

doc. Ing. Pavel Šenovský, Ph.D.

# Modelování následků mimořádných událostí

skripta



---

**Modelování následků mimořádných událostí**

tento text neprošel jazykovou úpravou

©Pavel Šenovský, Ostrava, 2020

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>4</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>7</b>
<b>Seznam výpisů kódu</b>	<b>10</b>
<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Modelování</b>	<b>17</b>
1.1 Co je model?	17
1.2 Scénáře - nebezpečné látky	18
1.3 Scénáře - přírodní pohromy	20
<b>2 ALOHA</b>	<b>23</b>
2.1 Situace	23
2.2 Zdroj úniku	27
2.2.1 Přímý únik	28
2.2.2 Kaluž	28
2.2.3 Zásobník	29
2.2.4 Potrubí	30
2.3 Hodnocení toxických vlastností oblaku par	32
2.4 Scénáře se zahořením látky	35
2.4.1 Flash fire - hořlavá oblast oblaku par	35
2.4.2 VCE - exploze	36
2.4.3 BLEVE efekt	38
2.4.4 Jet Fire (tryskový požár)	41
2.4.5 Pool fire	42
<b>3 Povodně</b>	<b>47</b>
3.1 Metodika hodnocení škod - ČR	48
3.2 Ztráty na životech	53
3.3 Alternativní ocenění škod metodika DEFRA	56
3.4 Model škod EDAC	57
<b>4 Křivky poškození</b>	<b>61</b>
4.1 Rozdělení pravděpodobnosti	62
4.1.1 Gaussovo rozdělení	63
4.1.2 Lognormální rozdělení	63
4.1.3 Uniformní rozložení	64
4.1.4 Gumbelovo rozdělení	64
4.2 Funkce fragility	65
4.3 Funkce zranitelnosti	67
<b>5 Větrná smršť</b>	<b>69</b>
<b>6 Seismická činnost</b>	<b>77</b>

<b>7</b>	<b>Varování obyvatelstva</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>Riziko - integrace různých scénářů MU</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Pohyb ostatních hmot</b>	<b>93</b>
9.1	Sesuvy půdy . . . . .	93
9.1.1	Model Kherkheulidze, Armanini a zjednodušený model závislosti škod na relativní intenzitě sesuvu . . . . .	94
9.1.2	Zjednodušený model nebezpečí sesuvu . . . . .	95
9.1.3	Model zranitelnosti sesuvy . . . . .	97
9.1.4	Model závislosti zranitelnosti na intenzitě sesuvu . . . . .	100
9.1.5	Model zranitelnosti na základě rychlosti pohybu a odolnosti . . . . .	104
9.1.6	Vliv sesuvů půdy na silnice . . . . .	107
9.2	Sněhové laviny . . . . .	107
9.3	Bahnotoky . . . . .	111
9.4	Pád kamení . . . . .	112
	<b>Přílohy</b>	<b>119</b>
	Příloha 1 - probit přepočet na procenta . . . . .	119
	Příloha 2 - Průměrná roční míra inflace v ČR . . . . .	119
	Příloha 3 - Funkce hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce vybraných rozdělání pravděpodobnosti . . . . .	119
	<b>Literatura</b>	<b>128</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>130</b>
	<b>Rejstřík</b>	<b>131</b>

# Seznam obrázků

<b>Modelování</b>	<b>17</b>
1.1 Scénář MU s účastí nebezpečných látek	18
1.2 Typy modelů a následků při nehodách s účastí nebezpečných látek	19
1.3 Schéma podkladů pro identifikaci nebezpečí v území	20
<b>ALOHA</b>	<b>23</b>
2.1 Dialogové okno lokací v ALOHA	24
2.2 Definice nové lokace v ALOHA	24
2.3 Přiřazení lokace do státu v ALOHA	25
2.4 Výběr zájmové nebezpečné látky v programu ALOHA	25
2.5 Nastavení povětrnostní situace v místě úniku látky v ALOHA	26
2.6 Profil rychlosti a směru proudění větru pro lokalitu Ostrava - Zábřeh, 2018 (adaptováno z [115])	27
2.7 Přímý únik látky do ovzduší v ALOHA	28
2.8 Zadání množství látky v kaluži v programu ALOHA	28
2.9 Vlastnosti povrchu, na který se rozlila kaluž modelované nebezpečné látky v programu ALOHA	29
2.10 Nastavení vlastností zásobníku v programu ALOHA	30
2.11 Nastavení vlastností potrubí v programu ALOHA	31
2.12 Nastavení vlastností látky v potrubí v programu ALOHA	31
2.13 Nastavení zájmových koncentrací par v oblaku nebezpečné látky v systému ALOHA	32
2.14 Vypočítané polygony k zájmovým koncentracím látky	35
2.15 Model zóny ohrožení prošlehnutím pro únik metanu v systému ALOHA	35
2.16 Volba scénáře pro výpočet zóny ohrožení v systému ALOHA	36
2.17 Parametry modelu VCE v systému ALOHA	36
2.18 Polygony zájmových přetlaků (scénář metan, 10 t/hod)	37
2.19 Závislost pravděpodobnosti poškození vybavení přetlakem způsobeným explozí	39
2.20 Závislost pravděpodobnosti úmrtí přetlakem způsobeným explozí	40
2.21 Teplotní limit přehřátí v závislosti na tlaku (adaptováno z [78])	41
2.22 Definování velikosti zásobníku pro modelování BLEVE efektu	41
2.23 Množství látky v zásobníku - látka v tekutém stavu	42
2.24 BLEVE efekt polygony mezních hodnot hustoty tepelného toku	43
2.25 Probitová funkce popálenin 1. - 3. stupně (adaptováno z [81])	44
2.26 Jet fire	44
2.27 ALOHA - definice otvoru v zásobníku, kterým uniká látka	45
2.28 Jet fire - model následků	45
2.29 Pool fire - ilustrační foto (převzato z [80])	45
<b>Povodně</b>	<b>47</b>
3.1 Záplavové území Ostrava - Zábřeh (převzato z [67])	48
3.2 Procentuální vyjádření minimálního a maximálního poškození ( $L$ ) na budovách v závislosti na hloubce zaplavení (převzato z [23, 24])	50

3.3	Vizualizace závislostí škod a délky přerušení činností organizace na hloubce zatopení dle (3.7) . . . . .	53
3.4	Závislost mortality na výšce zatopení a rychlosti stoupání hladiny dle vzorce (3.11) (převzato z [49]) . . . . .	54
3.5	Stabilita člověka jako funkce závislosti výšky a váhy dle vzorce (3.13) . . . . .	55
3.6	Klasifikace typů budov podle předpokládané zranitelnosti povodněmi (převzato z [60]) . . . . .	58
3.7	Křivky závislosti stupně poškození na výšce zatopení (vlevo), specifické energie (výška zatopení a rychlost proudění) (převzato z [85]) . . . . .	58
3.8	Závislost úrovně škod na výšce zatopení budovy, podle použitého stavebního materiálu a počtu podlaží (převzato z [58]) . . . . .	59
<b>Křivky poškození</b>		<b>61</b>
4.1	Křivky závislosti hloubky zatopení a faktoru poškození pro rezidenční bydlení a jeho vybavení (převzato z [36]) . . . . .	62
4.2	Hustota a distribuční funkce Gaussova rozdělení pro různé hodnoty střední hodnoty ( $\mu$ ) a rozptylu ( $\sigma^2$ ) . . . . .	63
4.3	Hustota a distribuční funkce logaritmicke-normálního rozdělení pro různé hodnoty střední hodnoty ( $\mu$ ) a rozptylu ( $\sigma^2$ ) . . . . .	64
4.4	Hustota a distribuční funkce uniformního rozdělení pro hraniční hodnoty $a = -1$ a $b = 1$ . . . . .	64
4.5	Hustota a distribuční funkce Gumbelova rozdělení . . . . .	65
4.6	Příklad funkce fragility pro různé stavy poškození (převzato z Porter [79]) . . . . .	67
4.7	Příklad funkce zranitelnosti (převzato z [43]) . . . . .	67
<b>Větrná smršť</b>		<b>69</b>
5.1	Míra škod v závislosti na rychlost větru pro komerční budovy (převzato z [53]) . . . . .	75
5.2	Mapa extrémních nárazů větru ve výšce 10 m nad povrchem (převzato z [111]) . . . . .	76
<b>Seismická činnost</b>		<b>77</b>
6.1	Epicentra historicky nejsilnějších zaznamenaných zemětřesení na území ČR (převzato z [68]) . . . . .	78
6.2	Pravděpodobnost následku (vlevo) a funkce zranitelnosti pro třídy A – D na základě datasetu EMS-98 (převzato z [91]) . . . . .	79
6.3	Rozložení typu zranitelnosti různých typů rezidenčního bydlení (převzato z [91]) . . . . .	80
6.4	Funkce poškození pro reprezentativní třídy komunit (převzato z [91]) . . . . .	81
6.5	Závislost míry přežití osob uvězněných ve zhroutených budovách na čase (převzato z [14]) . . . . .	82
6.6	Vývoj poptávky po zdravotnických službách po zemětřesení (převzato z [14]) . . . . .	83
<b>Varování obyvatelstva</b>		<b>85</b>
7.1	Odhad závislosti výše škod, kterým se je možno vyhnout a doby varování (převzato z [77]) . . . . .	87
<b>Riziko - integrace různých scénářů MU</b>		<b>89</b>
8.1	Křivka překročení škod $D(p)$ . . . . .	90
8.2	Aproximace křivky překročení škod - lichoběžníková metoda vs prostý součet scénářů . . . . .	90
<b>Pohyb ostatních hmot</b>		<b>93</b>
9.1	Sesuv svalu na dálnici D8 u Litochovic v roce 2013 (převzato z [8]) . . . . .	94
9.2	Závislost poškození budov na výšce toku materiálu na budovu působící (převzato z Totschnig et al. [90]) . . . . .	95
9.3	Závislost výše ztrát na hloubce toku trosek (převzato z [32]) . . . . .	95
9.4	Faktor citlivosti na hustotu populace (převzato z [98]) . . . . .	99
9.5	Faktor citlivosti výše příjmu (převzato z [98]) . . . . .	99
9.6	Model citlivosti obyvatelstva uvnitř budov (převzato z [98]) . . . . .	100

---

9.7	Model parametru kinetické intenzity $I_K$ (převzato z [98]) . . . . .	101
9.8	Model parametru kinematické intenzity $I_M$ (převzato z [98]) . . . . .	102
9.9	Funkce závislosti zranitelnosti na intenzitě sesuvu (převzato z [97]) . . . . .	102
9.10	Dynamický model intenzity pro budovy a osoby ve volném prostoru (převzato z [57]) . . . . .	104
9.11	Fyzický faktor odolnosti osob v závislosti na věku $\xi_{phy}$ (převzato z [57]) . . . . .	106
9.12	Závislost run-out vzdálenosti na objemu sesuvu (převzato z [46]) . . . . .	109
9.13	Závislost šance na přežití na rychlosti laviny (převzato z [51]) . . . . .	112
9.14	Runout index vs rychlostní profily (převzato z [51]) . . . . .	113
9.15	Zranitelnost budov v závislosti na tlaku vyvolaného dopadem laviny (převzato z [75]) . . . . .	114
9.16	Zranitelnost budov (konstr. beton) účinky „hustých“ lavin navržených Wilhem 1998 (převzato z [11]) . . . . .	114
9.17	Zranitelnost osob v budovách (konstr. beton) účinky „hustých“ lavin (převzato z [11]) . . . . .	114
9.18	Zranitelnost budov tlakem dopadu laviny (powder avalanche) – empirické hodnoty a odvozená funkce (převzato z [7]) . . . . .	115
9.19	Zranitelnost osob uvnitř budov účinky dopadu lavin (laviny prašanu - powder avalanche) – empirické hodnoty a odvozená funkce (převzato z [7]) . . . . .	115
9.20	Křivky fragility pro kameny padající různou rychlostí (převzato z [6]) . . . . .	116





# Seznam tabulek

<b>ALOHA</b>	<b>23</b>
2.1 Pravidla pro přidělení třídy stability počasí v ALOHA (adaptováno z [28]) . . . . .	26
2.2 Větrná růžice Ostrava-Zábřeh, rok 2018 (převzato z [115]) . . . . .	27
2.3 AEGL koncentrace Chlor (převzato z [29]) . . . . .	33
2.4 ERPG koncentrace Benzenu (převzato z [3]) . . . . .	33
2.5 Hranice zájmových koncentrací AEGL pro únik 50 kg chloru při stabilitě počasí D a B	34
2.6 Vybrané zájmové přetlaky z hlediska předpokládaných účinků na objekty (převzato z FEMA [31]) . . . . .	37
2.7 Účinky tlaku na člověka (adaptováno z [12]) . . . . .	38
<b>Povodně</b>	<b>47</b>
3.1 Procentuální vyjádření minimálního a maximálního poškození ( $L$ ) na budovách v závislosti na hloubce zaplavení (převzato z [23, 24]) . . . . .	49
3.2 Procentuální odhad poškození rostlinné produkce v jednotlivých měsících roku (převzato z [24]) . . . . .	51
3.3 Faktor trosek $DF$ pro různé hloubky, rychlosti a dominantní způsob užití území (převzato z [102]) . . . . .	56
3.4 Zranitelnost území povodněmi (převzato z [102]) . . . . .	56
3.5 Zranitelnost území povodněmi (převzato z [102]) . . . . .	57
3.6 Stupně poškození budov v důsledku seismické činnosti a povodní (adaptováno z [85]) .	57
<b>Větrná smršť</b>	<b>69</b>
5.1 Beaufortova škála síly větru (adaptováno z [103]) . . . . .	70
5.2 Saffir-Simpsonova stupnice (adaptováno z [84]) . . . . .	70
5.3 Fujitova stupnice (adaptováno z [73, 74]) . . . . .	71
5.4 TORRO stupnice (adaptováno z [89]) . . . . .	72
5.5 Vybrané faktory porvy větru podle typu užití území (převzato z [39]) . . . . .	73
5.6 Rychlost větru a míra poškození pro vzorové portfolio pojištěných vlastníků domácností (VGV) v Německu (převzato z [69]) . . . . .	74
5.7 Kategorie terénu, délka drsnosti a minimální výška (převzato z [120]) . . . . .	74
<b>Seismická činnost</b>	<b>77</b>
6.1 Richterova stupnice a její mapování na Mercalioho stupnici intenzity . . . . .	79
6.2 Klasifikace stupňů škod a poměr škod (převzato z [91]) . . . . .	80
6.3 Parametr $p'$ binomického rozložení DPM pro strukturální typologii škod (převzato z [18])	80
6.4 Model složení budov rezidenčního bydlení (převzato z [91]) . . . . .	81
6.5 Typy zranění po zemětřesení, která vyžadují lékařské ošetření (převzato z [14]) . . . . .	82
6.6 Typické rozložení následků v populaci postižené silným zemětřesením (převzato z [14])	82
<b>Varování obyvatelstva</b>	<b>85</b>
7.1 Vážené roční průměrné škody (tis. [£], převzato z [76]) . . . . .	86

<b>Pohyb ostatních hmot</b>	<b>93</b>
9.1 Kategorizace dat o sklonu - faktor sklonu $S_r$ (převzato z [70])	96
9.2 Koeficient $S_l$ – geologické podmínky (převzato z [70])	96
9.3 Koeficient $Sh$ – půdní vlhkost (převzato z [70])	96
9.4 Koef. $T_p$ – srážkový faktor [70])	97
9.5 Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) Peak Ground Acceleration (PGA) <sub>475</sub> kategorizované do desíti tříd (převzato z [70])	97
9.6 Klasifikace potenciálního nebezpečí sesuvu $H$ (převzato z [70])	97
9.7 Faktor $\xi_{STY}$ pro různé stavebních struktur (převzato z [98])	98
9.8 Faktor $\xi_{SMN}$ pro stav údržby budovy (převzato z [98])	98
9.9 Faktor citlivosti pro průměrný věk populace $\xi_{AGE}$ (převzato z [98])	100
9.10 Možné hodnoty faktorů kinetické a kinematické relevance (převzato z [98])	101
9.11 Faktory relevance pro strukturální poškození budov v Anconě (převzato z [97])	103
9.12 Typy struktur - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])	103
9.13 Stáří budovy - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])	103
9.14 Typ základů - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])	104
9.15 Příklady hraničních hodnot (převzato z [57])	105
9.16 Faktor odolnosti podle stavu údržby $\xi_{smn}$ (převzato z [57])	106
9.17 Faktor odolnosti podle typologie použité konstrukce $\xi_{sty}$ (převzato z [57])	106
9.18 Faktor odolnosti pro výšku $\xi_{sh}$ (převzato z [57])	107
9.19 Faktor odolnosti podle povědomí o riziku sesuvu $\xi_{kng}$ (převzato z [57])	107
9.20 Třída magnitudy sesuvu (adaptováno z [45])	108
9.21 Zranitelnost sesuvy jednotlivých zájmových objektů dopravní infrastruktury (převzato z [45])	108
9.22 Zranitelnost budov a osob v nich (adaptováno z [46])	110
9.23 Klasifikace hodnot srážkového faktoru $T_{pw}$ (převzato z [70])	110
9.24 Klasifikace hodnot teplotního faktoru $T_t$ (převzato z [70])	111
9.25 Klasifikace potenciálu nebezpečí lavin $H$ (převzato z [70])	111
9.26 Pravděpodobnosti přesáhnutí různých stavů poškození a podmíněné pravděpodobnosti pro vysokorychlostní silnice pro stanovené objemy sesuvů (převzato z [105])	112
9.27 Runout index vs runout vzdálenost (převzato z [51])	113
9.28 Shrnutí rozsahu zranitelnosti a doporučených hodnot pro smrt v důsledku toku trosek na základě dat z Hong Kongu (převzato z [16])	115
9.29 Zranitelnost prvků (převzato z ??)	116
<b>Přílohy</b>	<b>119</b>
Tabulka P1 Probitová transformace (převzato z [41])	119
Tabulka P2 Průměrná roční míra inflace v ČR (převzato z Český statistický úřad (ČSÚ) [125])	119

# Listings

Listing 1	Funkce vyžadované pro vykreslování . . . . .	119
Listing 2	Vykreslení funkce hustoty normálního rozdělení . . . . .	119
Listing 3	Vykreslení distribuční funkce normálního rozdělení . . . . .	120
Listing 4	Funkce hustoty lognormálního rozdělení . . . . .	120
Listing 5	Distribuční funkce lognormálního rozdělení . . . . .	121
Listing 6	Hustota uniformního rozdělení . . . . .	121
Listing 7	Distribuční funkce uniformního rozdělení . . . . .	121
Listing 8	Hustota Gumbelova rozdělení . . . . .	122
Listing 9	Distribuční funkce Gumbelova rozdělení . . . . .	122



# Úvod

Vážený studente, dostává se Vám do rukou učební text předmětu *Modelování následků mimořádných událostí*. Tento předmět vznikl jako reakce na potřeby absolventů být schopni lépe chápat dopady mimořádných událostí a to ať už antropogenního nebo naturogenního charakteru.

Proto v předmětu budeme zkoumat vliv jaký takové události mohou mít především na:

- člověka,
- majetek - primárně budovy,
- ale také jejich vybavení.

Tato skripta pokrývají jak teoretickou část modelování, tak praktické modelování vybraných reprezentativních scénářů mimořádných událostí.

Předmět je integrován velmi úzce do studia studijního programu *Ochrana obyvatelstva a krizové řízení*, kde vhodně doplňuje problematiku rizika, jelikož dopad modelovaného scénáře společně s pravděpodobností jeho výskytu nám umožňuje odhadnout riziko.

Znalosti nabyté v předmětu pak využijete při dalším studiu např. problematiky tzv. *závažných havárií*, ale také v předmětech likvidace havárií a katastrof a předmětů zaměřených na havarijní popř. krizové plánování (a také řada dalších :-).

## Organizace textu

Předtím, než přejdeme k vlastnímu výkladu si dovoluji přidat několik poznámek k organizaci skript. Text je organizován do kapitol, přičemž každá z nich má stanoveny určité didaktické cíle, které by prostudováním kapitoly měly být dosaženy.

Tyto cíle naleznete v náhledu kapitoly společně s krátkým zasazením problému do širšího kontextu. Náhled je doplněn odhadem času nutného pro prostudování problémové oblasti. Mějte prosím na paměti, že tento časový údaj je pouze orientační, nebuďte proto prosím smutní nebo naštvaní, když ve skutečnosti budete kapitole věnovat o něco méně nebo více času.

Zároveň pokud Vás problém zaujme neváhejte a ponořte se hlouběji. Nástroje a postupy, se kterými se v průběhu studia seznámíte, jsou dostatečně robustní, aby Vám umožnily růst až na úroveň řešení problémů tak rozsáhlých, že vyžadují práci celých týmů a použití výkonu superpočítače. (Než se ale dostanete na takovou úroveň vystačíte si sami a s běžně dostupnými počítači a to i pro řešení problémů podstatně složitějších než ty představované v těchto skriptech.)

Za kapitolou pak následuje shrnutí, ve kterém budou zdůrazněny informace, které byste si rozhodně měli zapamatovat (určitě Vám ale neuškodí, pokud si jich zapamatujete více).

To, že jste správně pochopili probíranou látku, si budete moci ověřit pomocí kontrolních otázek a testů, které by Vám měly poskytnout dostatečnou zpětnou vazbu k rozhodnutí, zdali jít dále nebo si vyhradit delší čas na opakování.

Kontrolní otázky tak nepředstavují seznam otázek, které budou použity u zkoušky, ale jsou čistě Vaším zpětnovazebním prvkem.

Pro zjednodušení orientace je také v textu zaveden systém ikon:



### Průvodce studiem

Slouží pro seznámení studentů s látkou, která bude v kapitole probírána.

**Čas nutný ke studiu**

Představuje odhad doby, který budete potřebovat k prostudování celé kapitoly. Jedná se pouze o orientační odhad, neznepokojte se proto, pokud Vám studium bude trvat o něco déle nebo budete hotovi rychleji.

**Vysvětlení, definice, poznámka**

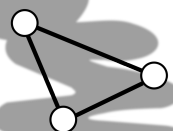
U této ikony najdete vysvětlující text, poznámku k probíranému tématu, která problém uvede do širších souvislostí, popřípadě důležitou definice.

**Kontrolní otázky**

Na závěr každé kapitoly je zařazeno několik otázek, které prověří, zda jste problematice kapitoly dostatečně porozuměli. Pokud nebudete vědět odpověď na některou otázku, je to signál pro Vás, abyste se ke kapitole vrátili.

