landslides induced by rainfall: the Generalized FLaIR Model (GFM). *Landslides*, 3, 14, 1009–1030.
- DESCROIX, L., NOUVELOT, J. F., VAUCLIN, M. (2002): Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-West Mexico). In: *Journal of Hydrology*, Elsevier, 114-130
- FRELUND, D. G., RAHARDJO, H. (1993): *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons, INC, New York
- GLADE, T. (2000): Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand - the soil water status model. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband*, March, 122, 63–84.
- GLADE, T., CROZIER, M., SMITH, P. (2000): Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model.” *Pure and Applied Geophysics*, 6–8, 157, 1059–1079.
- GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M., STARK, C. P. (2007): Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 3–4, 98, 239–267.
- KOHLER, M. A., LINSLEY, R. K. (1951): *Predicting the runoff from storm rainfall*. Weather Bureau, US Department of Commerce, Research Paper No.34, Washington”
- KRÁSA, J. (2010): *Empirické modely vodní eroze v ČR. Habilitační práce*. Praha.
- NIKOLOPOULOS, E. I., CREMA, S., MARCHI, L., MARRA, F., GUZZETTI, F., BORGA, M. (2014): Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology*, 221, 286–297.
- ONDRÁŠIK, R., VLČKO, J., FENDEKOVÁ, M. (2011): *Geologické hazardy a ich prevencia*. 2. dopl. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Univerzity Komenského, 2011. ISBN 978-80-223-2956-9.
- PANICONI, C., ALVARO, A. A., WOOD, E. F. (1991): Numerical evaluation of iterative and noniterative methods for the solution of the nonlinear Richards equation. *Water Resour Res*, 6, 27, 1147–1163
- ROSSI, M., LUCIANI, S., VALIGI, D., KIRSCHBAUM, D., BRUNETTI, M. T., PERUCCACCI, S., GUZZETTI, F. (2017): Statistical approaches for the definition of landslide rainfall thresholds and their uncertainty using rain gauge and satellite data. *Geomorphology*, 285, 16–27.

SMOLÍKOVÁ, J., BLAHUT, J., VILÍMEK, V. (2016): Analysis of rainfall preceding debris flows on the Smědavská hora Mt., Jizerské hory Mts., Czech Republic. *Landslides*, 4, 13, 683–696.

SOCIETY, S., ANNALER, G., GEOGRAPHY, P. (2017): The Rainfall Intensity : Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows Author (s): Nel Caine Published by : Taylor & Francis , Ltd . on behalf of the Swedish Society for Anthropology and Geography Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/52044>. 1, 62, 23–27.

STEINHART, M. (2010): Application of rainfall-runoff model Boussmo. Diploma thesis, Czech Agriculture University in Prague (in Czech)

WIECZOREK, G. F., GLADE, T. (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob, M., Hungr, O. (eds.): *Debris flow hazards and related phenomena*. Springer, Berlin, 325–362.

WILSON, R. C. (2000): Climatic variations in rainfall thresholds for debris-flow activity. In: *Proceedings 1st Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Claps P, Siccardi F, eds). Maratea, 415–424

ZÁRUBA, Q., MENCL, V. (1987): *Sesuvy a zabezpečování svahů. Druhé přepracované a doplněné vydání*. Praha: Academia, 1987.

ZHAO, Y., WEI, F., YANG, H., JIANG, Y. (2011): Discussion on using antecedent precipitation index to supplement relative soil moisture data series. *Procedia Environ Sci* 10, 1489–1495

Internetové zdroje

ČGS (2007): *Geohazardy*. ČGS [online]. Praha: ČGS, 2007 [2017-12-18]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-23/>

HUTCHINSON, J. N. (1968): Mass movement. In: *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heildeberg [2018-07-01]. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/3-540-31060-6_238

IRPI (2018): *Rainfall Tresholds for the Initation Landslides*. IRPI [online]. Perugia: Vinicio Balducci, 2018 [2018-07-02]. Dostuné z: <http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/>

KOŇAŘÍKOVÁ, Z. (2004): *Katalog vyjadřovacích metod pro znázorňování sesuvů*. [online]. [2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/konarikova04/index.html>

MARSHALCO (2017): *Klasifikace a charakteristika svahových pohybů*. Institut geologického inženýrství [online]. Ostrava: VŠB, 2017 [2017-12-18]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/svafef/Text/2_klasifikace.htm

WILSON, L. (1968): Slopes. In: Geomorphology. Encyklopedia of Earth Science. Springer, Berlin Heidelberg [2018-07-01]. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/3-540-31060-6_336#springerlink-search