**Příklad**

Příklady obsahují praktické demonstrace diskutovaného problému.

**Návaznosti**

V tomto segmentu budou zmíněny další návaznosti probíraného tématu na další témata tohoto předmětu, ale také dalších předmětů.

**Shrnutí**

Obsahuje základní myšlenky kapitoly, kterým by měl být věnována zvláštní pozornost během studia.

**Přestávka**

Po obtížné části textu, nebo prostě občas jenom tak je nutné si udělat krátkou přestávku, načerpat síly k novému studiu.

Skriptu jsou zamýšlena jako pracovní nástroj pro Vás. Pokud tedy narazíte na nejasnosti, nebo dokonce na chybu, byl bych rád, abyste si takové poznatky nenechali pro sebe, ale zaslaly je na můj e-mail: pavel.senovsky@vsb.cz, tak ať je příští verze skriptu ještě lepší než ta současná.

Závěrem mi dovoluje popřát Vám příjemné čtení a pokud skripta studujete v rámci přípravy na zkoušku nebo klasifikovaný zápočet úspěch při jejím složení.

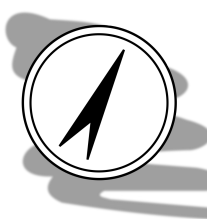
doc. Ing. Pavel Šenovský, Ph.D.





# Kapitola 1

## Modelování



### Průvodce studiem

V této kapitole se zaměříme na problematiku modelování - z obecného pohledu. Konkrétně pak probereme typologii scénářů mimořádných událostí s účastí nebezpečných látek.

### Po prostudování této kapitoly budete vědět

- co je to model a jaká jsou jeho omezení
- co je to reprezentativní scénář
- jaké jsou možné scénáře mimořádných událostí s účastí nebezpečných látek.



### Čas pro studium

Pro prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně hodinu až dvě.

## 1.1 Co je model?

**Model**, jako slovo je využíváno v naší mluvě poměrně často, obvykle ve smyslu *model chování nebo průběhu zájmové události (scénáře)*. Model využíváme jako náhradu reálného světa, který je pro účely analýz obvykle příliš složitý na to, abychom jej poznali úplně a beze zbytku.

Pro zkoumání (analýzy) tak potřebujeme zjednodušený obraz reality, který pokrývá všechny z hlediska analýzy potřebné vlastnosti a zároveň zanedbává vlastnosti z hlediska řešeného problému nepodstatné. Model proto lze považovat za *účelové zjednodušení reality plnící určený účel*.

V souvislosti s modelem pak řešíme:

- adekvátnost modelu (k čemu lze model použít),
- omezující (popř. okrajové) podmínky modelu (k čemu naopak nelze model použít).

Výše uvedené nám tedy omezuje způsob nasazení modelu a interpretaci jeho výsledků.

Čistě z pohledu způsobu výpočtu lze modely dále členit řadou různých způsobů - pro naše účely můžeme provést základní rozdělení modelů na ty, které se snaží modelovat fyzikální podstatu jevu - ty můžeme označovat jako *fyzikální* a ty které specifikují model na základě pozorování (měření) projevů těchto jevů a zobecnění těchto měření do podoby univerzálně použitelného modelu. Takové modely můžeme označovat např. jako *empyrické*.

V bezpečnostní praxi se extenzivně využívají oba typy modelů. Typickým představitelem fyzikálních modelů jsou modely **Computational Fluid Dynamics (CFD)** pracující na bázi metody konečných

prvků, popř. konečných objemů - podle toho, co je přesně modelováno. Úlohy řešitelné pomocí nástrojů CFD jsou především: rozptyl plynné látky v ovzduší, pružnost/pevnost (Ansys Fluent [4]), do určité míry také modely explozí (FLACS [34]).

Dobrým představitelem empirických modelů je model ekvivalentního výbuchu TNT, kterým se budeme zabývat také v těchto skriptech. Ze softwarových produktů lze zmínit např. Aloha [28] nebo TNO Effects [88]. Pro tyto softwarové produkty však je potřeba doplnit, že využívají celou řadu dílčích modelů pokrývajících jednotlivé části chování modelovaných scénářů. Některé z těchto modelů jsou přitom fyzikální a jiné empirické.

Se software Aloha se v krátkosti seznámíme v těchto skriptech a také na cvičeních z předmětu. Předtím, než se do toho ale pustíme je potřeba si ujasnit, jaké typy událostí vlastně mohou nastat a také jaké následky lze v současnosti brát v úvahu.

K tomuto účelu budeme samostatně zpracovávat modely:

- pracující s různými scénáři ztráty kontroly nad nebezpečnou látkou
- přírodní pohromy
  - povodně
  - větrné smršti
  - sesuvy kamení
  - zemětřesení

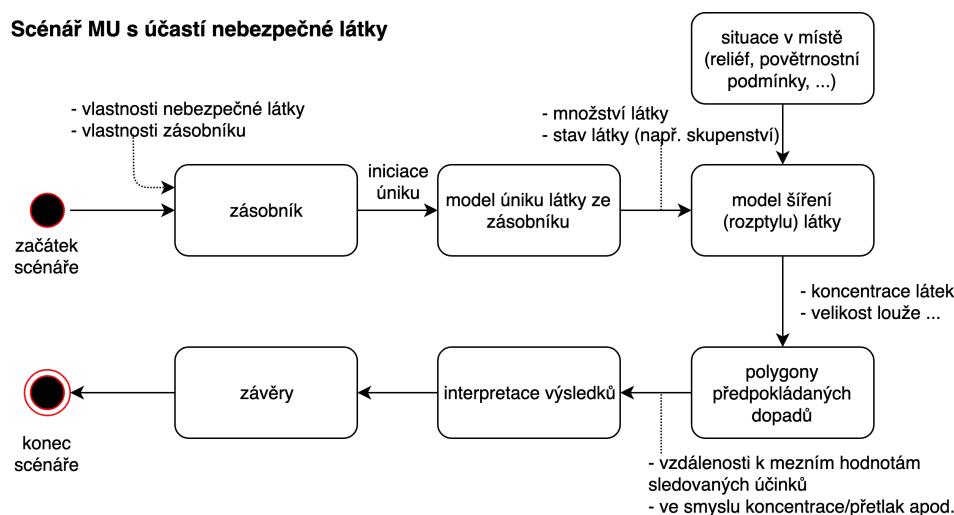
Scénáři s účastí nebezpečných látek se budeme zabývat podrobněji. V této oblasti pokryjeme jak modely scénářů průběhu, tak možnosti odhadu následků.

Scénáře přírodních pohrom jako jsou třeba povodně jsou komplikovanější - z tohoto důvodu se zaměříme pouze na možnosti modelování dopadů, nikoliv však samotného průběhu jevu.

## 1.2 Scénáře - nebezpečné látky

Scénářem v obecné rovině rozumíme myšlenkový model vzniku a průběhu mimořádné události od jejího vzniku, až do předpokládaného konce průběhu scénáře. Konec scénáře se obvykle volí podle jeho účelu.

Scénáře pracující s nebezpečnými látkami pracují obvykle se *zdrojem úniku* následný scénář si lze vizuálně představit jako na obr. 1.1.



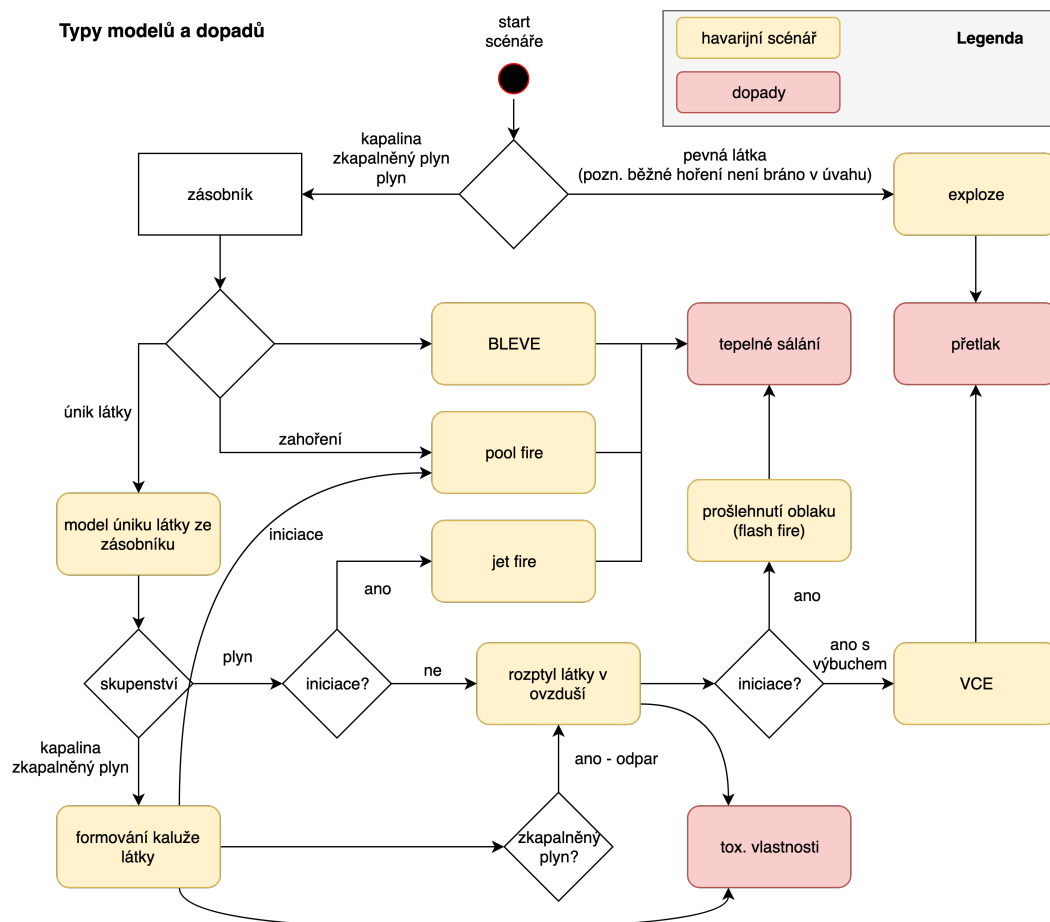
Obrázek 1.1: Scénář MU s účastí nebezpečných látek

Obrázek průběhu scénáře vypadá relativně jednoduše - ale v praxi se může jednat o sadu na sebe navazujících modelů popisujících jednotlivé aspekty scénáře. Podle typu havarijního modelu lze obr. 1.1 rozpracovat do podoby obr. 1.2.

Na obr. 1.2 jsou rozlišeny jednotlivé modely jevů samotných (žlutě) a dopady (červeně).

Modely jevu budeme alespoň zčásti používat následující:

- exploze (fyzikální)



Obrázek 1.2: Typy modelů a následků při nehodách s účastí nebezpečných látek

- výbuch oblaku par (**Vapour Cloud Explosion (VCE)**)
- **Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE)**
- pool fire
- jet fire
- model úniku látky ze zásobníku
- model odparu látky z kaluže
- rozptýl látky v ovzduší

Scénář, resp. způsob jeho zachycení v jednom nebo více modelů volíme podle modelovacího nástroje, který máme k dispozici. Nástroje jako je třeba TNO Effects umožňují jednotlivé kroky scénáře klást za sebou do určité míry podobným způsobem, jako je znázorněno na obr. 1.2. Začíná se obvykle modelem úniku látky ze zásobníku, na který navazují případně další modely.

Výhodou tohoto přístupu je možnost využití výstupů jednoho modelu jako vstupu pro model další - navazující.

Oproti tomu program ALOHA takové návaznosti neumožňuje zachytit. Analytik tak obvykle vybírá model, který v daném okamžiku potřebuje (např. jet fire) a specifikuje všechny jeho potřebné vstupy. V programu ALOHA tak není možné vytvářet sofistikovanější hierarchie modelů, což zpomaluje proces analýzy.

Výstupem takových modelů jsou obvykle polygony zobrazující vzdálenosti k dosažení určité mezní zájmové hodnoty modelované veličiny, např. výše přetlaku pro modely explozí apod.

Ale pozor modely tohoto typu nejsou schopny kvantifikovat reálné dopady na majetek, životy a zdraví! Tento typ dopadů je nutno odvodit pomocí dalších modelů, statistických analýz apod. jednotlivě pro místo předpokládaného dopadu. Způsob výpočtu tak budeme muset probrat samostatně.

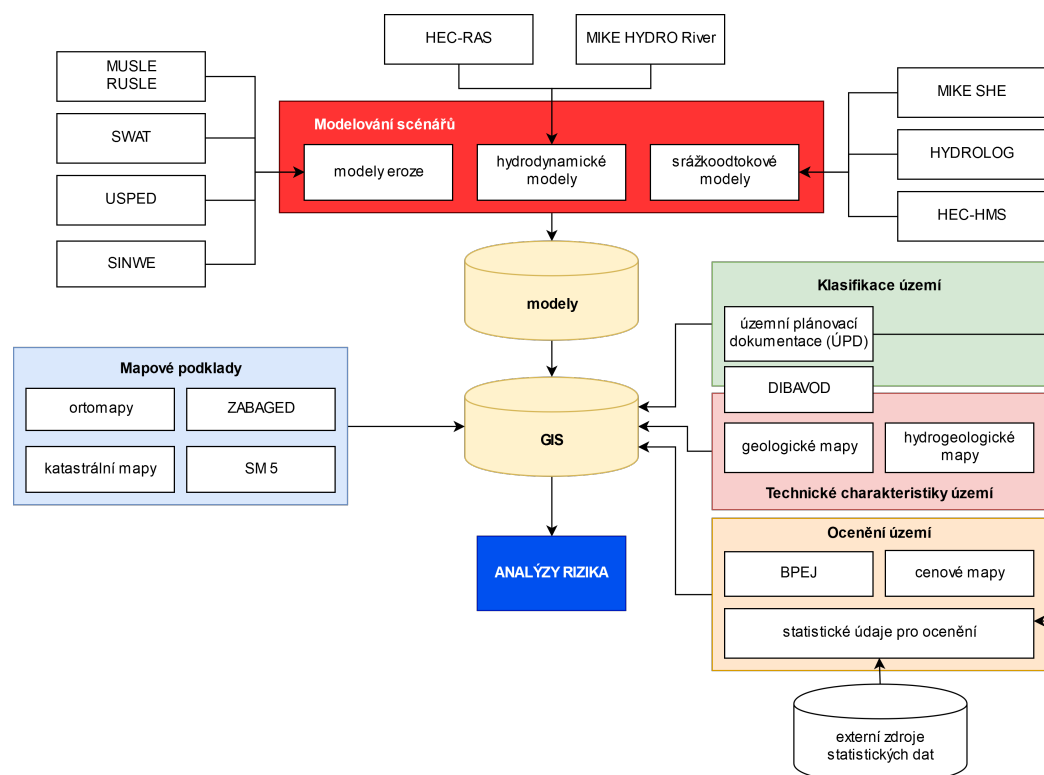
### 1.3 Scénáře - přírodní pohromy

Do této skupiny zařazujeme události typu:

- povodně
- větrné smršti
- zemětřesení
- pád kamení
- sesuvy půdy
- apod.

Řadu z výše uvedených jevů je možno modelovat. Poměrně dobré nástroje jsou např. dostupné pro modelování povodní, které berou v úvahu jednak informaci o reliéfu, jednak předpokládané objemy vod, které je nutno odvést z krajiny. Tento typ modelů však vyžaduje specifické znalosti v oblasti modelování a také GIS (**Geografický informační systém (GIS)**).

Jistou představu o procesu identifikace nebezpečí si je možno udělat z obr. 1.3, alespoň pro problematiku svahových pohybů a povodní.



Obrázek 1.3: Schéma podkladů pro identifikaci nebezpečí v území

Už pro samotnou identifikaci ohrožených míst je nutno zpracovat velké množství různorodých informací o posuzovaném území. K tomuto účelu je nutné využít systémů GIS, které umožňují pohodlnou práci s jednotlivými mapovými vrstvami z různých zdrojů.

Jako základ pro hodnocení může posloužit Státní mapa ČR v měřítku 1:5 000 (SM 5), kterou zpracovává ČÚZK (**Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK)**) [126]. **Státní mapa v měřítku 1:5 000 (SM 5)** mapa obsahuje už polohopis odvozený z katastrálních map a výškopisnou část dle ZABAGED. Data jsou dostupná v rastrové i vektorové podobě.

ČÚZK poskytuje také ortomapy nebo vektorové katastrální mapy.

**Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED)** je digitální model území vytvářený a spravovaný ČÚZK dle zákona č. 200/1994 Sb., o zeměměřičství [117]. Obsah ZABAGED samotného pak stanovuje prováděcí vyhláška č. 31/1995 Sb. (Vyhláška Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřičství a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením) [118].

Podrobný popis objektů udržovaných v **ZABAGED** je dostupný v katalogu objektů [127]. Rozlišováno je 8 základních kategorií (tříd) evidovaných objektů [127]:

1. Sídla, hospodářské a kulturní objekty (42 podtypů)
2. Komunikace (34 podtypů)
3. Rozvodné sítě a produktovody (6 podtypů)
4. Vodstvo (13 podtypů)
5. Územní jednotky včetně chráněných území (18 podtypů)
6. Vegetace a povrch (16 podtypů)
7. Terénní reliéf (13 podtypů)
8. Geodetické body (3 podtypy)

Z pohledu oceňování představuje úroveň podtypů rozlišovací schopnost dat v **ZABAGED**. V případě, že pro ocenění území je potřeba podrobnější typové rozlišení je obvykle nutné realizovat místní šetření, což je časově i finančně náročné. Studie tohoto typu tak lze realizovat na relativně malém území. Naopak, pokud rozlišovací schopnost **ZABAGED** postačuje, otevírají se možnosti pro automatizované zpracování dat a v takovém případě při analýzách nejme omezení prostorově.

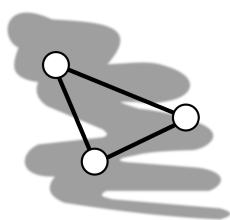
Kromě základních informací o terénu, je pro účely analýz nutno shromáždit další údaje technického charakteru, které popisují určité podstatné vlastnosti terénu popsané v geologických a hydrogeologických mapách území. Tvůrcem těchto map je Česká geologická služba [9]<sup>1</sup>.

Informaci o charakteru vodních toků a podzemních vod lze pak získat z **DIGitální BÁze VODOhospodářských Dat (DIBAVOD)** [99]. **DIBAVOD** je koncipován jako tematická nadstavba **ZABAGED** poskytující doplňující informace o vodohospodářských dat ve struktuře:

- základní jevy povrchových a podzemních vod,
- účelová klasifikace povrchových a podzemních vod,
- chráněná území,
- záplavová území,
- měřicí a kontrolní místa povrchových vod,
- měřicí a kontrolní místa podzemních vod,
- objekty subsystému užívání vody,
- místa odběrů a vypouštění,
- objekty na toku,
- objekty meteorologických pozorování.

Data **DIBAVOD** jsou dostupná v podobě ESRI shape souboru.

Jako podklad pro klasifikaci zastavěné plochy nebo plochy, u které se zastavěním do budoucna počítá, může posloužit územně plánovací dokumentace **územně plánovací dokumentace (ÚPD)**, zpracovávané podle stavebního zákona [119]. V řadě případů je tato dokumentace dostupná v elektronické podobě vhodné pro zpracování v systémech **GIS**.



### Zdroje dat

Výše uvedené zdroje dat byly podrobněji rozepsány z toho důvodu, že se jedná o údaje, které jsou nebo mohou být pro tento typ analýz dostupné a zároveň jsou natolik popisné, aby je bylo možné použít univerzálně, tedy nikoliv pouze pro účely modelování následků např. povodní.

Vraťme se ale k modelům umožňujících výpočet expozice modelovaných jevů, v našem případě povodní. Modely rozlišuje několikero druhu. Prvním z nich jsou *srážkoodtokové modely*, jejichž účelem je výpočet způsobu jakým dešťové srážky odtékají krajinou. Příkladem těchto modelů jsou **HEC-HMS** [94], **HYDROG** [44] nebo **MIKE SHE** [20].

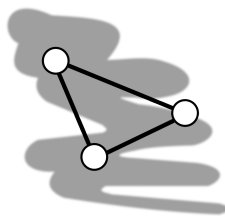
*Hydrodynamické modely* oproti tomu řeší numerické procesy popisující pohyb vody v korytech řek apod. Mezi tento typ modelů můžeme zařadit např. **HEC-RAS** [95], **MIKE HYDRO River** [19].

*Erozní modely* řeší splavování částic půdy do koryt řek a jejich další transport a usazování (odplavování) sedimentů. Základní erozní modely jsou **MUSLE** [109] (**Modified Universal Soil Loss Equation**

<sup>1</sup> provozovatelem portálu je ale paradoxně soukromá osoba, informace získané z portálu je proto potřeba brát s určitou rezervou.

(MUSLE) a RUSLE [96] (Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)), nicméně lze pro ně konstatovat, že se jedná o relativně jednoduché modely s řadou zjednodušení. Složitější modely jako SWAT+ [87] (Soil & Water Assessment Tool (SWAT)), USPED [64–66] (Unit Stream Power - based Erosion Deposition (USPED)) nebo SIMWE [63] (SIMulated Water Erosion (SIMWE)) mají potenciál mnohem přesněji modelovat erozi půdy, ke své činnosti ale vyžadují větší množství přesných podkladů.

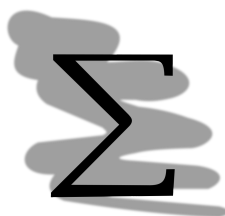
Podrobnější výklad modelů lze nalézt v uvedených odkazech nebo např. v přehledových textech Hořínková a kol. [40].



### Další scénáře - struktura zkoumání

Z výše uvedeného textu a obr. 1.3 by se mohlo zdát, že jsme pokryli pouze poměrně úzkou problematiku jednoho typu přírodních pohrom - povodně. Filozofie postupu zkoumání, je ale ve skutečnosti pro různé pohromy obdobná. Postup se liší pouze použitím odlišných modelů pro odhad zájmových polygonů a funkcí škod na majetku, které jsou pro každý typ události unikátní.

Právě na funkce škod se proto v kapitole zaměřené na tento typ scénářů zaměříme.



### Shrnutí

V této kapitole jsme se seznámili se základy problematiky modelování a typologií scénářů a do určité míry také zdrojů dat, které jsou potřebné pro realizaci modelů. Tyto znalosti využijeme při výkladu modelů samotných v následujících kapitolách.



### Kontrolní otázky

1. Jaké typy následků nejčastěji zachycujeme modely scénářů mimořádné události s účastí nebezpečné látky?
2. Vyjmenujte alespoň 4 typy modelů používaných pro zachycení různých aspektů scénářů událostí s unikem nebezpečné látky.
3. Jaké typy podkladů jsou potřeba pro odhad následků mimořádné události v území?
4. Co je ZABAGED a k čemu slouží?
5. Vyjmenujte alespoň 4 typy přírodních pohrom.

## Kapitola 2

# ALOHA



### Průvodce studiem

Kapitola je zaměřena na diskuzi postupu výpočtu jednotlivých modelů v intencích obr. 1.2 pomocí výpočetního programu ALOHA [28].

### Po prostudování této kapitoly budete vědět

- jaké typy scénářů je možno vypočítat pomocí ALOHA
- jaké jsou omezující podmínky výpočtů
- jak interpretovat zjištěné výsledky ve smyslu předpokládaných účinků na obyvatelstvo a majetek



### Čas pro studium

Pro prostudování kapitoly budete potřebovat tři až čtyři hodiny. Pro správné pochopení způsobu fungování doporučujeme nainstalovat software ALOHA a příklady ze skript v něm vypočítat. Experimentování s modely se sice může protáhnout, ale zároveň Vám přinese skutečné, hluboké pochopení postupů modelování a interpretace dosažených výsledků.



### Předtím než začneme

Nainstalujte program ALOHA pro Váš operační systém ze stránek <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. Následně jednotlivé kroky popisované v textu realizujte přímo v programu.



### Organizace textu

Jednotlivé typy modelů jsou zpracovány v samostatných podkapitolách. Zpracování vždy probíhá v pořadí situace → model → interpretace výsledku. Základní situace je pro všechny modely stejná a proto výklad zahájíme právě jí.

## 2.1 Situace

Základní situaci definujeme v několika krocích.

- umístění zásobníku látky (lokace)

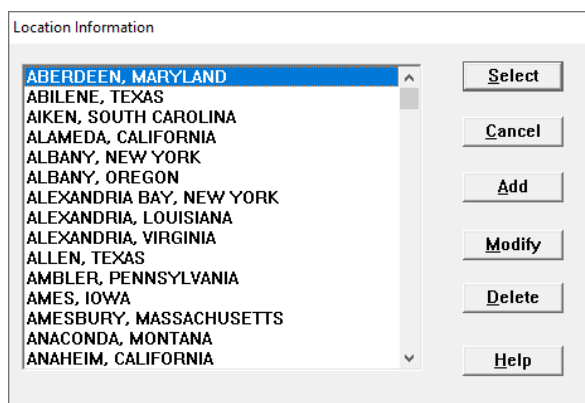
- definování vlastností chemických látek
- definování povětrnostní situace

Situaci obvykle definujeme na začátku modelování a pro různé typy modelů (např. rozptyl látky, exploze apod.) ji neměníme.

V prvním kroku je potřeba nastavit **lokaci** - tedy reálné místo, kde předpokládáme únik látky a kde budeme zkoumat možné následky takového úniku. Informace o lokaci se použije při exportu dopadových polygonů do formátu KML pro účely vizualizace na mapě.

V případě, že očekávaným výstupem je pouze polygon jako takový nebo vizualizace na mapě bude realizována ručně (např. pomocí běžného grafického editoru) není umístění úplně důležité. Přesto nejedná se o složitý krok a tak je doporučováno lokaci nastavit.

Dialogové okno pro lokace je dostupné z menu → Site Data → Location, popř. s použitím klávesové zkratky CTRL + L, viz obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Dialogové okno lokací v ALOHA

Lokace v seznamu jsou prakticky výhradně pro USA, kliknutím na tlačítko *Add*, ale můžeme doplnit lokaci novou, podle vlastních potřeb. Na obr. 2.2 je definována poloha Ostravy. Nadefinování nové lokace dokončíme kliknutím na tlačítko *OK*. Pro lokace mimo území USA je nutno ještě definovat stát, ve kterém se dané místo nachází, viz obr. 2.3.

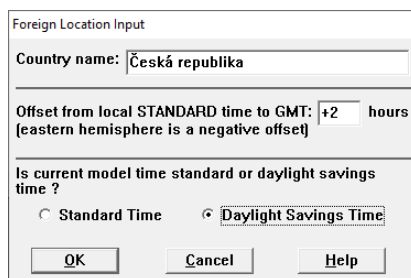
Lokace následně bude dostupná v seznamu.

Obrázek 2.2: Definice nové lokace v ALOHA

ALOHA byla vyvinuta v USA, kde se tradičně nepoužívají SI jednotky. ALOHA **metrický systém** podporuje, ale není předvolen, což znamená nutnost v dialogových oknech překlíkávat jednotky. 2.2 byla původně nadmořská výška specifikována ve stopách, takže pokud jste ji nezměnili na metry, nebude správně :-).

Měnit jednotky v každém dialogovém okně není pohodlné. Naštěstí ALOHA umožňuje provést tuto volbu globálně, najednou pro celý program v menu *Display* → *Display Options*, klávesová zkratka





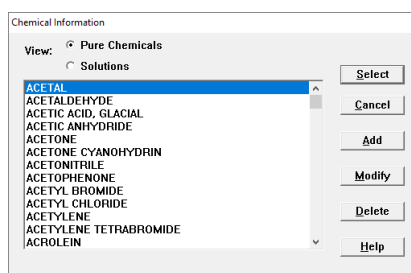
Obrázek 2.3: Přiřazení lokace do státu v ALOHA

CTRL+Y. Doporučujeme nastavit metrický systém, co možná nejdříve. Minimalizuje tak šanci, že někde ponecháte chybné jednotky.

Teto typ chyb se následně z výsledku modelování obtížně identifikuje.

V druhém kroku **definujeme nebezpečnou látku**, jejíž chování má být zkoumáno. Dialogové okno zobrazíte z menu *SetUp* → *Chemicals* (CTRL+H).

Látku vybíráme ze seznamu buďto čistých látek nebo roztoků, viz obr. 2.4.



Obrázek 2.4: Výběr zájmové nebezpečné látky v programu ALOHA

ALOHA nabízí poměrně rozsáhlou databázi nebezpečných látek CAMEO Chemicals. Tato databáze je dostupná také samostatně pomocí webového rozhraní [27]. Dostupné jsou také aplikace pro desktop a operační systémy iOS a Android.

Přestože databáze je poměrně obsáhlá, má některá omezení. Neobsahuje např. pevné nebezpečné látky. ALOHA tak neumožňuje pokrýt např. havarijní scénáře výroby hnojiv nebo obdobných látek. Provozy tohoto typu jsou z pohledu možnosti vzniku závažných havárií významné. Z poslední doby lze zmínit např. explozi v továrně na hnojiva ve Westu (Texas, USA) v roce 2013.

Nehoda si vyžádala 15 obětí, 160 zraněných a více než 150 budov bylo buďto zničeno nebo vážně poškozeno.

Tento typ scénářů nelze v systému ALOHA jednoduše modelovat.

I pokud zájmová látka spadá do skupin látek pokrytých, nemusí být v databázi přesto obsažena. V takovém případě máme v zásadě dvě možnosti, buďto látku doplníme - kliknutím na tlačítko *Add* a vyplněním potřebných údajů, nebo najdeme svými vlastnostmi podobnou látku a tu použijeme s modelem jako substitut zájmové látky.

Doplnění látky je po stránce metodické „čistější“ řešení. Toto řešení ale vyžaduje získání extenzivních fyzikálně-chemických informací, většinou nad rámec informací obsažených v bezpečnostním listu. Údaje je tak nutno sestavovat postupně z dílčích informací od výrobce látky, specializovaných informačních systémů, jako je např. ChemSpider [1], [European chemical Substances Information System \(ESIS\)](#) [25] a studií odborné literatury.

Volba vhodné substituce je také prakticky jedinou možností, jak namodelovat v ALOHA chování směsí plynů. Dobrým příkladem takové substituce by mohlo být nahrazení zemního plynu metanem. V tomto případě lze vyjít z toho, že metan je představuje hlavní složku této směsi (uvádí se 70 - 90 % podle ložiska).

V případě směsí, jejich jednotlivé složky jsou ve svém poměru více vyváženy nemusí být nalezení vhodného substitutu jednoduché. Z tohoto důvodu je nutné problém substituce řešit samostatně - případ od případu.

Atmospheric Options

Wind Speed is : 5  knots  mph  meters/sec

Wind is from : W Enter degrees true or text (e.g. ESE)

Measurement Height above ground is:

OR  enter value : 10  feet  meters

Ground Roughness is :

Open Country OR  Input Roughness (Zo) :  Urban or Forest  Open Water

Select Cloud Cover :

OR  enter value : 5  [0 - 10]

complete cover  partly cloudy  clear

(a) Vlastnosti počasí

Atmospheric Options 2

Air Temperature is : 10 Degrees  F  C

Stability Class is :  A B C D E F

Inversion Height Options are :

No Inversion  Inversion Present, Height is :   feet  meters

Select Humidity :

OR  enter value : 50 %  [0 - 100]

(b) Třídy stability počasí

Obrázek 2.5: Nastavení povětrnostní situace v místě úniku látky v ALOHA

Poslední částí informace o situaci tvoří **povětrnostní podmínky**. Povětrnostní situace představuje zásadní vstup pro modelování zejména z pohledu modelu šíření unikající nebezpečné látky v ovzduší.

Do dialogového okna nastavení se lze dostat z menu *SetUp* → *Atmospheric* → *User Input*, popř. klávesové zkratky CTRL+A, viz obr. 2.5. Alternativně, lze ALOHA připojit k meteostanici (stejně menu, polužka *SAM station*). ALOHA ale předpokládá přímé připojení pomocí COM portu k počítači, na které se provádí modelování. Z pohledu praktického nasazení je proto manuální zadání povětrnostních podmínek využíváno častěji.

Pro modelování přitom není určující pouze samotná síla a směr větru, ale také předpokládaná stabilita počasí. Třída stability počasí se vypočítá automaticky na základě stanovených rychlostí větru a oblačnosti. Výběr třídy stability probíhá podle pravidel zachycených v tab. 2.1.

Tabulka 2.1: Pravidla pro přidělení třídy stability počasí v ALOHA (adaptováno z [28])

rychlost větru [ $m \cdot s^{-1}$ ]	den: úroveň slunečního záření			noc: oblačnost	
	silná	střední	slabá	> 50 %	< 50 %
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Jednotlivé třídy počasí jsou pak následující:

- A velmi nestabilní
- B nestabilní
- C trochu nestabilní
- D neutrální
- E částečně stabilní
- F stabilní

Dopad na modelování je velký. Nestabilní třídy budou tvořit kratší vlečky škodlivin, avšak v širším rádiu od zdroje úniku látky ve srovnání se situací, kdy počasí je stabilní.

Za určitých okolností může být žádoucí automaticky odvozenou třídu stability změnit. To je možné provést kliknutím na tlačítko *Override*, viz obr. 2.5b. Takovou změnu lze zachytit buďto místní specifikou neodpovídající nastavení tříd stability (viz tab. 2.1) nebo třeba nastavení maximálně nepříznivého scénáře z hlediska šíření látky v ovzduší.

Odhad rychlosti a směru větru lze provést na základě údajů z větrných růžic na imisních stanicích ČHMÚ (Český Hydrometeorologický ústav (ČHMU)) [116]. Údaje jsou dostupné vždy s jednoletým

zpožděním, např. pro lokalitu Ostrava - Zábřeh jsou pro rok 2018 dostupná následující data, viz tab. 2.2.

Tabulka 2.2: Větrná růžice Ostrava-Zábřeh, rok 2018 (převzato z [115])

Tř.rychl.	Rychl.[m/s]	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	Bezvětří	$\Sigma$
1	(0,0 - 0,5)	0,48	0,46	0,79	1,06	1,58	2,73	1,72	0,91	0,15	<b>9,88</b>
2	<0,5 - 2,5)	11,70	7,63	9,40	2,91	2,46	15,90	6,98	4,93		<b>61,92</b>
3	<2,5 - 7,5)	1,29	0,86	5,87	0,13	0,06	16,28	2,93	0,75		<b>28,16</b>
4	<7,5 - 10,0)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00		<b>0,05</b>
5	<10,0 - $\infty$ )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		<b>0,00</b>
		<b>13,47</b>	<b>8,95</b>	<b>16,06</b>	<b>4,10</b>	<b>0,00</b>	<b>34,95</b>	<b>11,64</b>	<b>6,59</b>	<b>0,15</b>	<b>100,00</b>

Všimněte si, že v tab. 2.2 nejsou počity třídy stability počasí Pasquill-Gifford, tako v tab. 2.1. Třídy použité v tab. 2.2 vycházejí z klasifikace kterou vyvinuli Bubník a Koldovský v 80. letech minulého století. Stupnice je odvozena z teplotních gradientů, s čímž do určité míry souvisí také rychlosti větru.

Stupnice je následující [10]:

- 1 superstabilní
- 2 stabilní
- 3 izotermní
- 4 normální
- 5 konvektivní

Tento způsob klasifikace je v podmínkách ČR velmi častý. Pracují s ním např. některé metodiky Ministerstva životního prostředí pro modelování rozptylu nebezpečných látek do ovzduší ze zdrojů znečištění.

Z větrné růžice lze jednoduše vytvořit profil síly (obr. 2.6a) a směru větru (obr. 2.6b).



Obrázek 2.6: Profil rychlosti a směru proudění větru pro lokalitu Ostrava - Zábřeh, 2018 (adaptováno z [115])

Z obr. 2.6 vyplývá, že pro zkoumanou lokalitu je převažující síla větru třídy 2  $0,5 - 2,5 m \cdot s^{-1}$  (62 %) popř. 3  $2,5 - 7,5 m \cdot s^{-1}$  (28 %). Převažující směr větru je jihozápadní (35 %), poměrně časté jsou pak také směry severní, východní a západní (vždy 11,5 - 13,5 %). Naopak takřka vyloučit lze bezvětří a jižní vítr.

Tyto údaje lze použít pro nastavení reprezentativních scénářů dalšího modelování.

Teplotu a vlhkost lze pak odvodit z dlouhodobých průměrů. Jako vhodné se jeví použití měsíčních průměrů, popř. průměrů přes roční období.

## 2.2 Zdroj úniku

Před započítáním modelování je nutno definovat zdroj úniku látky. Vlastnosti zdroje budou použity pro odhad množství látky v ovzduší. Následně lze modelovat jednotlivé typy účinků, které látka může vyvolat.

Únik lze definovat jako:

- přímý,
- kaluž,
- zásobník (nádrž),
- potrubí.

Jednotlivé typy úniků postupně projdeme.

### 2.2.1 Přímý únik

Přímý únik definujeme zadáním množství uniklé látky nebo unikající látky. V režimu instantního (okamžitého) úniku modeluje oblak látky charakterizovaný množstvím látky, o které se předpokládá že již bude v rozhodném okamžiku modelu v ovzduší. Nehodnotí se přitom, jak ke vzniku oblaku došlo.

Proti tomu kontinuální únik se definuje množstvím látky, za určitý časový úsek (sekunda, minuta nebo hodina) uvolňující se do ovzduší. Pro tento typ úniku specifikujeme délku minutách v minutách. Po takto stanovenou dobu se předpokládá, že únik bude stálý, tedy že množství látky za časový krok simulace bude konstantní.

Pro následné modelování je pak důležité specifikovat výšku otvoru nad zemí, kudy látky uniká do ovzduší.

Dialogové okno pro zadání je znázorněno na obr. 2.7.

Obrázek 2.7: Přímý únik látky do ovzduší v ALOHA

### 2.2.2 Kaluž

Jedná se o analogii pro přímý únik, avšak s tím, že na začátku definujeme vlastnosti kaluže. Podobně jako u přímého úniku neřešíme, jak došlo k úniku látky.

Oproti přímému úniku máme ale v případě kaluže k dispozici volbu dvou režimů výpočtu:

- model odparu látky z kaluže a
- model postupného odhořívání kaluže (poolfire).

Výše uvedená volba bude mít zásadní vliv na typy následků, které jsou dostupné. Pro odpar jsou dostupné modely rozptylu látky v ovzduší (texické následky), prošlehnutí oblaku hořlavých par (flash fire) a výbud (VCE).

Pro pool fire je možno analyzovat sálání tepla a šíření spalin v ovzduší.

Pro model odparu je dialogové okno dostupné na obr. 2.8.

Obrázek 2.8: Zadání množství látky v kaluži v programu ALOHA

Kaluž je definována svou plochou a objemem látky v kaluži. Plocha bude determinovat rychlost odparu nebo odhořívání - lze říci, že čím je plocha kaluže větší, tím rychlejší tento proces bude. Plochu můžeme definovat buďto přímým zadáním ve zvolené jednotce (např.  $m^2$ ) nebo průměrem. V takovém případě spočte Aloha plochu jako obsah kruhu. Tedy kaluž je v tomto případě aproximována na kruh.

Objem je možno zadat dokonce třemi různými způsoby - je možné jej zadat přímo ve zvolené jednotce (např.  $m^3$ ), nebo zadáním průměrné hloubky kaluže. Objem se pak vypočte jako plocha kaluže x hloubka kaluže, třetí způsob umožňuje zadat váhu látky (např. v  $kg$ ).

Pro účely modelování je potřeba také specifikovat základní vlastnosti povrchu, kam se kaluž rozlila a to především:

- typ povrchu (např. půda, beton, voda, ...),
- teplota povrchu a
- počáteční teplota kaluže.

Dialogové okno pro zadání výše uvedených veličin je znázorněno na obr. 2.9. Na obr. 2.9 je znázorněna situace rozlití zkapalněného zemního plynu (**Liquified Natural Gas (LNG)**), který je uskladněn při teplotě  $-160^\circ\text{C}$ . Teplota povrchu je výrazně vyšší, což povede k prudkému odparu kaluže metanu (látko použita pro účely modelování jako substitut pro zemní plyn) do ovzduší.

Obrázek 2.9: Vlastnosti povrchu, na který se rozlila kaluž modelované nebezpečné látky v programu ALOHA

ALOHA při potvrzení provede kontrolu vlastností látek a zjistí, že při zadávání, jsme ve skutečnosti udělali chybu - bod varu metanu je za běžných podmínek totiž  $-161.8^\circ\text{C}$  a umožní nám použít tuto hodnotu.

Chyby tohoto typu mohou být běžné - drobné odchylky v informacích o látkách jsou způsobeny odchylkami laboratorních měření. Z hlediska modelování, je vždy rozhodující informace uložená přímo v databázi modelovacího nástroje, v našem případě ALOHA. Odchylky nabývají na významu v okamžiku, kdy chceme výsledky interpretovat, nebo je použít jako vstup do nějakého jiného modelu.

V případě zahoření je požadováno mnohem méně informací (nad rámec povrchu a objemu látky v kaluži, která je v obou případech stejná). Požadována je pouze počáteční teplota kaluže. Požadavek si lze zdůvodnit logicky také tak, že teplota hoření většiny látek bude výrazně vyšší nežli teplota vzduchu. Teplota vzduchu tak nemůže mít jakýkoliv zásadní vliv na průběh výpočtu.

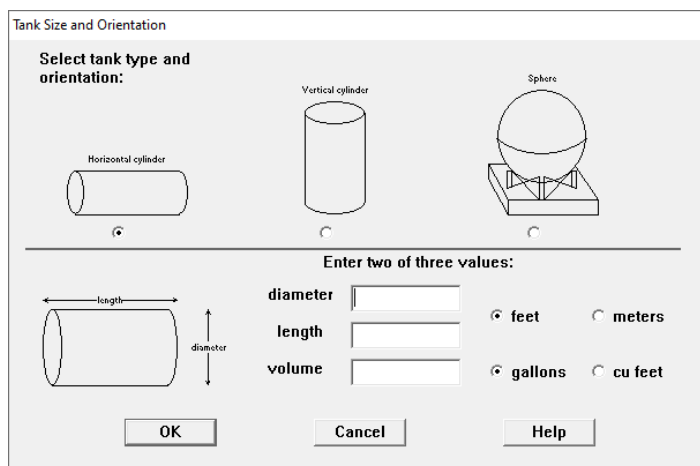
### 2.2.3 Zásobník

Při použití modelu zásobníku se pomocí reprezentativního scénáře snažíme zachytit průběh úniku již ve fázi narušení integrity zásobníku s možným rozlívem nebo únikem látky do ovzduší (s následnými modelovanými zájmovými dopady).

ALOHA umožňuje zachytit tři typy zásobníků, viz obr. 2.10.

Těmito typy jsou horizontálně, nebo vertikálně postavený válec a nebo koule. Tyto tvary odpovídají nejpoužívanějším tvarům, které se využívají pro skladování nebezpečných látek v praxi.

Použitý tvar determinuje další informace, které je nutno nadefinovat pro určení způsobu, jakým bude následně látka unikat. V případě válce tak tak potřebujeme nastavit průměr, výšku válce a objem, požadovány jsou přitom pouze dvě z těchto hodnot. Tu zbývající je možno dopočítat.



Obrázek 2.10: Nastavení vlastností zásobníku v programu ALOHA

Pro kouli je potřeba zadat buďto průměr nebo objem.

Mějte na paměti, že pokud je tvar zásobníku odlišný, než jsou tvary nabízené programem, může tento tvar výrazně ovlivnit výsledek - tedy intenzitu proudění zejména tekutin ze zásobníku. Na výše uvedené je potřeba si dát pozor zejména v situaci, kdy pracujeme s kapalinami nebo s tzv. dvoufázovým prouděním.

*Dvoufázové proudění* je z hlediska pochopen složitější. Zkusme proto tento fenomén demonstrovat na ilustračním příkladu. Mějme v zásobníku uskladněný silně stlačený plyn. Tlak, pod kterým je látka skladována ale není tak velký, aby došlo ke zkapalnění plynu. Uvažujme, že uděláme do zásobníku otvor, kterým bude látka unikat do ovzduší.

O tomto úniku obecně z fyziky můžeme říci několik věcí. Rychlost úniku bude v čase klesat, tak jak bude postupně klesat tlak látky v zásobníku až se proudění zastaví - v okamžiku kdy se vnitřní tlak v zásobníku a atmosférický tlak v prostředí vyrovnají.

Můžeme také říci, že vlivem poklesu tlaku dojde k poklesu teploty plynu v zásobníku. Tento princip si můžeme demonstrovat jednoduše u nasycených nápojů, třeba Coca-Coly. V okamžiku otevření „zasyčí“. Nalitý nápoj tak bude působit jako chladnější, i když byl třeba skladován při pokojové teplotě.

Pokud se bavíme o skladování plynů, pak ale uvažujeme často velmi silné stlačení. Teplotní pokles vyvolaný rychlou ztrátou tlaku tak může vést až k situaci, kdy teplota plynu v zásobníku poklesne pod bod varu a látka začne rychle kondenzovat (obvykle na stěnách zásobníku) - mění své skupenství z plynného na kapalné. V jedné chvíli tak v zásobníku v důsledku úniku může být látka ve dvou různých skupenstvích a bude unikat jiným způsobem.

To je potřeba zohlednit při výpočtu.

## 2.2.4 Potrubí

Posledním zdrojem úniku samostatně řešitelným v systému ALOHA je potrubí. Potrubí má některé specifické vlastnosti. Z hlediska stavebního se jedná o tzv. liniovou stavbu. Modelované potrubí je tak často poměrně dlouhé. Délka potrubí je přitom základní charakteristikou, která odlišuje potrubí o zásobníku z předchozí podkapitoly.

Prakticky si rozdíl lze představit tak, že při dekompresi, popř. rozlití v důsledku poškození potrubí musí unikající médium urazit určitou vzdálenost potrubím směrem k modelované trhlině. Právě tato skutečnost povede k odlišnostem ve výstupech modelu.

V souvislosti s potrubím je možno modelovat dva základní scénáře:

1. model úniku (bez hoření),
2. hoření (jet fire).

Vlastnosti potrubí je možno zadat pomocí formuláře na obr. 2.11.

Průměr a délka potrubí jsou významově jasné. Kromě nich, ale nastavujeme také vlastnosti zásobníku nebezpečné látky, ke kterému je potrubí připojeno.

Obrázek 2.11: Nastavení vlastností potrubí v programu ALOHA

Tento zdroj může být „nekonečný“ (infinite source) nebo potrubí může být uzavřeno (closed off). Obě volby mohou mít za určitých okolností smysl.

Nekonečný zásobník umožňuje zachytit situaci, kdy po dobu předpokládaného úniku (obvykle max. 1 hodina) bude unikat látka s konstantním intenzitou. To může být typické pro opravdu velké zásobníky zemního plynu apod.

Uzavřené potrubí zase umožňuje zachytit situaci kdy modelovaný systém je sám schopen detekovat problém a izolovat poškozené části potrubí. Tato schopnost je typická např. pro plynovody, kde lze použít tzv. staničení pro izolaci poškozené části plynovodu. Poškození je detekováno v tomto případě poklesem provozního tlaku v plynovodu na daném úseku.

V případě uzavření tak bude ALOHA modelovat pouze únik média, které se nacházelo v poškozené, izolované části potrubí. Potrubí tak nebude doplňovat další médium (např. plyn) ze zásobníku. Ačkoliv technicky toto omezení „zmenší“ únik, vzhledem k délce potrubí mezi staničeními a v případě plynu také vysokým provozním tlakům, může se i tak v potrubí nacházet velké množství média.

Rozhodnutí o drsnost povrchu potrubí pak má vliv na nastavení koeficientu drsnosti používaném v některých výpočtech.

V druhém kroku se pro potrubí definuje tlak skladované látky před začátkem úniku a také teplota skladovaného média, viz obr. 2.12.

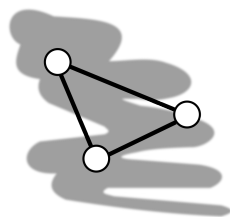
Obrázek 2.12: Nastavení vlastností látky v potrubí v programu ALOHA

Pro scénáře pracující s uzavřeným (izolovaným potrubím) se možno nastavit velikost otvoru. Otvor je možno nastavit buďto na průměr potrubí nebo specifikovat přesně plochu otvoru.

Otvor ekvivalentní průměru potrubí odpovídá z praktického pohledu úplné ruptuře potrubí.

Odvození plochy otvoru už ale není úplně přímočaré, neboť je nutno pracovat s nějakým konkrétním zdrojem poškození. Pro plynová potrubí se např. často pracuje s otvorem přibližně 5 x 2 cm, který přibližně odpovídá zubu lžice bagru. Předpokládáme přitom vznik poškození v důsledku provádění výkopových a zemních prací.

Při odhadu plochy otvoru je tak potřeba vždy pracovat s reprezentativním scénářem (ideálně podloženým zkušenostmi, statistickými údaji o nehodách apod.).



### Návaznosti na další předměty

S ohledem na modelování nemáme v tomto předmětu úplně dobrou možnost seznámit se podrobně s problematikou modelování v celé její šíři. Znalosti nabyté v tomto předmětu je proto potřeba kombinovat s dalšími předměty, zejména předměty, které jsou zaměřeny na riziko, technologie a závažné havárie.

## 2.3 Hodnocení toxických vlastností oblaku par



### Modelování následků

Výpočet a vizualizace polygonů probíhá jednotně přes menu *Display* → *Threat Zone*. Toto dialogové okno podle nastavení situace (viz předchozí podkapitoly). Zobrazí seznam následků, které je možno namodelovat.

V této podkapitole se budeme zabývat oblakem par vzniklým únikem látky a způsobu interpretace výsledků.

Pro toxický oblak par je možno specifikovat celkem tři zájmové zóny definované určitou úrovní koncentrace látky, viz obr. 2.13.

Obrázek 2.13: Nastavení zájmových koncentrací par v oblaku nebezpečné látky v systému ALOHA

ALOHA tyto meze označuje jako **Levels of Concern (LOC)**. Do češtiny můžeme LOC přeložit jako *zájmová koncentrace látky*. Tyto úrovně by měly představovat limitní úroveň koncentrace látky odpovídající určitému očekávanému efektu látky na zdraví.

Látky evidované v ALOHA mají obvykle přednastaveny zájmové úrovně označované jako PAC-1 až PAC-3. **Protective Action Criteria for Chemicals (PAC)** je zkratka pro kritéria volby ochranných opatření pro chemické látky. Formálně vycházejí ze systémů doporučení směrnice o expozici veřejnosti nebezpečnými látkami:

- Acute Exposure Guideline Levels (AEGL)
- Emergency Response Planning Guidelines (ERPG)
- Temporary Emergency Exposure Limits (TEEL)

Vzhledem k tomu, že jednotlivé seznamy se ne úplně překrývají má ALOHA implementován systém preferencí volby koncentrací z výše uvedených seznamů. Vzhledem k tomu, že mezi jednotlivými seznamy existují také odlišné filozofické rozdíly, doporučujeme pro analyzovanou látku mít vždy nastudovány toxické vlastnosti a ALOHOU předpřipravené úrovně zájmových koncentrací vždy podrobit kritickému zkoumání z hlediska toho, zda koncentrace pro danou látku odpovídá potřebám, kvůli kterým je modelování nasazováno.



**AEGL** poskytuje návod pro interpretaci úrovní akutní expozice účinkům nebezpečných látek. Pokud ALOHA má k dispozici údaj o AEGL, použije jej jako preferovaný zdroj dat.

**AEGL** obsahuje informace o koncentracích při kterých většina populace (včetně dětí, starších obyvatel nebo nemocných) začne pociťovat negativní efekty působení nebezpečné látky, pokud budou vystaveni po dostatečně dlouhou dobu působení této látky.

Pracuje se přitom s třemi úrovněmi koncentrace v ovzduší vyjádřené v *ppm* nebo  $mg \cdot m^{-3}$  po jejímž překročení :

- **AEGL-3** - mohou postižení pociťovat život ohrožující stavy nebo zemřít.
- **AEGL-2** - mohou být exponované osoby postiženy závažnými, dlouhodobými zdravotními následky nebo může být narušena jejich schopnost uniknout z ohrožené oblasti.
- **AEGL-1** - mohou exponované osoby pociťovat citelné nepohodlí, podráždění nebo další asymptomatické mimo smyslové efekty. Tyto efekty však neomezují schopnost úniku postižených a po ukončení expozice odezní.

Seznamy AEGL udržuje US **Environmental Protection Agency (EPA)** na svých webových stránkách [26] pro vyhledávání látek podle CAS čísla nebo názvu látky. AEGL jsou dostupné také v agregované podobě v jediném PDF souboru, viz [29]. V době psaní této části textu (X. 2019) byla poslední revize kompilované verze AEGL z 27. července 2018.

Příklad AEGL koncentrací pro *chlor* je dostupný v tab. 2.3.

Tabulka 2.3: AEGL koncentrace Chlor (převzato z [29])

(ppm)	10 min.	30 min.	60 min.	4 hod.	8 hod.
<b>AEGL 1</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>AEGL 2</b>	2,8	2,8	2,0	1,0	0,71
<b>AEGL 3</b>	50	28	20	10	7,1

Následky vystavení člověka účinkům látky závisí na koncentraci a čase. Pro účely modelování limitní koncentrace AEGL představují hraniční zájmové hodnoty - modelujeme předpokládané polygony účinků na člověka. Z hlediska délky trvání ALOHA implicitně používá hodinový expoziční limit. Alternativně lze určit zájmové koncentrace ručním zadáním, použití odlišných hodnot ale musí být podloženo/zdůvodněno scénářem průběhu modelované události.

**ERPG** jsou limity expozice účinkům nebezpečných látek, které udržuje **National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)**, konkrétně pak Office of Response and Restoration. Limity ERPG byly stanoveny pro přibližně 150 látek a v ucelené podobě je možné je zakoupit v knižní podobě [3]. V elektronické podobě jsou ERPG úrovně integrovány do databáze nebezpečných látek *Cameo Chemicals* [27], která je dostupná bezplatně k použití.

Podobně jako pro AEGL, se pracuje se třemi úrovněmi ERPG:

- **ERPG-3** - maximální koncentrace v ovzduší, které mohou být vystaveni takřka všichni lidé po dobu až jedné hodiny aniž by pociťovali nebo se u nich vyvinuly život ohrožující zdravotní následky.
- **ERPG-2** je maximální koncentrace v ovzduší které mohou být vystaveni takřka všichni lidé po dobu až jedné hodiny aniž by pocítili nebo se u nich vyvinuly nevratné nebo jiné závažné zdravotní následky nebo symptomy, které by mohly omezit schopnost člověka se aktivně chránit.
- **ERPG-1** je maximální koncentrace látky v ovzduší, které mohou být vystaveni takřka všichni lidé po dobu až jedné hodiny aniž by pocítili silnější než středně závažné, dočasné následky na zdraví nebo aniž by byl zaznamatelný zřetelný zápach.

Oproti **AEGL** je pro úrovně ERPG dostupná pouze hodinová mezní dávka. U vybraných látek jsou hranice ERPG doplněny koncentrací **Lower Explosion Limit (LEL)**. Příklad ERPG hodnot pro *Benzen* je dostupný v tab. 2.4.

Tabulka 2.4: ERPG koncentrace Benzenu (převzato z [3])

CAS	Látka	jednotka	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
71-43-2	Benzene	ppm	50	150	1000

Konečně **TEEL** představují hraniční koncentrace, po jejímž překročení bude větší lidí pociťovat negativní zdravotní následky. Podobně jako u **AEGL** a **ERPG TEEL** také rozlišuje tři úrovně:

- **TEEL-3** je koncentrace látky v ovzduší (vyjádřena jako **parts per milion (ppm)** nebo  $mg/m^3$ ) po jejímž překročení je predikováno, že populace včetně citlivých jedinců po vystavení účinkům po dobu delší nežli jedna hodina může pociťovat život ohrožující zdravotní potíže nebo dokonce zemřít.
- **TEEL-2** je koncentrace látky v ovzduší (vyjádřena jako **ppm** nebo  $mg/m^3$ ) po jejímž překročení je predikováno, že populace včetně citlivých jedinců po vystavení účinkům po dobu delší nežli jedna hodina může pociťovat nevratné nebo jiné závažné, dlouhodobé, negativní následky na zdraví nebo sníženou schopnost se evakuovat.
- **TEEL-1** je koncentrace látky v ovzduší (vyjádřena jako **ppm** nebo  $mg/m^3$ ) po jejímž překročení je predikováno, že populace včetně citlivých jedinců po vystavení účinkům po dobu delší nežli jedna hodina může pociťovat značné nepohodlí, podráždění nebo další asymptomatické následky. Tyto následky však nebrání v útěku a jsou přechodné a zcela vratné po ukončení expozice látky.

Gestorem datasetu je Ministerstvo energetiky USA. Samo ministerstvo tyto limity ale neoznačuje jako **TEEL**, ale jako **PAC**, s tím že tyto limity v sobě mají integrované limity **AEGL** a **ERPG**. V současné verzi limitů je obsaženo 3145 látek, jedná se tak o nejrozsáhlejší dostupný zdroj údajů o zdravotních efektech expozice látek. Údaje o expozičních limitech jsou bezplatně dostupné v PDF formátu, nebo jako tabulka MS Excel. Oproti AEGL je ale (podobně jako v případě ERPG) uvažována pouze hodinová expozice.

Poslední verze data setu (v době psaní tohoto textu se jednalo o verzi 29A) vyšla v polovině roku 2016. Od té doby, ale jako AEGL, tak ERPG prošly několika koly revizí. Tyto nové údaje pak dosud nebyly integrovány do data setu.

Z tohoto důvodu je obvykle jako zdroj informací o následcích preferován AEGL, v případě nedostupnosti údajů ERPG a teprve na posledním místě TEEL (PAC).



#### Příklad - únik chloru

Pro demonstraci uvažujme jednoduchý příklad úniku 50 kg chloru ze zásobníku. Uvažujme přímý únik. Zformulujeme dva scénáře jeden se stabilním (vítr 3 m/s, střední oblačnost) a druhý s nestabilním počasím (vítr 1 m/s, střední oblačnost). Výsledné polygony jsou znázorněny v tab. 2.5 a na obr. 2.14a a 2.14b.

Tabulka 2.5: Hranice zájmových koncentrací AEGL pro únik 50 kg chloru při stabilitě počasí D a B

AEGL	D	B	koncentrace
AEGL-3	750 m	575 m	20 ppm
AEGL-2	2 km	1,3 km	2 ppm
AEGL-1	3,3 km	2,1 km	0,5 ppm

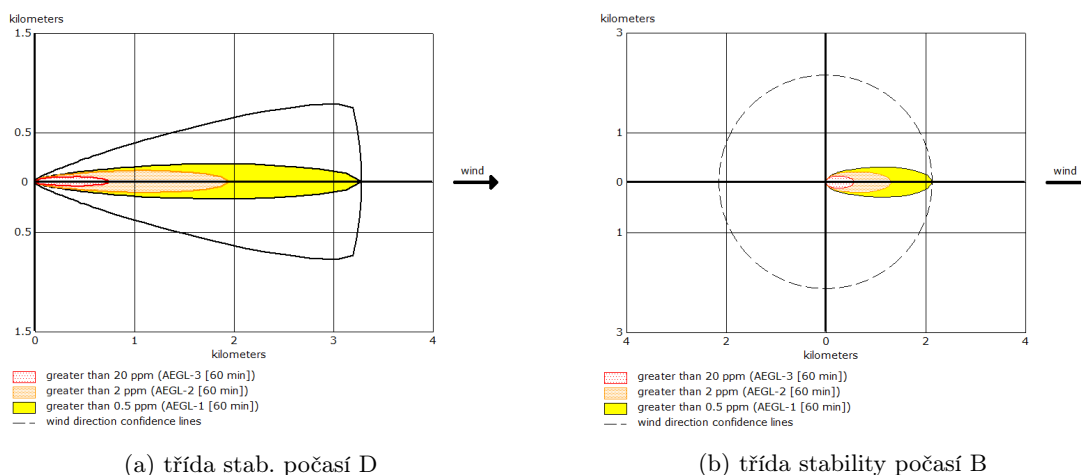
Podrobnější hodnocení scénářů je možno provést pomocí probitových funkcí. Takovou odvodit (přejmout) samostatně pro každou modelovanou nebezpečnou látku a také sledovaný efekt. Lee's Loss Prevention in Process Industries [61] uvádí následující probitové funkce pro chlor - zranění (2.2) a úmrtí (2.1) a pro amoniak - úmrtí (2.3).

$$Y = -17,1 + 1,69 \ln \sum C^{2,75} T \quad (2.1)$$

$$Y = -2,4 + 2,9 \ln(C) \quad (2.2)$$

$$Y = -30,57 + 1,385 \ln \sum C^{2,75} T \quad (2.3)$$

Kde  $\sum C^{2,75} T$  je celková dávka látky, které byla osoba vystavena,  $C$  koncentrace látky v ovzduší [ppm],  $T$  je čas vystavené se účinkům látky [min] a  $Y$  je hodnota probitové funkce. Na tuto hodnotu je nutno provést zpětnou transformaci na pravděpodobnost uvažovaného následku vyjádřenou v procentech.



Obrázek 2.14: Vypočítané polygony k zajímavým koncentracím látky

Přepočtenou hodnotu v procentech lze interpretovat tak, že zkoumaný efekt nastane u počtu lidí odpovídající vypočtenému procentu ze sta lidí vystavených nebezpečné látce o dané koncentraci.

Ručně je možno provést přepočet podle tab. dostupné v Příloze 1 tohoto textu.

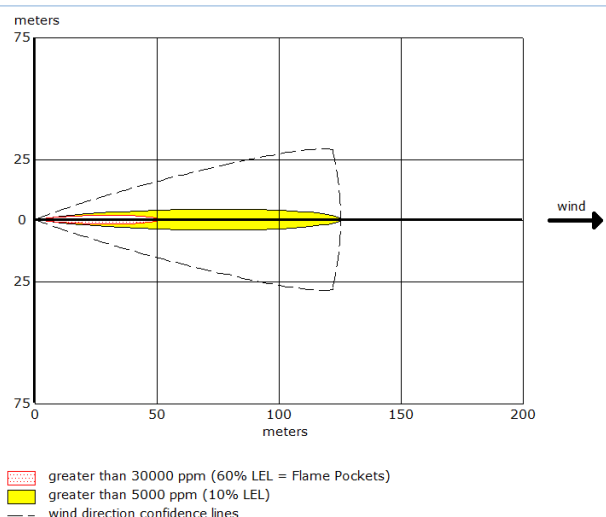
## 2.4 Scénáře se zahořením látky

### 2.4.1 Flash fire - hořlavá oblast oblaku par

Tento scénář volíme pro hořlavé látky - volba *Flamable area of Vapour Cloud*. Systém Aloha nejprve na pozadí vypočte model rozptýlení látky v ovzduší a pro ni následně spočte oblast ohroženou prošlehnutím oblaku.

Pro tuto situaci jsou předvoleny hranice 60 % LEL a 10 % LEL. V těchto limitech se předpokládá, že by mohly vzniknout „kapsy“ plynu, které v případě iniciace budou mít tendenci prošlehnout.

Vizualizace zajímavých koncentrací je dostupná na obr. 2.15.



Obrázek 2.15: Model zóny ohrožení prošlehnutím pro únik metanu v systému ALOHA

Oproti základnímu toxikologickému modelu je ohrožená oblast výrazně užší. Pro zajímavost si můžete model v ALOHA zkusit zpracovat sami. Zde použitý model používá látku metan, přímý únik 10 t/hod. Rychlost větru 3 m/s, 15 °C, ostatní parametry ponechány v implicitním nastavení.

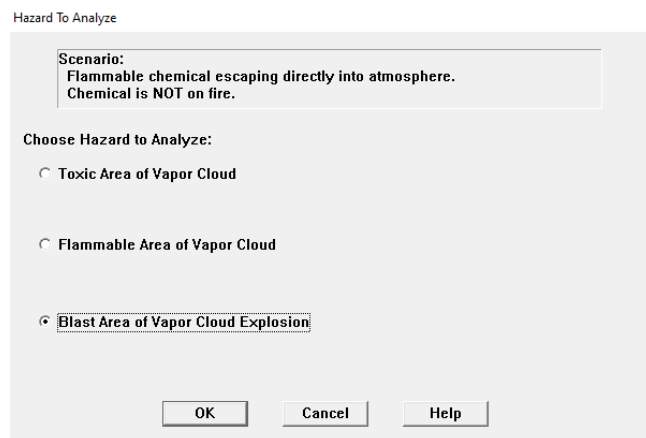
Hranice ohrožení je potřeba vnímat orientačně. Vzhledem k tomu, že předpokládáme vznik kapes

plynu, není ve skutečnosti možno předvídat, kde přesně tyto kapsy vzniknou. To bude záviset např. na poryvech větru, náhlých změnách směru větru apod.

V případě výpočtu tohoto scénáře obvykle zpracováváme také scénář exploze oblaku par (VCE).

## 2.4.2 VCE - exploze

Uvažujme stejný příklad jako v pro scénář *Flash fire*, pro výpočet zóny ohrožení ale použijeme oblast výbuchu (*Blast area of vapour cloud explosion*), viz obr. 2.16.



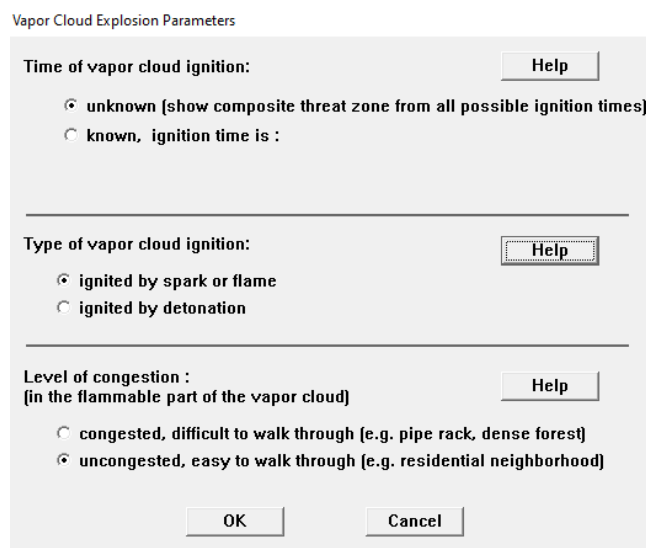
Obrázek 2.16: Volba scénáře pro výpočet zóny ohrožení v systému ALOHA

Pro realizaci výpočtu jsou potřeba další informace, např. kdy je očekávána exploze. Pro většinu havarijních scénářů, kdy zkoumáme možné budoucí situace tento čas není známý. Naopak, pokud se snažíme namodelovat scénář již proběhlé události, může být nutné nastavit tento parametr na konkrétní hodnotu. Tento parametr totiž má schopnost určit charakteristiky oblaku par, zejména jak je velký.

Rozdíl tak je v tom, zda se oblak par bude tvořit celou hodinu, nebo k explozi dojde 5 minut po zahájení úniku.

V části iniciace (viz obr. 2.17) volíme způsob jakým bude oblak par iniciován. Máme dvě možnosti:

- jiskrou nebo plamenem nebo
- detonací



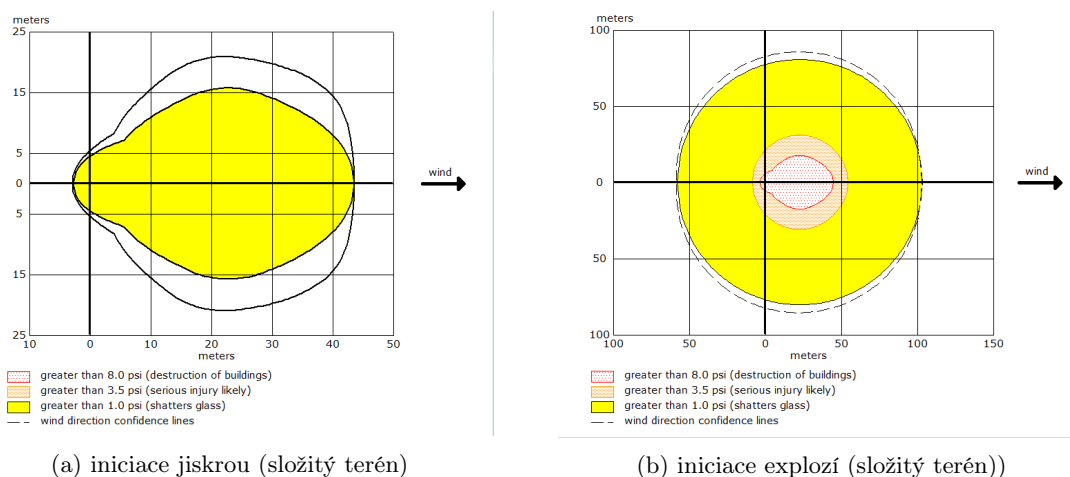
Obrázek 2.17: Parametry modelu VCE v systému ALOHA

První možnost je běžnější a předpokládá iniciaci oblaku jiskrou (např. zkratem) nebo otevřeným plamenem. Druhá možnost se hodí pro modelování situací, kdy iniciace je provedena detonací jiné výbušniny. Toto lze využít např. pro modelování scénářů sabotáže nebo terorismu. Exploze iniciované detonací jsou obvykle podstatně silnější než ty, které jsou iniciované jiskrou, popř. plamenem.

Pro náš scénář můžete porovnat rozdíly na obr. 2.18. Vlevo je exploze iniciována jiskrou a vpravo iniciována explozí.

Poslední volba se týká členitosti terénu. Pokud je terén členitý, budovy, les, apod. lze předpokládat vznik turbulencí, které mohou přispět zvýšení rychlosti (a tím také účinkům) rázové vlny. Pro náš první model iniciovaný jiskrou zvolíme *congested* - tedy složitý terén v opačném případě, by se totiž mrak jednoduše rozptýlil a prostředí vhodné pro scénář VCE by vůbec nevzniklo.

Předvolené parametry modelu jsou hranice přetlaků 8 (destrukce budov), 3,5 (vážná zranění) a 1 (rozbití skel) psi.



Obrázek 2.18: Polygony zájmových přetlaků (scénář metan, 10 t/hod)

Všimněte si, že scénář reprezentovaný obr. 2.18a obsahuje pouze odhad pro nejmenší přetlak 1 psi. Oproti tomu, pokud exploze bude iniciována jinou detonací, budou následky podstatně větší, viz obr. 2.18b.

Základní tvar je opět potřeba brát pouze orientačně, jelikož je velmi ovlivňován skutečným tvarem terénu a tedy směrem, kterým se exploze bude moci šířit. Pokud tento směr není předem znám je na ose x potřeba odečíst vzdálenosti k jednotlivým hodnotám mezních přetlaků a zónu ohrožení brát jako okruh ze zásobníkem látky ve středu.

Z hlediska analýzy scénáře může být potřeba analyzovat také odlišné hodnoty přetlaků. Některé z častěji používaných hodnot jsou dostupné v tab. 2.6.

Tabulka 2.6: Vybrané zájmové přetlaky z hlediska předpokládaných účinků na objekty (převzato z FEMA [31])

Účinek	Přetlak [psi]
rozbití okenních tabulek	0,15 - 0,22
menší poškození některých budov	0,5 - 1,1
ohnutí plechových panelů	1,1 - 1,8
zřícení částí stěn z betonových prefabrikátů	1,8 - 2,9
zřícení dřevostaveb	> 5
silné poškození staveb s ocelovými nosnými konstrukcemi	4 - 7
těžké poškození železobetonových konstrukcí	6 - 9
pravděpodobná celková destrukce většiny budov	10 - 12

V literatuře je pak možno dohledat ještě podrobnější údaje. Ty mohou mít smysl pokud modelování provádíme pro konkrétní oblast, pro kterou je známo složení (konstrukce) budov v oblasti.

Existují také některé hodnoty mezních tlaků umožňující odhadnout šanci na přežití, viz tab. 2.7.



### Převodník tlaku

Pro tlak se používá v literatuře celá řada jednotek. Může tak být výhodné získat do rukou nástroj pro jejich vzájemný převod. Zkusme se podívat na některé z používanějších jednotek tlaku:

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 0,987 \text{ atm} = 14,50377 \text{ psi}$$

Kde Pa = pascal, atm = atmosféra, psi = Pound-force per square inch

Tabulka 2.7: Účinky tlaku na člověka (adaptováno z [12])

přetlak [bar]	popis efektu
0,03	zranění způsobená střepy (létající trosky)
0,21	20 % šance pro úmrtí osob uvnitř budov
0,35	poškození ušních bubínek, 50 % šance na úmrtí osob uvnitř budov a a 15 % šance na úmrtí v otevřeném prostoru
0,7	100 % úmrtnost osob uvnitř nebo mimo budovy

Všimněte si, že v tab. 2.7 je rozlišováno mezi ztrátami na životě uvnitř a mimo budovy. Na první pohled tyto údaje mohou působit kontra intuitivně, protože úmrtnost je vyšší v budovách než v otevřeném prostoru. V tomto případě je ale myšlena také exploze vně nebo uvnitř budovy. Exploze mimo budovy budou mít tendenci šířit se neomezeně do všech stran, což má pozitivní efekt na sílu rázové vlny exploze i na naši schopnost ji přežít.

Z výše uvedeného vyplývá jedna poměrně zásadní informace. **Vytvoření a nasazení modelu je často pouze počátkem práce a také tou nejjednodušší částí práce. Co je komplikované je interpretace těchto výsledků!**

Podrobnější kompilace přetlaků a jejich následků je dostupná v literatuře, např. Cozzani a Salzano [17] zkompilovali z dostupné odborné literatury řadu hraničních přetlaků pro selhání různých typů zařízení. Tyto údaje jsou dostupné v [17] tabelární podobě včetně odhadů pravděpodobnosti pomocí probitové funkce.

Probitová funkce umožňuje spočítat na základě velikosti přetlaku odhadnout pravděpodobnost poškození. Takový údaj je užitečný v případě, kdy zkoumána možnost vzniku kaskády selhání iniciované modelovanou explozí. Pro vybavení uvádí Cozzani a Salzano [17] vzorec (2.4)

$$Y = k_1 + k_2 \ln(\Delta P) \quad (2.4)$$

Kde  $Y$  je hodnota probitové funkce,  $k_1, k_2$  jsou konstanty odvozená na bázi empirických měření. Pro účely modelování následků na vybavení se jedná o hodnoty  $k_1 = -23,8$ ,  $k_2 = 2,92$ , konečně  $\Delta P$  je mezní hodnota přetlaku [Pa].

Pro získání pravděpodobnosti v procentech je nutné hodnotu probitové funkce  $Y$  zpětně transformovat. Grafické znázornění funkce v procentech je patrné z obr. 2.19.

Obdobné funkce jsou dostupné pro výpočet možnosti přežití (HSE [41]). Hodnoty koeficientů jsou v tomto případě jiné, konkrétně  $k_1 = 5,13$  a  $k_2 = 1,37$  pro přetlak v barech a  $k_1 = 1,47$  a  $k_2 = 1,37$  pro přetlak v psi. Graficky je tato probitová funkce zachycena na obr. 2.20.

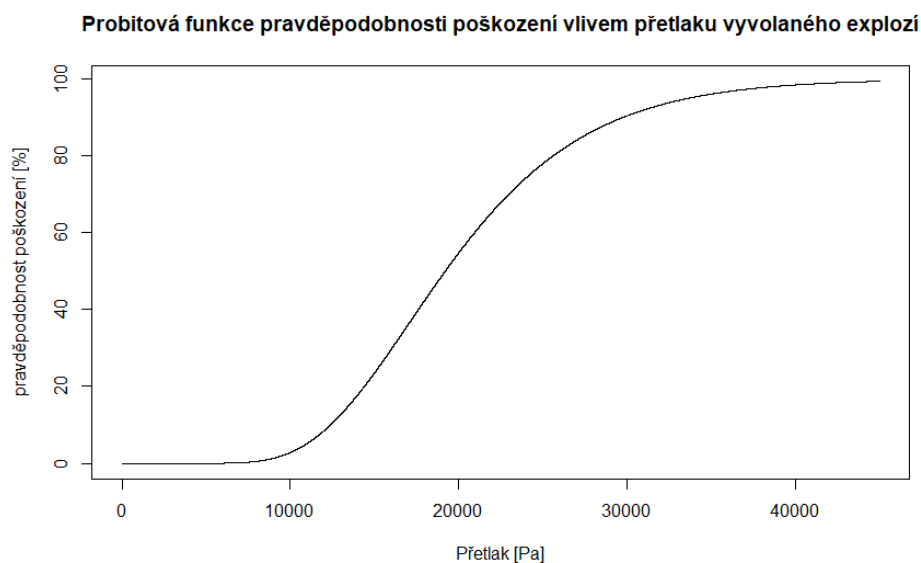
### 2.4.3 BLEVE efekt

**BLEVE** je zkratkou pro explozi expandujících výparů vařících tekutin. Tento efekt ohrožuje zejména zásobníky nebezpečných látek, které uskládňují zkapalněné plyny pod vysokým tlakem.

Čistě technicky je možno mechanismus vzniku tohoto efektu demonstrovat na obr. 2.21.

Před selháním obsahuje zásobník jak natlakované páry, tak kapalinu v rovnovážném stavu. Následuje ztráta tlaku v zásobníku např. otvorem, nebo trhlinou. Na obr. 2.21 je tato ztráta reprezentována poklesem z bodu  $A \rightarrow B$ . Předpokládaná ztráta tlaku bude natolik prudká, že teplota uskladněné látky zůstane konstantní.

Pokud je teplota uskladněné látky relativně nízká, pak pokles tlaku na úroveň atmosférického tlaku způsobí prudký var látky, avšak k **BLEVE** efektu nedojde.



Obrázek 2.19: Závislost pravděpodobnosti poškození vybavení přetlakem způsobeným explozí

Scénář reprezentovaný poklesem tlaku v zásobníku ilustrovaný poklesem  $C \rightarrow D$  je jiný, I v tomto případě dojde k poklesu tlaku, ale úroveň atmosférického tlaku nemůže být dosažena, protože v bodě  $D$  bude dosaženo křivky limitu teploty přehřátí a lze očekávat explozi.

Pro výpočet v praxi je možno použít tvar rovnice (2.5) podle Reida, stanoveného ze stavové rovnice Redlich-Kwong [82], který udává vztah teploty limitu přehřátí ( $T_{SL}$ ) v závislosti na kritické teplotě uskladněné látky ( $T_c$ ):

$$T_{SL} = 0,895 \cdot T_c \quad (2.5)$$

kde  $T_{SL}$  je teplota přehřátí atmosférického tlaku,  $T_c$  kritická teplota látky.

Z výše uvedeného můžeme odvodit několik skutečností relevantních pro modelování efektu pomocí systému ALOHA:

- scénář se týká pouze zásobníků
- skladující látku pod dostatečně vysokým tlakem, aby alespoň část uskladněné látky v zásobníku byla v kapalně formě.
- o vzniku efektu rozhodně počáteční stav (tlak v) zásobníku a charakteristika otvoru, kterým látka uniká
- scénář vyžaduje externí zdroj tepla (požár)

Pro výše uvedené lze modifikovat scénář z předchozího případu. Jako látku můžeme použít metan, jako hlavní složku zemního plynu. Náš scénář tak může modelovat selhání zásobníku **LNG**.

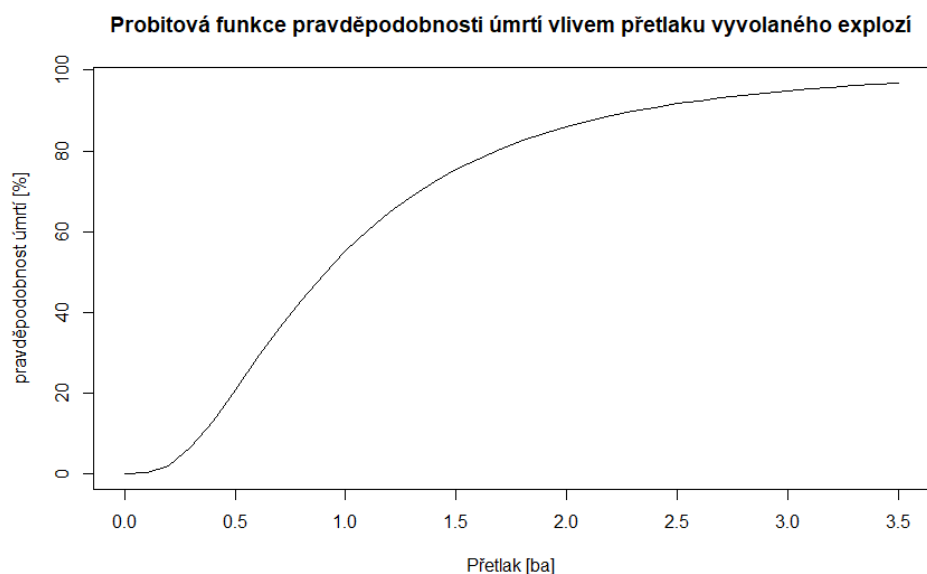
Uvažujme menší zásobník definovaný jako ležící válec o průměru 1,5 m a 3 m na délku. Tato velikost odpovídá objemu  $5,3m^3$  (viz obr. 2.22).

V dalším kroku definujeme stav a teplotu uskladněné látky. Stav je možné zadat jako neznámý (unknown), v takovém případě se odvodí z teploty uskladněného média a množství látky. Vzhledem k tomu, že modelujeme **LNG**, budeme uskladňovat látku při teplotě  $-160\text{ }^\circ\text{C}$ . Množství látky bude řekněme 2,46 t.

V případě, že ale víme, že látka bude v kapalném stavu (nastavili jsme stav látky na kapalný), zobrazí se nám dialogové okno s větší možností specifikace množství látky, viz obr. 2.23.

Jak je z obr. 2.23 patrné, odpovídá hodnota 2,46 t 100 % naplnění zásobníku. Alternativně je možno na začátku modelování zadat stav látky v zásobníku jako neznámý. Specifikovat předpokládané množství látky. ALOHA následně na základě zadaných údajů vypočte stav látky a výpočet přepne k tomuto spočtenému stavu.

Pokud následně klikneme na tlačítko *cancel*, nabízená dialogová okna se změní a budou odpovídat už tomuto stavu.



Obrázek 2.20: Závislost pravděpodobnosti úmrtí přetlakem způsobeným explozí

Pro náš příklad se bude nabízet výpočet pro scénáře:

- úniku látky ze zásobníku do prostoru (bez zahoření)
- únik látky s hořením - *jet fire* scénář
- **BLEVE** efekt

V této podkapitole nás bude zajímat právě BLEVE efekt (v následující pak scénář *jet fire*).

BLEVE efekt má potenciál škodit následujícími způsoby:

- tepelným sáláním způsobené ohnivou koulí a následným požárem (scénář *pool fire*)
- létající trosky z explodujícího zásobníku
- toxické efekty spalin hoření

Všimněte si, že přestože se jedná o explozi, tak nejsou uvažovány efekty přetlaku. To je dáno tím, že BLEVE efekt vytváří relativně slabou rázovou vlnu. Většina škod je způsobena účinky ohnivé koule (fireball).

Pro výpočet jejího rozsahu je nutné specifikovat, kolik materiálu v době exploze je ještě v zásobníku a „zúčastní se tak exploze“. To je možné udělat specifikací % látky v zásobníku, tlakem v zásobníku nebo teplotou látky v okamžiku selhání zásobníku.

Z hlediska modelování havarijního scénáře jako nejméně příznivá varianta je, že 100 % látky v zásobníku se zúčastní exploze.

Pro náš scénář se vypočte průměr ohnivé koule na 76 m s délkou hoření 6 s. Pro oblast zasaženou ohnivou koulí se předpokládá nulová šance na přežití a také to, že vše hořlavé, co bylo touto koulí zasaženo bude zapáleno.

Účinky efektu jdou ale za hranice dosahu ohnivé koule, prostřednictvím sálání. Graficky je situace znázorněna na obr. 2.24. Vykreslované hranice jsou vztaženy k předpokládané hustotě tepelného toku. Předvolené jsou hodnoty:

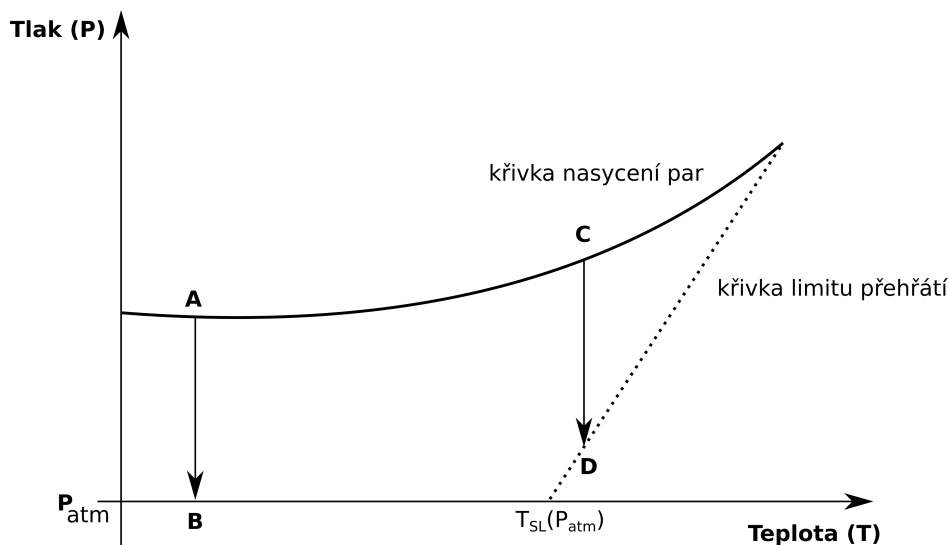
- $10kW/m^2$  - potenciálně smrtelné při vystavení účinkům po dobu 60 s
- $5kW/m^2$  - popáleniny druhého stupně při vystavení účinkům po dobu 60 s
- $2kW/m^2$  - bolestivé při vystavení po dobu 60 s

Všimněte si, že na obr. 2.24 jsou vykreslovány pouze zájmové hranice hustoty tepelného toku, nikoli však polygon dosahu ohnivé koule. Tento údaj je dostupný pouze v textové podobě.

Podobně jako v případě explozí i v tomto případě lze provádět podrobnější analýzy pomocí probitových funkcí. Pro tyto účely se nejčastěji používají funkce vyvinuté TNO [81] pro popáleniny prvního (2.6), druhého (2.7) a třetího (2.8) stupně.

$$Y = -39,83 + 3,0186\ln(D) \quad (2.6)$$





Obrázek 2.21: Teplotní limit přehřátí v závislosti na tlaku (adaptováno z [78])

Obrázek 2.22: Definování velikosti zásobníku pro modelování BLEVE efektu

$$Y = -43,13 + 3,0186 \ln(D) \quad (2.7)$$

$$Y = -36,38 + 2,56 \ln(D) \quad (2.8)$$

$$D = I^{4/3} \cdot t_e \quad (2.9)$$

Kde  $D$  je obdržená dávka v  $[(W/m^2)^{4/3}s]$ ,  $I$  je intenzita tepelného sálání  $[W/m^2]$  a  $t_e$  je čas vystavení účinkům v  $s$ . Hodnotu probitové funkce  $Y$  je nutno opět transformovat do podoby procent.

Orientační vizualizace průběhu probitové funkce pro vystavení člověka tepelnému toku po dobu jedné minuty je dostupné na obr. 2.25.

#### 2.4.4 Jet Fire (tryskový požár)

Pro požáry typu *jet fire* se v češtině používá označení tryskový, někdy také tryskový požár. Tento typ požáru vzniká při narušení zásobníku nebo potrubí obsahující plyn pod vysokým tlakem. Po narušení pláště plynná látka uniká do prostoru pod velkým tlakem, který svým zvukem připomíná tryskový motor (v angličtině *jet*) - odtud také název scénáře.

Chování plamene může být poměrně odlišné v závislosti na tom, kde přesně vznikla trhlina v plášti, kterou látka uniká. Pokud vznikla zhora bude látka unikat směrem vzhůru a následně se stáčet ve směru větru. Tento scénář je typický pro narušení plynového potrubí v důsledku výkopových prací. Tento scénář je znázorněn na obr. 2.26a.

Obrázek 2.23: Množství látky v zásobníku - látka v tekutém stavu

Alternativní scénář, je že k otvoru dojde z boku. V takovém případě uniká látka přímo ve směru trhliny. Plamen se postupně zvedá jak je naznačeno na obr. 2.26b.

Zkusme namodelovat tento jev pomocí systému ALOHA. Jako základ použijeme scénář BLEVE efektu z předchozí kapitoly. Oproti předchozímu scénáři budeme ale muset udělat několik změn.

Uskladněná látka (použijeme opět metan) musí být v plynném skupenství - to lze nastavit v dialogovém okně *Chemical state and temperature*. Řekněme, že uskladněno bude 2.5 t látky (alternativně lze množství látky specifikovat zadáním tlaku v zásobníku). S takovým nastavením jsou dostupné pouze scénáře úniku látky do ovzduší (tedy bez iniciace látky) a jet fire (s iniciací látky).

V následujícím kroku definujeme charakteristiky otvoru, kterým uniká látka, viz obr. 2.27.

Únik může být realizován buďto trhlinou nebo krátkým potrubím, popř. ventilem. Trhlinou (otvorem) můžeme zachytit situace, kdy dojde k ruptuře zásobníku nebo k jeho netěsnosti (např. ve sváru). Tímto způsobem lze také zachytit poškození např. bagrem v rámci výkopových prací, což je nejčastější typ poškození potrubí. Šířka zubu bagru je přibližně 5 cm a řekněme, že na výšku bude mít otvor 2 cm.

Pro zachycení takového scénáře je nutno přepnout tvar otvoru na obdélníkový (rectangular opening) a nastavit patřičným způsobem šířku a výšku otvoru.

Alternativním scénáře by byl únik látky např. uraženým přívodním potrubím, popř. ventilem. Tento typ poškození je typický pro nadzemní zásobníky. K poškození může dojít např. v důsledku nepozornosti řidiče cisterny, do které nebo ze které je látka přečerpávána z (popř. do) zásobníku.

Z hlediska našich nastavení je ale rozdíl mezi oběma scénáři zanedbatelný.

Výsledek scénáře je možno zobrazit jako na obr. 2.28. ALOHA nám přitom umožňuje zkoumat jak sálání - tak chování plynu v zásobníku.

Pro účely sálání redukuje ALOHA zdroj úniku do podoby bodového zdroje, viz 2.28a. Tento způsob lépe odpovídá situaci znázorněné na obr. 2.26a, kdy plamen šlehá přímo vzhůru. Naopak situaci, kdy plamen šlehá do strany, takový model zcela přesně nevystihuje. Existují modely, které umožňují charakteristiky takového plamene vypočítat, ale bohužel zde nemáme prostor, abychom se jimi zabývali podrobněji.

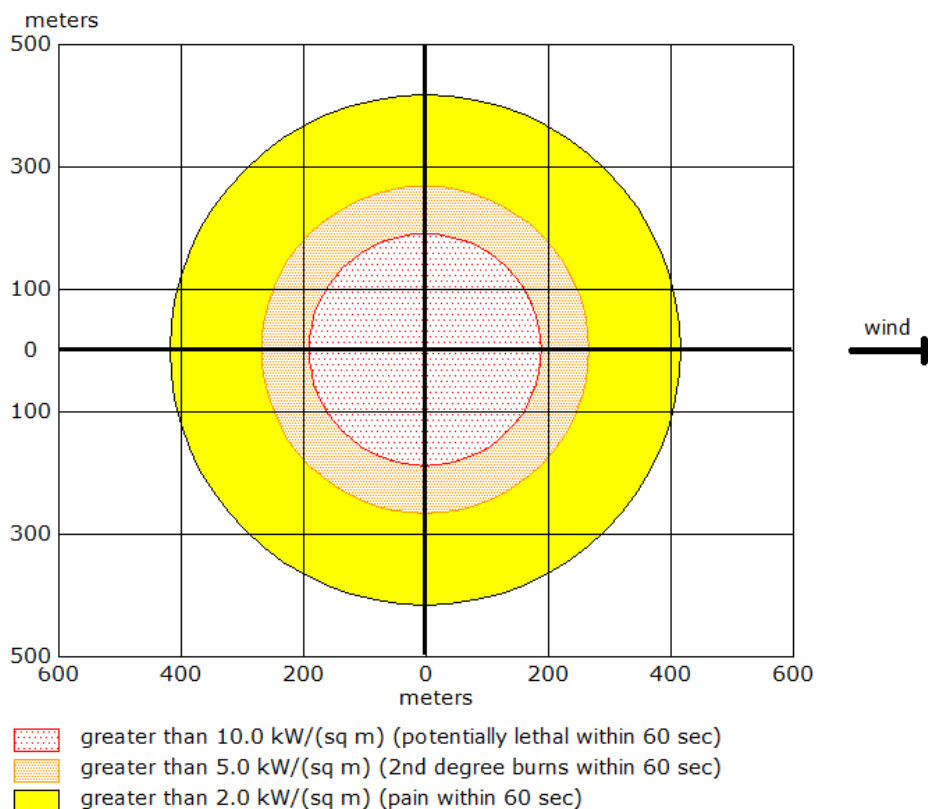
Je potřeba také říci, že výška (popř. délka) bude přímo závislá na tlaku, pod kterým bude látka ze zásobníku unikat. Plamen tedy bude nejdelší těsně po iniciaci zdroje a následně se bude zkracovat tak, jak postupně bude klesat tlak v zásobníku. Tuto situaci dobře ilustruje graf na obr. 2.28b.

Odvození následků vlivem sálání lze provést obdobně jako v případě BLEVE efektu, včetně možností použití probitových funkcí.

## 2.4.5 Pool fire

Posledním typem scénáře, které můžeme v systému ALOHA zachytit je tzv. *pool fire* - tedy požár otevřené nádrže nebo rozlité hořlaviny. Tento typ požáru se vyznačuje tím, že látka hoří po celém svém povrchu a postupně odhořívá. Vzhledem k tomu, že takové nádrže jsou velmi často uvnitř areálů - sálání generované v průběhu požáru může způsobit signifikantní škody na budovách technologiích a samozřejmě také zdraví nebo dokonce životě lidí, které mu jsou vystaveni.

Jistou představu o vzhledu takového scénáře je možno si udělat z obr. 2.29.



Obrázek 2.24: BLEVE efekt polygony mezních hodnot hustoty tepelného toku

Nejjednodušší způsob, jak takový scénář v ALOHA namodelovat je použití louže (puddle) pro definici zdroje úniku. Tento typ zdroje umožňuje modelovat pouze dva scénáře a to odpar látky do ovzduší (tedy bez iniciace) a pool fire (s iniciací).

Byť je zdroj označen jako louže, ve skutečnosti se o louži jednat nemusí. V rámci definice zdroje máme možnost nadefinovat povrch uvažovaného „zásobníku“. množství látky uvnitř je možno definovat buďto specifikací objemu (např. v l, popř.  $m^3$ ), průměrnou hloubkou louže (cm, m) nebo hmotností látky v zásobníku (kg, t).

Rekněme, že pro náš scénář budeme uvažovat louži o průměru 5 m a průměrné hloubce 5 cm. Jako látku v tomto případě zvolíme třeba *hydrazine*.

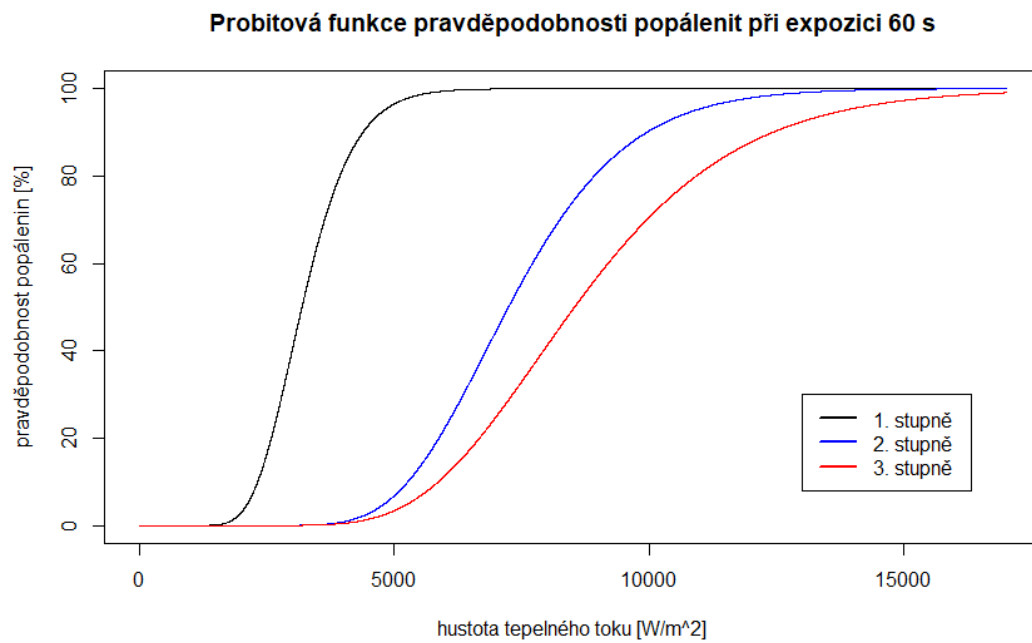
Jelikož teplota prostředí je nižší než teplota vzplanutí v případě, že chceme získat pool fire musíme programu explicitně říci, aby předpokládal, že látka bude hořet.

Náš scénář pak povede k tomu, že z kaluže bude po dobu jedné hodiny postupně odhořívát 3,18 kg/min - celkově odhoří 191 kg látky.

Byť výška plamene v tomto případě je okolo 2 m, jednotlivé hranice zájmových oblastí z hlediska sálání je menší než 10 m a takové hodnoty ALOHA neumožňuje vizualizovat.

Pool fire lze modelovat také jako navazující scénář, který uvažuje únik látky ze zásobníku s následným zahořením.

Následky interpretujeme podobně jako v případě jet fire nebo BLEVE scénářů, jelikož následky jsou vyvolávány sáláním.



Obrázek 2.25: Probitová funkce popálenin 1. - 3. stupně (adaptováno z [81])



(a) nahoru (převzato z [21])

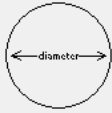


(b) do strany - převzato z [2]

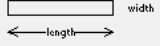
Obrázek 2.26: Jet fire

**Area and Type of Leak**

Select the shape that best represents the shape of the opening through which the pollutant is exiting



← diameter →



width  
← length →

Circular opening       Rectangular opening

---

Opening diameter:

inches  
 feet  
 centimeters  
 meters

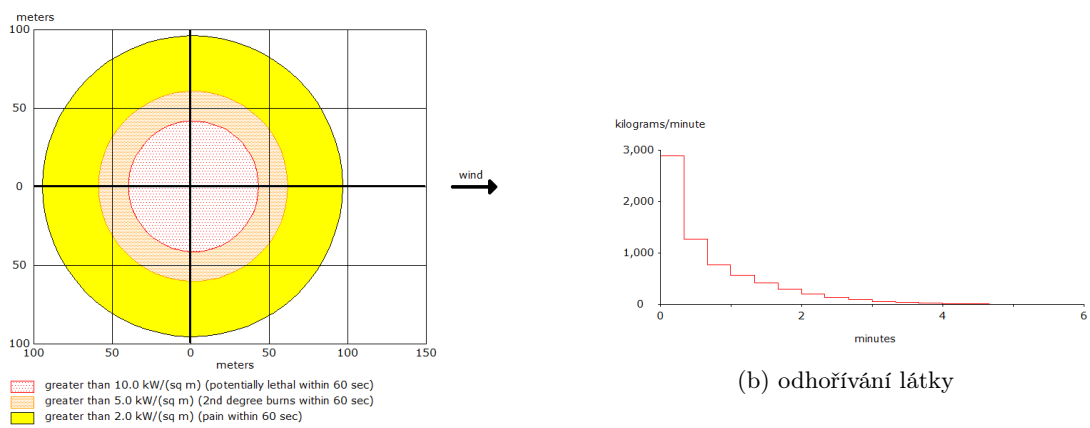
---

Is leak through a hole or short pipe/valve?

Hole       Short pipe/valve

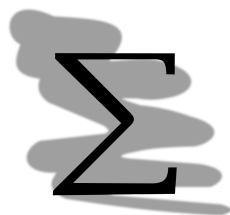
Obrázek 2.27: ALOHA - definice otvoru v zásobníku, kterým uniká látka



Obrázek 2.28: Jet fire - model následků



Obrázek 2.29: Pool fire - ilustrační foto (převzato z [80])



### **Shrnutí**

V této kapitole jsme se seznámili s řadou různých scénářů a způsobem, jak je modelovat pomocí nástroje ALOHA. Konkrétně se jednalo o scénáře:

- hodnocení toxických následků
- výbuchu nasycených par (VCE)
- BLEVE efekt
- flash fire
- jet fire
- pool fire

Modelování obvykle vede k odvození polygonů následků definujících určitou oblast ohroženou určitým typem následku.

Alternativně k tomuto přístupu lze použít probitovou funkci k odhadu následků na lidi, ale třeba také budovy.



### **Kontrolní otázky** Popište následující scénáře:

- hodnocení toxických následků
- výbuchu nasycených par (VCE)
- BLEVE efekt
- flash fire
- jet fire
- pool fire



### **Modelování scénářů**

V textu této kapitoly se objevila celá řada příkladů. Zkuste replikovat tyto modely v systému ALOHA.

Případně zkuste namodelovat vlastní scénář havárie a následky, jaké by taková havárie mohla mít na okolí.

## Kapitola 3

# Povodně



### Průvodce studiem

Tato kapitola se zaměřuje na problematiku povodní - konkrétně na různé možnosti odhadu škod v území. V tomto ohledu se zaměříme na následující aspekty povodňových škod:

- odhad ztrát na živote
- odhad škod na budovách
- odhad škod v zemědělství
- apod.

### Po prostudování této kapitoly budete znát

- základy hodnocení/odhadu povodňových škod na různých typech objektů podle metodiky Drbal et al.
- vybrané alternativní postupy používané v Německu a Velké Británii
- jak interpretovat zjištěné výsledky ve smyslu předpokládaných účinků na obyvatelstvo a majetek



### Čas pro studium

Z hlediska rozsahu hodnocení škod je tato kapitola poměrně rozsáhlá. Je to dáno tím, že povodně jsou dlouhodobým a častým problémem a proto pro ně existují poměrně dlouhé časové řady a řada postupů pro odhad škod. Mimochodem obdobné postupy lze aplikovat pro jiné scénáře vzniku škod.

Připravte si proto pár hodin času pro prostudování kapitoly.

Co je vlastně povodeň? Zákon o vodách (zákon 254/2001 Sb. [113]) definuje **povodeň** jako: *přechodné výrazné zvýšení hladiny vodních toků nebo jiných povrchových vod, při kterém voda již zaplavuje území mimo koryto vodního toku. Přechodné výrazné stoupanutí vodní hladiny konkrétního vodního toku, při kterém se voda z koryta vylévá, způsobuje následné zaplavení bezprostředního i blízkého okolí vodního toku, ohrožuje životy a majetek, devastuje životní prostředí a působí značné materiální škody. Povodeň je i stav, kdy voda může způsobit škody tím, že z určitého území nemůže dočasně přirozeným způsobem odtékat nebo její odtok je nedostatečný, případně dochází k zaplavení území při soustředěném odtoku srážkových vod. Povodeň může být způsobena přírodními jevy, zejména táním, dešťovými srážkami nebo chodem ledů (přirozená povodeň), nebo jinými vlivy, zejména poruchou vodního díla, která může vést až k jeho havárii (protržení) nebo nouzovým řešením kritické situace na vodním díle (zvláštní povodeň).*

Z výše uvedeného jasně vyplývá, že škody jsou odvozovány z působení vodního živlu v místech, která na tuto možnost nejsou připravena. Z hlediska modelování se pro odhad škod používají zejména veličiny jako je:

- hloubka zatopení v místě (m),
- rychlost proudění vod (m/s) a

- doba, po kterou byl objekt zatopen (dny).
- popř. další

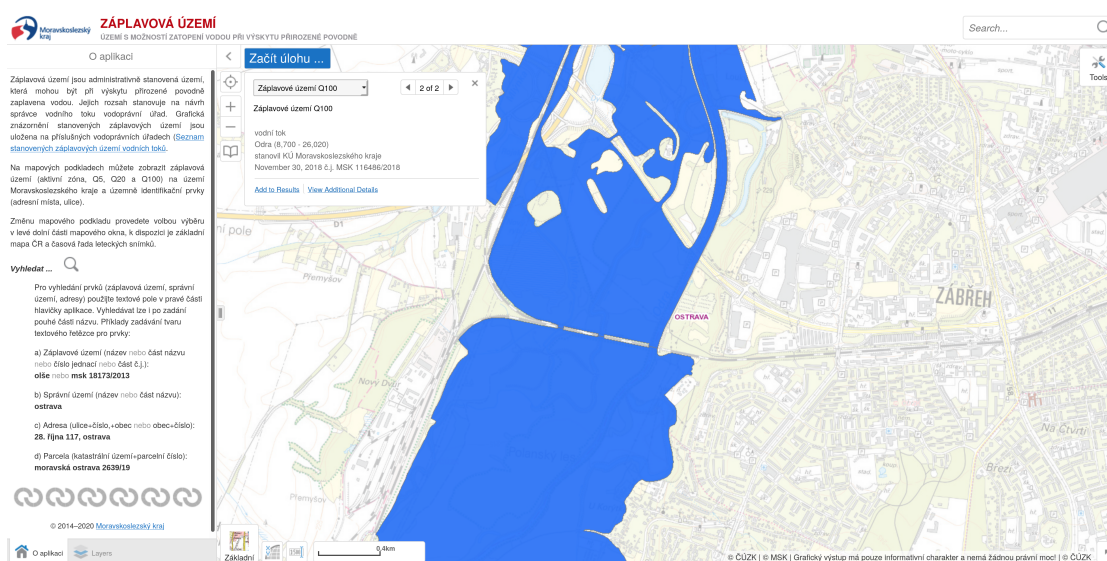
Výše uvedené informace je možno získat několika způsoby. Povodeň lze do určité míry modelovat s použitím hydrodynamických a srážkoodtokových modelů (podle toho, jaký typ povodně je modelován). Modelu tohoto typu jsou schopny poskytnout poměrně podrobnou informaci o intenzitě působení živlu - především pak předpokládané rychlosti proudění vod a výšce zatopení.

Jako podklad pro modelování jsou používány poměrně podrobné informace o reliéfu ve 3D.

Příprava a výpočet takových modelů ale není snadná a realizovat ji mohou specialisté v oboru hydrologie.

Technicky jednodušší představu o výšce zatopení alespoň pro modelové scénáře 5-ti leté (Q5), 20-ti leté (Q20) a 100-leté (Q100) povodně je možné použít model reliéfu společně s polygony záplavových území. Pro objekty v oblasti lze pak následně odhadnout výšku zatopení.

Moravskoslezský kraj má např. pro záplavová území připravenou aplikaci [67] - její náhled je dostupný na obr. 3.1.



Obrázek 3.1: Záplavové území Ostrava - Zábřeh (převzato z [67])

Tímto způsobem však není možné získat informace o rychlostech proudění vod.

Poslední možností je realizace místních šetření a odvození potřebných dat z na místě dostupných zdrojů, zkušeností a měření. Tímto způsobem lze získat pravděpodobně nej přesnější představu, avšak realizace takového přístupu vyžaduje řádově vyšší úsilí. Z tohoto důvodu je takový přístup vhodný spíše pro menší lokality vyžadující podrobný model škod.

### 3.1 Metodika hodnocení škod - ČR

#### Obecný model škod

V důsledku katastrofálních povodní v letech 1997 a pak také 2003 byla na území ČR shromážděna poměrně rozsáhlá data o působení povodní a také škodách, které s sebou přinášejí. Toho využil Drbal et al. [23, 24], kteří vytvořili a validovali metodiku pro odhad škod způsobených povodněmi v území. Model škod byl přitom odvozen z empiricky odvozených křivek poškození určujících procento škod na daném zájmu v závislosti na výšce zatopení.

V obecné podobě, lze model škod vyjádřit vzorcem (3.1).

$$D_{ik} = E_{ik} C_k L_k \quad (3.1)$$

Kde  $D$  je škoda na objektu dané kategorie [Kč],  $i$  je index posuzovaného objektu v dané kategorii,  $k$  je index kategorií,  $E$  množství nebo velikost zasaženého objektu specifikované v kusech, délce, půdorysné ploše, popř. objemu,  $C$  pak představuje jednotkovou cenu (náklad) na měrnou jednotku dle hodnocené kategorie,  $L$  je míra poškození pro jednotlivé kategorie objektů v závislosti na zaplavení.



Metodika Drbal et al. [23, 24] je přizpůsobena k posuzování velkých území a předpokládá použití podkladů v elektronické podobě.

Ke své funkci potřebuje mapu hloubek (nevyžaduje však mapu předpokládaných rychlostí proudění vod).

Dále je vyžadována identifikace způsobu užití daného objektu na mapě za účelem odvození koeficientu  $C$ . Pro tento účel lze v podmínkách ČR použít patřičné vrstvy ze ZABAGED [127].

ZABAGED poskytuje relativně věrný (aktualizovaný) pohled na objekty v území a způsob jejich použití. Je očividné, že proti reálné situaci musí mít každý zdroj dat jisté zpoždění. Tyto odchylky lze ale považovat za náhodné a pro posuzování větších území zanedbatelné.

Základní typologii objektů v ZABAGED jsme zmiňovali již v kapitole 1. V tomto textu proto předpokládáme, že relevantní data o území jsou k dispozici.

### Škody na budovách a jejich vybavení

Jelikož křivky poškození  $L$  jsou pro jednotlivé typy objektů empiricky odvozeny a vstupují do výpočtu v zásadě jako konstanty, zbývá už pouze jedna položka, bohužel však svým způsobem nejkomplikovanější. Touto položkou je odvození koeficientu  $C$ .

K jeho odvození jsou vyžadována statistická data, která nutně nejsou dostupná na jednom místě, popř. ve formě, která by umožňovala přímé použití pro účely odvozování škod. Tyto údaje je proto potřeba předpřipravit pro realizaci výpočtu.

Postup můžeme demonstrovat na škodách na budovách. Vzorec pro výpočet škod je v tomto případě (3.2).

$$D_{SO} = AL_1(h)C_1 \quad (3.2)$$

Kde  $D_{SO}$  je škoda na budově [Kč],  $A$  je půdorysná plocha budovy [ $m^2$ ],  $L_1(h)$  procento poškození odvozené z křivky poškození z tab. 3.1 a  $C_1$  je jednotková cena standardního podlaží budovy [ $K/m^2$ ].

Graficky je možno závislost vyjádřit pomocí grafu na obr. 3.2.

Tabulka 3.1: Procentuální vyjádření minimálního a maximálního poškození ( $L$ ) na budovách v závislosti na hloubce zaplavení (převzato z [23, 24])

Poškození [%]	Hloubka zaplavení										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_{min}$	2,23	6,69	9,93	12,69	17,15	20,38	23,15	27,61	30,84	33,61	38
$L_{max}$	3,55	10,64	16,5	21,89	28,98	34,84	40,23	47,32	53,18	58,57	65,66

Nulová hloubka zatopení v tab. 3.1 je použitelná pro podsklepené části budov.

K tabulce 3.1 a obr. 3.2 je potřeba dodat, že křivky poškození jsou empiricky odvozené. Křivky tak budou odpovídat realitě pouze v případě, že objekty použité pro odhad těchto křivek budou odpovídat stavebně objektům, které jsou posuzovány v rámci studie odhadu dopadů vlivu zatopení.

Pokud v posuzované oblasti toto není splněno, lze očekávat vyšší míru chyb. Prakticky to také znamená, že vypovídající schopnost takové křivky v čase klesá. Tento pokles ale ve skutečnosti není rychlý, protože ve stavebnictví se sice objevují nové materiály a stavební postupy, nových budov, které je využívají je ale ve srovnání s existující zástavbou minimum.

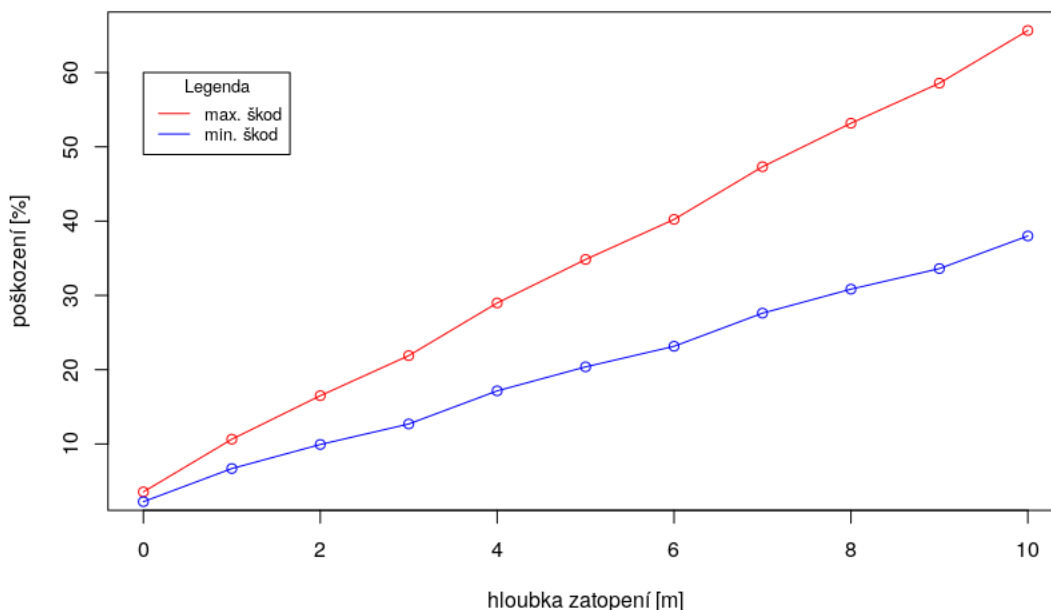
Jednotkovou cenu  $C_1$  je možno odečíst přímo z metodiky, ovšem s tím, že se jedná o nominální jednotkové ceny vztahované k roku vzniku metodiky, nebo použít Cenové ukazatele ve stavebnictví [83]. V takovém případě je potřeba určit o jaký typ budovy (nebo objektu obecně) se jedná podle **Jednotná klasifikace stavebních objektů (JKSO)** a z ceníku určit jednotkovou cenu na obnovu.

Ceníky jsou připravovány každoročně. ZABAGED obsahuje členění objektů, které lze na **JKSO** jednoduše mapovat.

Kódy JSKO pro nejčastěji se objevující typy budov jsou následující:

- 801 - Budovy občanské výstavby
- 802 - Haly občanské výstavby
- 803 - Budovy pro bydlení
- 811 - Haly pro výrobu a služby
- 812 - Budovy pro výrobu a služby
- 813 - Věže, stožáry, komíny
- 814 - Nádrže a jímky čistíren vod a ostatní pozemní nádrže, jímky, zásobníky, jámy

### Křivka poškození budov v závislosti na hloubce zatopení



Obrázek 3.2: Procentuální vyjádření minimálního a maximálního poškození ( $L$ ) na budovách v závislosti na hloubce zaplavení (převzato z [23, 24])

- 822 - Komunikace pozemní a letišť
- 827 - Vedení trubní, dálková a přípojňá

Poškození objektů je jedna věc, podstatnou část škod však mohou tvořit také na vybavení budov. Odhad takových škod je přitom náročnější, neboť vybavenost budov se liší jednak podle účelu využití budovy, jednak v případě bydlení také sociální situace jeho obyvatel.

V obecné rovině lze výpočet zrealizovat pomocí vzorce (3.3).

$$D_V = A \cdot ZV \quad (3.3)$$

Kde  $D_V$  představují škody [Kč],  $A$  je půdorysná plocha budov [ $m^2$ ] a  $ZV$  je jednotková škoda [Kč].

Pro výpočet je ale nezbytně nutné odhadnout cenu vybavení z údajů ČSÚ, konkrétně publikace *Vydání a spotřeba domácností statistiky rodinných účtů* [121]. Problémem je, že realizace tohoto typu šetření je poměrně obtížná a tak intervaly, ve kterých jsou tyto údaje realizovány jsou poměrně dlouhé.

Z těchto údajů je nutno poskládat reprezentativní domácnost a celkové nominální náklady na pořízení vybavení je nutno normalizovat na průměrnou velikost bytové jednotky (nebo obdobné stavby - např. rodinného domu). Výsledkem je nominální jednotkový náklad na  $m^2$  obytné plochy v cenách roku, kdy byly údaje shromážděny.

Vzhledem k tomu, že tento údaj se vyvíjí v čase (hodnota peněz v čase obvykle klesá) je nutné tuto skutečnost zohlednit buďto použitím cen obvyklých v roce provádění analýzy škod nebo alespoň započtením inflace. Druhý typ výpočtu není úplně korektní, protože předpokládá, že hodnota inflace pro vybavení domácnosti se výrazně neliší ode změn v cenách odvozených analýzou vývoje cen spotřebního koše. Na druhou stranu se jedná o způsob jednoduchý v ekonomii poměrně často používaný.

Aplikovat inflaci lze vzorcem pro výpočet úročení, viz (3.4).

$$FV = PV \prod_{r=1}^n (1 + i_r) \quad (3.4)$$

Kde budoucí hodnota peněz  $FV$  se vypočte z původní hodnoty peněz  $PV$  vynásobených úrokovou sazbou  $i$  v roce  $r$ . Úrokovou sazbu v našem případě zastoupí výše inflace v daném roce.

Roční průměrné míry inflace v ČR jsou dostupné v Příloze 2.



## Úroky

Vypočítejte budoucí hodnotu 10 000 Kč za deset let, s úrokem 10 %.

## Škody v zemědělství

Analogickým způsobem mohou být také odhadovány škody v zemědělství. V tomto případě je ale nutné brát v úvahu také další faktory. Škody se např. budou výrazně lišit podle měsíce, ve kterém povodeň přijde. Procentuální odhad poškození je zachycen v tab. 3.2.

Tabulka 3.2: Procentuální odhad poškození rostlinné produkce v jednotlivých měsících roku (převzato z [24])

[%]	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
obilniny	15	15	35	50	80	80	80	5	5	15	15	15
kukuřice	15	15	15	40	50	70	80	80	80	80	15	15
řepka	50	50	60	65	90	90	10	50	50	50	50	50
slunečnice	20	20	20	40	55	70	80	80	80	80	10	10
brambory	20	20	20	40	60	60	80	80	80	20	20	20
cukrovka	15	15	15	30	30	50	70	80	80	15	15	15

Mezi pěstovanými plodinami jsou z hlediska nákladů významné rozdíly. Údaje o nákladovosti zemědělských výrobků jsou sledovány Ústav zemědělské ekonomiky a informací (ÚZEI) v databázi *Nákladovosti zemědělských výrobků* [112]. Údaje shromažďované v databázi jsou dostupné vždy s určitým zpožděním, obvykle rok až dva.

Data jsou dostupná jak pro rostlinnou výrobu (19 typů), tak živočišnou výrobu (12 typů). Sledované ukazatele jsou vztaženy na plochu pro rostlinou a na kusy pro živočišnou výrobu.

Zatímco chovy se mohou v čase primárně lišit počtem kusů (popř. chov může vzniknout, popř. zaniknout). V případě rostlinné produkce je situace jiná. Z hlediska využití půdy se v jednotlivých letech mohou vysety plodiny výrazně lišit. To může být způsobeno jednak střídáním plodin s cílem minimalizovat „vysílání“ půdy pěstováním monokultur, jednak změnami v poptávce, popř. v dotační politice (např. podpora biopaliv).

Podle účelu prováděné studie je možné získat potřebné informace na místě podle předpokládaného plánu využití zemědělských ploch jednotlivými zemědělci - tedy provést místní šetření nebo vyjít z obecnějších statistik ploch osevů, které jsou dlouhodobě sledovány ČSÚ v produktu *Soupis ploch a osevů* [124]. Údaje jsou shromažďovány po jednotlivých krajích vždy ke konci května daného roku. Statistika je pak zveřejňována počátkem července daného roku.

Agregované údaje pro celou ČR jsou dostupné také ve veřejné databázi ČSÚ [123].

Takové údaje lze využít pro výpočet vážených průměrů ploch nákladů jednotlivých plodin korigovaných na předpokládanou dobu příchodu povodně. Plocha osetí by v takovém případě mohla sloužit jako váha.

Metodika Drbal et al. [24] řeší problém závislosti škod na době, kdy vzniknou odhadem minimální a maximální předpokládané ztráty. Výsledné škody tak nejsou brány jako jedna hodnota předpokládaných škod, ale jako rozsah takových škod.

Existují samozřejmě také alternativní metody odhadu škod. Green et al. [36] používají vzorec (3.5) pro odhad škod na jednotlivých plodinách a (3.6) na pastvinách. Vzorce (3.5) a (3.6) vycházejí se studia záplav dostupných datových sad v rámci projektu *Costs of Natural Hazards (CONHAZ)*.

$$L = Y + P_r RC - P_h HC + REM \quad (3.5)$$

$$D = GMJ \cdot RF + C \quad (3.6)$$

Kde  $Y$  je předpokládaná ztráta výnosu. Tuto ztrátu lze vypočítat zjednodušeně z předpokládaného výnosu vynásobeného cenou, jinými slovy se jedná ztrátu vyvolanou tím, že povodeň zničila danou

plodinu a ta tudíž nemohla být prodána.  $P_r$  je roční pravděpodobnost potřeby znovu zasít,  $RC$  je cena za znovuzasetí,  $P_h$  je roční pravděpodobnost úplné ztráty úrody,  $HC$  náklady na sklizeň a vstupy, kterým by se bez vlivu povodně bylo možno vyhnout,  $REM$  jsou náklady na obnovu.

Vzorec (3.6) odvozuje náklady spojenými s poškození pastvin z energie, kterou by bylo možné získat spasením.  $GMJ$  je energie trávy ztracené v důsledku povodně [MJ/ha],  $RF$  jsou náklady na náhradu krmení pro zvířata [£/MJ],  $C$  jsou další náklady.

### Škody v průmyslu

Podobně jako v předchozích případech se jako základ pro identifikaci způsobu využití plochy použije ZABAGED k tomu, aby se určila celková plocha.

Drbal et al. [24] k odhadu jednotkových nákladů využívá statistiku ČSÚ *Ekonomické výsledky v průmyslu* [122]. Tento typ indikátorů ČSÚ sleduje dlouhodobě, statistiky jsou ale dostupné s přibližně dvouletým zpožděním. Výpočet se provádí jako součet dlouhodobého majetku, zásob a 1/3 pasiv vlastního kapitálu. Tento součet je následně vztažen k celkové ploše průmyslových areálů v České Republice, aby se získal jednotková cena na  $m^2$  nutná pro výpočet předpokládaných škod.

### Povodňové škody velkých ekonomických subjektů

Odhad takových škod je poměrně problematický. Drbal et al. [24] k tomuto účelu rozlišuje přímé a nepřímé škody. Do přímých řadí:

- náklady na úklidové a sanační práce po povodni,
- náklady na demontáž poškozeného zařízení a montáž nového (nebo opraveného),
- náklady na výměnu zařízení,
- náklady na dočasnou výměnu zařízení po dobu opravy poškozeného zařízení,
- náklady na opravy,
- ostatní náklady.

Mezi nepřímé Drbal et al. [24] řadí např.:

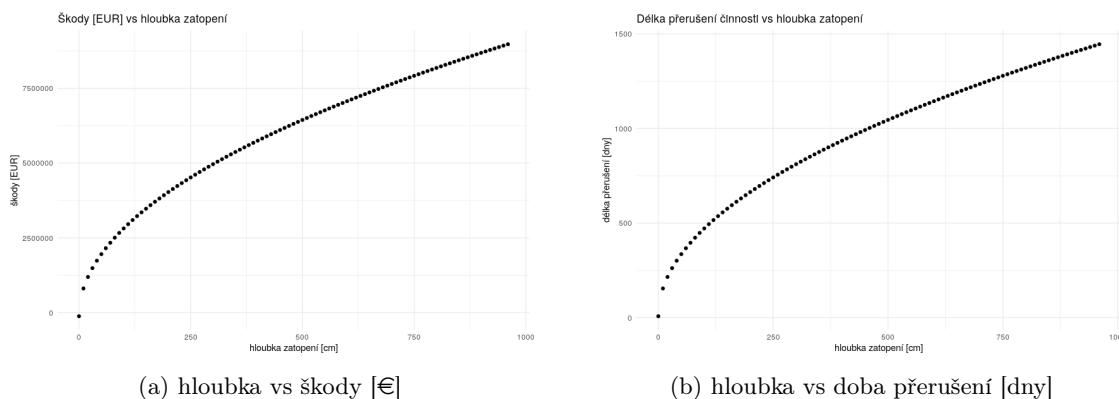
- zaměstnanci se nedostanou do práce,
- zákazníci nemohou kontaktovat závod,
- nemožnost expedovat výrobky,
- kritický nedostatek surovin,
- apod.

Ovšem s tím, že tento typ škod se odhaduje velmi obtížně.

Vytvoření modelu škod tohoto typu subjektů obvykle vyžaduje extenzivní použití řady různých zdrojů jako podkladů pro výpočet stejně jako provedení místních šetření.

Z tohoto hlediska může být pro odhad škod být zajímavé použití alternativních přístupů ke kvantifikaci škod používaných v zahraničí. Příkladem takového přístupu může být studie Sultana et al. [86]. I v tomto případě je k výpočtu vyžadována řada proměnných:

- dopady povodně
  - hloubka zatopení [m] (0 - 9,6 m)
  - indikátor kontaminace [0-6]: 0 - bez kontaminace, 6 - silná kontaminace
  - délka zatopení [hod] (0 - 1440 hod)
- vnímané nebezpečí návratu povodně [1-6]: 1 - velmi nepravděpodobné, 6 - velmi pravděpodobné
- ochranná opatření
  - schopnost adaptace: 0,25 - nízká adaptace, 1 - vysoká schopnost adaptace
  - pojištění [0/1]
- varování
  - čas varování: 1 - 336 hod předem
  - indikátor nouzových opatření: 0 - 4 podle ochranných opatření, která byla realizována
- charakteristiky organizace (obchodní společnosti)
  - odvětví: 11 = zemědělství, lesnictví rybolov, 12 = výroba, 13 = obchod, 14 = finančníctví, 15 = služby
  - počet zaměstnanců: 1 - 500 zaměstnanců
  - geografická situace: 1 = více než jedna budova, 2 = jedna celá budova
  - dodavatelé v okruhu 50 km: 0 - 100 % dodavatelů
  - zákazníci v okruhu 50 km: 0 - 100 % zákazníků



Obrázek 3.3: Vizualizace závislostí škod a délky přerušeni činností organizace na hloubce zatopení dle (3.7)

- **závislá proměnná**

- délka doby přerušeni činnosti podniku vyvolaná povodní: 0 - 400 dní
- absolutní škoda způsobená přerušeni chodu organizace: 0 - 10 000 000 €

Výše uvedené indikátory Sultana et al. [86] požil pro nalezení závislosti mezi škodami a výši vybraných indikátorů (3.7) na datech dostupných ze záplav v Německu:

$$D = a_x + b_x \sqrt{h} \quad (3.7)$$

Kde  $D$  jsou škody ve smyslu nákladů spojených s přerušeni chodu organizace nebo ve smyslu délky přerušeni,  $a, b$  jsou parametry, index  $x$  indikuje typ měřených škod (konkrétně index  $c$  pro náklady,  $d$  pro délku přerušeni činnosti),  $h$  je výška vody nad terénem [cm].

Tímto způsobem Sultana et al. [86] odvodil parametry nákladů pro přerušeni činnosti:  $a_c = -121795,4$  a  $b_c = 293649$ . Pro délku přerušeni pak parametry jsou  $a_D = 7,41$  a  $b_D = 46,42$ .

Bohužel ani tento způsob není bez problémů - je zatížen poměrně značnou chybou. V modelu použité proměnné také nejsou schopny vysvětlit značnou část variability škod. Na druhou stranu použití tohoto modelu je v mnoha ohledech jednodušší.

Překážkou pro nasazení takového modelu v podmínkách ČR je také mix firem, které byly použity pro odvození indikátorů  $a$  a  $b$ . Lze předpokládat, že tento mix bude v ČR odlišný. Použití přejatých koeficientů pak může vést k dalšímu zatížení výpočtu chybou.

Na obr. 3.3 jsou obě funkce vizualizovány v plném rozsahu podporovaných hloubek.

## 3.2 Ztráty na životech

Ztráty na životech, alespoň pro povodně, byly v minulosti taktéž extenzivně zkoumány. Různé příčiny utonutí je možno zachytit různými typy modelů. Např. s výškou hladiny pracuje extenzivně Waart [100], Jonkman [50] a Asselman [48].

Oproti škodám na majetku popsaných výše je dynamika změn člověka (biologicky) výrazně menší, než dynamika změn v majetku. To je důležité, jelikož jako základ pro studium byly extenzivně využívány datasety popisující katastrofální povodně v Nizozemí z roku 1953, při kterých utonulo 1726 osob. Datasety vznikly podrobným následným vyšetřováním. Vzhledem k vysoké náročnosti příprav takových datasetů je získání validních dat extrémně náročné. Alternativní takto zaměřené datasety tak nejsou dostupné.

Co se může měnit je způsob interpretace dat. Zatímco v roce 1953 byl proces plošné evakuace v podstatě v plenkách, dnes je většina území vyspělých států pokryta různými systémy varování. Obyvatelstvo dnes proto má obvykle čas se evakuovat.

Modely odvozené z dat by proto měly být interpretovány tak, že se vztahují pouze na tu část obyvatelstva, která zůstala v ohrožené oblasti - neevakuovala se. Není proto možné provést odhad na základě pouhého odhadu počtu obyvatel, kteří se na ohroženém území pohybují za běžné situace.

Rozdíly z hlediska následků mohou být také způsobovány fyzickými změnami na obyvatelstvu, např. kondice, zdravotní stav a také změn ve věkové struktuře obyvatelstva.

Dobrý přehled o existujících modelech pracujících primárně s výškou hladiny vyvinutým v zejména 90. letech minulého století je dostupný v Jonkman et al. [49].

Wart [100] vyvinul dva modely závislosti úmrtí na výšce zatopení, viz rovnice (3.8 a 3.9).

$$\delta_{h1} = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot e^{1,16 \cdot h} \quad (3.8)$$

$$\delta_{h2} = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{1,27 \cdot h} \quad (3.9)$$

Kde  $h$  odpovídá výšce zatopení [m],  $\delta_{hi}$  očekávaná část obyvatelstva, která bude v oblasti přímo ohrožena utonutím.

Wart [100] odvodil modely (3.8 a 3.9) statistickou analýzou dvou samostatných oblastí. Vzhledem k tomu, že odvozené modely jsou strukturálně podobné, je možno provést jejich zobecnění do podoby (3.10).

$$\delta_{hi} = a \cdot 10^{-3} \cdot e^{b \cdot h} \quad (3.10)$$

ovšem s tím, že hodnoty konstant  $a$  a  $b$  je nutno odvozovat samostatně pro každou oblast, do které bude model nasazen. Přenositelnost modelu je tak tedy omezená. Přesto nám mohou takové modely poskytnout jistý vhled do charakteristik ohrožení života způsobených stoupající hladinou. Z hlediska praktického použití jsou ale v praxi využívány jiné modely.

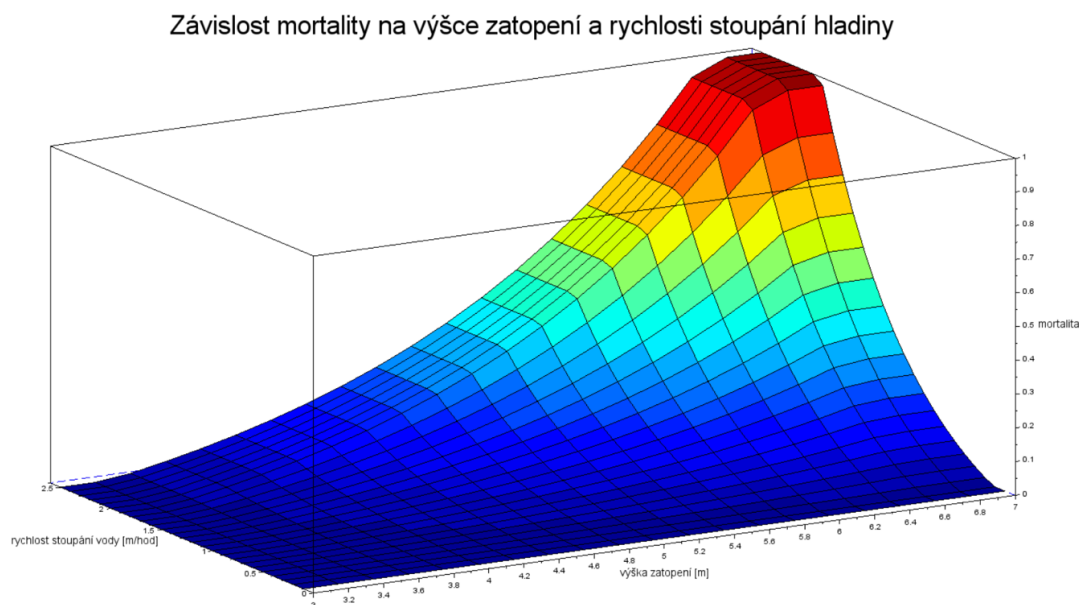
Např. v Nizozemí se využívá tzv. *Standardní metoda pro odhad škod a obětí v důsledku povodní* [49], kterou reprezentuje rovnice (3.11).

$$f_{ng} = \min(\max(8,5e^{0,6h-6} - 0,15; 0); 1) \cdot \min(\max(8,5e^{1,2v-4,3} - 0,15; 0); 1) \quad (3.11)$$

Kde  $f_{ng}$  představuje funkci mortality konstruovanou na základě výšky zatopení  $h$  [m] a rychlosti stoupání hladiny vod  $v$  [m/hod].

Rovnice může na první pohled působit nesrozumitelně svým použitím funkcí min a max. Tyto funkce pracují vždy s dvojicí čísel a slouží pro omezení výsledku do intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Např. výraz  $8,5e^{0,6h-6} - 0,15$  vychází záporná pro  $h < 3m$ . Funkce max v takových případech zajistí aby se ve výpočtu použila hodnota 0.

Výsledek proto bude znamenat, že  $f_{ng} = 0$  pro  $h < 3m$  nebo  $v < 0,3$  m/hod a  $f_{ng} = 1$  pro  $h > 6,25m$  nebo  $v > 2$  m/hod. Průběh funkce je možno znázornit také graficky, viz obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Závislost mortality na výšce zatopení a rychlosti stoupání hladiny dle vzorce (3.11) (převzato z [49])

I takový výsledek může být kontraintuitivní protože hraniční hodnota výšky zatopení je 2 m, přičemž většina populace nedosahuje výšky 2 m - co přesně nám tedy vzorec říká? Odpověď můžeme najít opět v datech, které byly použity pro konstrukci této funkce. Jedná se o stále stejná data ze záplav v Nizozemí 1953. Hraniční rychlost v značí rychlost, při které začínají někteří občané ztrácet schopnost přijmout účinné opatření k ochraně svého života. Podobně funguje parametr výška zatopení. U hladiny 2 m je možné uvažovat o přesunu do vyšších pater budovy (jsou-li k dispozici) nebo na střechu. Výška nad 6 m je ale vyšší než patrový dům nehledě na to, že část budov se může sesunout vlivem působení proudu vody.

Funkce mortality se tak týká občanů, kteří zůstali v místě a neevakuovali se.

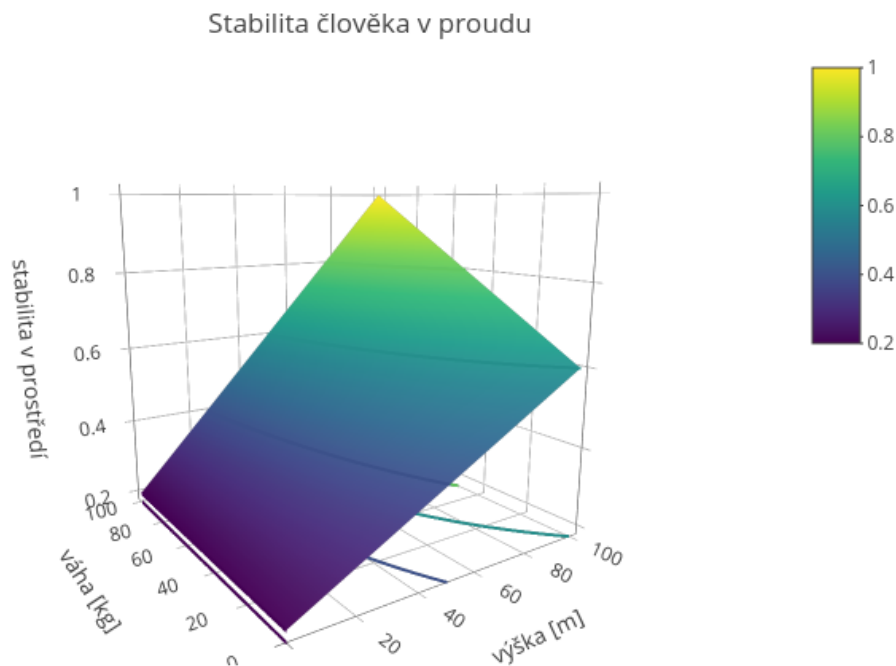
Co se týče do stability člověka v podmínkách zdolávání proudu vody dlouhou dobu nebyly k dispozici žádné datové sady pro odvození kritické hranice „síly“ proudu, při které člověk ztrácí stabilitu a bude stržen proudem. Až v roce 1989 publikoval Abt a kol. první studii o vlivu výšky a rychlosti proudění na stabilitu člověka, viz [50]. Na základě analýzy získaných dat Abt et al. vyvinuli model (3.12).

$$hv_c = 0,0929(e^{0,001906Lm+1,09})^2 \quad (3.12)$$

Obdobné zkoušky byly prováděny i v rámci projektu Rescdam, které určily jako kritickou hranici  $0,64 - 1,29 \text{ m}^2/\text{s}$  v závislosti na výšce hladiny a váze člověka. Na základě v projektu naměřených hodnot Karvonen et al. [50] odvodily model limitů pohybu za normálních okolností (3.13).

$$hv_c = 0,004Lm + 0,2 \quad (3.13)$$

Lepší představu o průběhu funkce si lze udělat z grafu na obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Stabilita člověka jako funkce závislosti výšky a váhy dle vzorce (3.13)

Odlišnost v naměřených údajích vyplývá z rozdílného způsobu pořízení dat. Měření Abt et. al byla prováděna v laboratorních podmínkách, kdy měření probíhala v umělém korytě a měřila se stabilita monolitu určité váhy a výšky v proudu. Projekt Rescdam ale měřil chování člověka při pohybu v umělém vodním kanálu s kontrolovaným proudem vody. Měření Abt et al. lze proto považovat za extrémně konzervativní, jelikož člověk je obvykle schopen dynamickou změnou polohy svého těla lépe odolávat proudu nežli neživý předmět.

### 3.3 Alternativní ocenění škod metodika DEFRA

V rámci výzkumného programu **Department for Environment and Food and Rural Affairs (DEFRA)** pro ochranu před povodněmi byla vyvinuta metodika [101, 102] pro posuzování škod způsobených povodněmi.

Výpočet škod probíhá přímočaře pomocí vzorce (3.14):

$$N(I) = N \cdot X \cdot Y \quad (3.14)$$

Kde  $N(I)$  je očekávaný počet zabitých nebo zraněných,  $N$  je celkový počet obyvatel nacházejících se v zátopové oblasti,  $X$  je podíl populace vystavených riziku úmrtí nebo zranění v důsledku uvažovaného scénáře povodně. Hodnota  $X$  je založena na hodnocení nebezpečí povodně a zranitelnosti území. Konečně  $Y$  je podíl populace, kteří zemřou nebo budou zraněni v důsledku povodně.  $Y$  je založeno na zranitelnosti osob.

Povodňové nebezpečí se počítá podle vzorce (3.15):

$$HR = d \cdot (v + 0,5) + DF \quad (3.15)$$

Kde  $HR$  je rating nebezpečí povodně,  $d$  je hloubka zatopení [m],  $v$  je rychlost průtoku vody [m/s],  $DF$  je faktor trosek (debris factor), který se dosadí z tab. 3.3.

Tabulka 3.3: Faktor trosek  $DF$  pro různé hloubky, rychlosti a dominantní způsob užití území (převzato z [102])

Hloubka [m]	Pastviny/pole	Lesy	Zástavba
0 – 0,25 m	0	0	0
0,25 – 0,75 m	0	0,5	1
$d > 0,75$ anebo $v > 2$	0,5	1	1

Zranitelnost území se vypočítává jako suma hodnocení rychlosti nástupu povodně, povahy území (způsobu využití) a varování před povodní, viz tab. 3.4.

Tabulka 3.4: Zranitelnost území povodněmi (převzato z [102])

Parametr	1 – území s nízkým rizikem	2 – území se středním rizikem	3 – území s vysokým rizikem
Rychlost nástupu	Velmi postupný (mnoho hodin)	Postupný (okolo hodiny)	Rychlé zatopení
Povaha území	Vícepodlažní bydlení	Typické rezidenční bydlení (2 patra); komerční a průmyslová zástavba	Bungalovy, mobilní domy, parky, jednopatrové školy, silně používané cesty, tábořiště apod.
Varování	$skóre = 3 - (P_1 \cdot (P_2 + P_3))$ Kde $P_1$ je % území pokrytého systémem varování, $P_2$ je % území pokrytého systémem včasného varování, $P_3$ je % efektivity reakce na varování		

Zranitelnost osob metodika DEFRA odvozuje z počtu osob u kterých se předpokládá nižší mobilita, ve smyslu omezené nebo chybějící schopnosti se evakuovat vlastními silami, viz rovnice (3.16).

$$Y = \%os_{chro} + \%os_{75+} \quad (3.16)$$

Kde  $Y$  je celkové procento zranitelných osob v populaci,  $os_{chro}$  představuje procento osob trpících chronickým onemocněním a  $os_{75+}$  je procento osob v populaci ve věku 75 let a více.

Výše uvedené vzorce DEFRA předvypočetla pro typické vzdálenosti, hloubky apod. a publikovala ve formě tabulek pro zjednodušení práce, viz [102] str. 26-28.

Uvedený postup je výhodný v tom smyslu, že výsledek je obvykle snadno interpretovatelný. Nevýhodu v postupu lze spatřovat v tom postupu je pouze semikvantitativní. To znamená, že výsledek není



univerzálně použitelný. To může představovat problém, pokud potřebujeme řetěžit metody za sebou (jedna metoda přejímá výsledky druhé metody jako vstup) nebo pro případy, kdy by bylo potřeba provést agregaci rizik v území pro odvození celkové hodnoty rizik.

Z tohoto pohledu univerzálněji použitelný může být model nebezpečí pro lidi jako funkce rychlosti proudění a hloubky zatopení, viz tab. 3.5.

Tabulka 3.5: Zranitelnost území povodněmi (převzato z [102])

$d \cdot (v+0,5)$	St. nebezpečí	Popis
< 0,75	Nízké	Opatrně: mělká zóna zatopení s plynoucí vodou nebo hluboká stojatá voda
0,75 – 1,25	Střední	Nebezpečné pro vybrané skupiny osob (např. děti): Nebezpečí: zóna s hlubokou nebo rychle proudícím tokem
1,25 – 2,5	Značné	Nebezpečné pro většinu obyvatel: Nebezpečí zóna s hlubokým rychle proudícím tokem
> 2,5	Extrémní	Nebezpečné pro všechny: Extrémní nebezpečí: zóna zatopení s hlubokým rychle proudícím tokem

### 3.4 Model škod EDAC

Maiwald a Schwarz v celé řadě svých publikací (viz např. [85]) vyvinuli relativně jednoduchý systém pro hodnocení/predikci škod v důsledku povodní a seismické činnosti. Systém hodnocení pracuje s 5-ti stavy poškození budov označovanými D1 – D5, viz tab. 3.6.

Tabulka 3.6: Stupně poškození budov v důsledku seismické činnosti a povodní (adaptováno z [85])

D	Škody		Seis. (EMS-98)	Povodeň
	Konstrukční	Nekonstrukční		
D1	Ne	Malý	Vlasové praskliny v malém počtu stěn, odpadnutí malých kousků omítky, možný ojedinělý pád uvolněných kamenů z horních částí budov	Průnik vod a znečištění
D2	Ne – malý	Střední	Praskliny ve větším množství stěn, odpadnutí větších částí omítky, částečný kolaps komínů	Malé praskliny v nosných prvcích, vtlačená okna a dveře, kontaminace, nutná výměna rozšiřujících prvků
D3	Střední	Těžké	Velké praskliny ve většině stěn, uvolnění střešních tašek, zlomení komínu na úrovni střechy, selhání jednotlivých nosných prvků	Velké praskliny/deformace v nosných stěnách a sloupech, nutná výměna nosných prvků
D4	Těžké	Velmi těžké	Vážné hroucení stěn, částečné zhroucení střech a podlah	Kolaps nosných stěn/sloupů, nutná výměna nosných prvků budov.
D5	Velmi těžké	Velmi těžké	Úplné nebo skoro úplné zhroucení.	Kolaps budov nebo její podstatné části. Vyžadována demolice.

Zaměření této kapitoly je na povodně, EDAC pracuje jak s povodněmi, tak s následky seismické činnosti v Evropské makroseismické škále EMS-98 [37]. Tato škála je dvanáctistupňová a popisuje jakým způsobem je průběh tohoto jevu pozorován a jaké má následky.

Podrobněji viz kapitola věnovaná *Seismické činnosti*.

Z pohledu výpočtu předpokládaných následků jeví se vychází ze studia dopadů reálných zemětřesení a povodní v území. Prvním krokem pro odhad je odvození zranitelnosti různých typů budov. Zkoumány přitom byly stavební materiály použité během stavby domů. Pro jednotlivé typy stavebních materiálů použitých v budovách je pak určena pravděpodobná třída zranitelnosti A – E (A – velmi citlivé, B – citlivé, C – normální, D – zvýšená odolnost, E – odolné).

Pro povodně jsou odvozovány třídy HW-třída (HW z německého Hoch Wasser, např. HW-A = třída zranitelnosti A pro povodně). Rozložení tříd zranitelnosti podle stavebních materiálů metodiky EDAC je znázorněn na obr. 3.6.

Konstrukční metody resp. typ budovy	Třída zranitelnosti				
	HW-A	HW-B	HW-C	HW-D	HW-E
Budovy z nepálených cihel	○				
Montované stavby	○	○			
Dřevo stavby		○			
Zděné budovy			●		
Železobetonové konstrukce				○	
Železobeton a zděné budovy v protipovodňové úpravě (odolné proti vlivům povodní)					○

○ nejpravděpodobnější třída zranitelnosti, ● dominantní třída zranitelnosti pro stavební materiál ve zkoumaných regionech, — možný rozsah, ..... pouze malá část stavebních konstrukcí

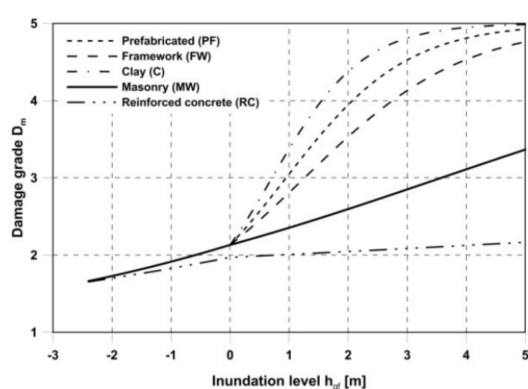
Obrázek 3.6: Klasifikace typů budov podle předpokládané zranitelnosti povodněmi (převzato z [60])

Na základě vyhodnocení reálných škod vzniklých na majetku lze konstruovat funkce umožňující mapovat jednotlivé charakteristiky povodně, jako např. výšku zatopení budovy, na úroveň předpokládaných škod. Maiwald a Schwartz [85] se zaměřili především na charakteristiku výšky zatopení v metrech a jejího vlivu na stabilitu různých typů stavebních konstrukcí (viz obr. 3.7a) a také na specifickou energii vyvíjenou tlakem toku vody vyvíjené na budovu (viz obr. 3.7b).

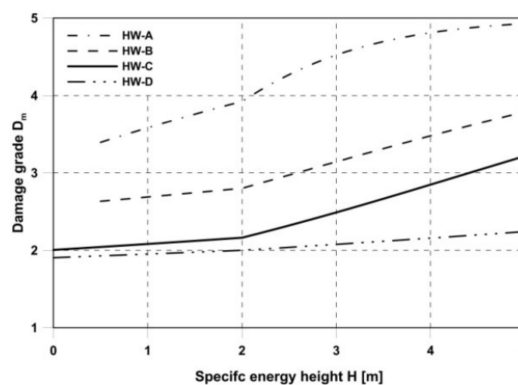
Křivky z obr. 3.7 lze zobecnit a vyjádřit pomocí vzorce (3.17).

$$D_m = 2 \tanh(A \cdot h_{EG} + B) + 3 \quad (3.17)$$

Kde  $D_m$  je odhadovaná třída škod,  $h_{EG}$  je úroveň zatopení nad terénem [m],  $A$  a  $B$  jsou parametry funkce podle typu budovy. Na obr. 3.7b je znázorněn také alternativní model, beroucí v úvahu speci-

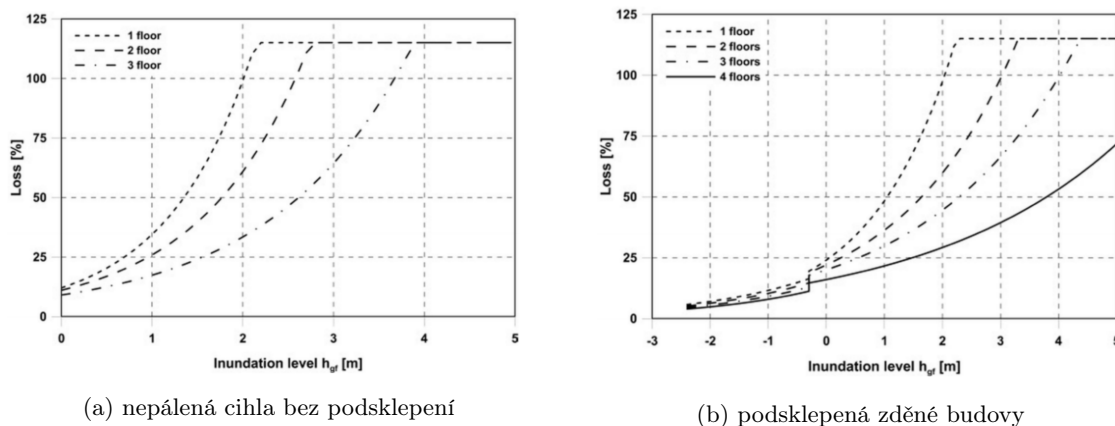


(a) škody jako funkce výšky zatopení [m]



(b) škody jako funkce specifické energie vyvinuté výškou zatopení [m]

Obrázek 3.7: Křivky závislosti stupně poškození na výšce zatopení (vlevo), specifické energie (výška zatopení a rychlost proudění) (převzato z [85])



Obrázek 3.8: Závislost úrovně škod na výšce zatopení budovy, podle použitého stavebního materiálu a počtu podlaží (převzato z [58])

fickou energii působení zatopení na budovu jako funkci výšky zatopení a rychlosti proudění. Výpočet se pak provádí podle vzorců (3.18) a (3.19).

$$H = h_{EG} + \frac{v_{fl}^2}{2g} \quad (3.18)$$

$$D_m = 2 \tanh(A(H - 2) + B) + 3 \quad (3.19)$$

Kde  $v$  je rychlost proudění vod [m/s] a  $g$  je gravitační konstanta.

Parametry  $A$  a  $B$  odvozené z dat pro SRN je možno nalézt v technické zprávě [59]. Alternativní pohled na škody představovaný rovnicemi (3.18) a (3.19) může být významný pro situace, kdy úroveň škod není dobře charakterizována výškou zatopení samotnou – což je typické např. pro tzv. bleskové povodně a také vlny tsunami (byť tyto vlny nejsou předmětem zájmu řešeného projektu).

Maiwald a Schwarz odvodili také základní křivky pro předpokládanou úroveň ztrát v % podle typu konstrukčního materiálu a počtu podlaží, viz obr. 3.8.

Všimněte si, že na obr. 3.8 je velikost předpokládaných škod v procentech uvedena v intervalu 0 - 125 %. Hodnoty nad 100 % můžeme interpretovat jako náklady na úplnou náhradu poškozené budovy (tedy totální ztráta budovy), ovšem s tím, že navíc mohou existovat další náklady spojené např. se stavební přípravou pozemku, odklizení sutin původní budovy apod. a tyto další náklady mohou být poměrně vysoké.

Matematicky lze křivky vyjádřit jako ve vzorci (3.20).

$$L(h_{EG}) = A \cdot e^{Bh_{EG}} \quad (3.20)$$

Kde  $L$  je funkcí škod, parametry  $A$  a  $B$  je pak možno vycíst ve zprávě [59]. Pro EDAC model škod existují i aplikační studie, viz např. [110].

Z hlediska aplikace je potřeba brát zřetel na to, že modely jsou vždycky závislé na datech, na základě kterých jsou vytvořeny. Dobře je tato situace viditelná na obr. 3.6, kde zranitelnost budov působením povodně je uváděna jako možný rozsah zranitelnosti. Skutečná zranitelnost a z ní vyplývající výše škod na budově v případě, že bude vystavena působení povodně bude ve skutečnosti záležet také na dalších faktorech jako je např.:

- stáří budovy
- její technický stav
- jakým způsobem byla
- jaká opatření byla realizována pro ochranu budovy před účinky povodně, popř. zmírnění škod
- apod.

Modely reprezentované obr. 3.7 a 3.8 jsou tedy přesné pouze natolik, nakolik odpovídá v posuzovaném území skladba budov skladbě budov v oblasti, která posloužila jako podklad pro vytvoření modelu. Veškeré odlišnosti se pak projeví ve zvýšené chybě provedené výpočtu modelu v posuzovaném území.

Výše uvedené je ale obecnou vlastností obdobných modelů.



### Shrnutí

Povodně jsou jednou z nejčastěji se vyskytujících událostí, která má potenciál postihnout rozsáhlá území. Z tohoto důvodu existuje celá řada modelů a postupů, které mohou pomoci s odhadem škod. Modely jsou obvykle odvozovány ze škod na budovách, životech a zdraví povodní z minulosti. Jedná se tedy o empirické modely tvořené z informací o charakteristikách povodně a škodách, které vyvolala.

Jako klíčový údaj se jeví z pohledu poškození zejména výška zatopení, v případě možnosti utonutí obyvatelstva jsou pak důležité jak výška tak rychlost proudu, kterému bude ohrožené obyvatelstvo vystaveno.

Pro odhad škod jsou pak potřeba podrobné informace o charakteristice zástavby jako např. způsob využití (typ budovy). Model škod EDAC pak pro svou funkci vyžaduje znalost v budově použitých stavebních konstrukcí jako podkladu pro modelování škod.

Vzhledem k rozšířenosti povodní jako jevu je možno pro modelování použít s úspěchem výpočetní techniku - především GIS.

Povodeň jako takovou lze modelovat, avšak pro účely plánování může být jednodušší použití již hotových zátopových oblastí jako polygonu který v kombinaci s 3D reliéfem krajiny může posloužit pro odvození výšky zatopení jako podkladu pro odhad škod.



### Kontrolní otázky

1. Jaké metody můžeme použít pro odhad škod povodněmi?
2. Které charakteristiky povodní jsou nejdůležitější z hlediska vzniku škod?
3. Lze odhadnout zranitelnost budov povodněmi? Pokud ano, jakým způsobem se postupuje?
4. Je možno modely používat bez omezení v různých lokalitách nebo existují nějaká omezení (případně jaká omezení je potřeba zohlednit)?
5. Jaké jsou hlavní veličiny, které je potřeba zohlednit při úvahách a stabilitě lidí v proudu vody?
6. Co je to inflace a jaké je její působení v oblasti modelování škod?



### Příklad

Vyberte si malou zastavěnou oblast na mapě, kterou dobře znáte. Předpokládejte zatopení této oblasti. Pokuste se spočítat škody, které by tímto zatopením vznikly.

## Kapitola 4

# Křivky poškození



### Průvodce studiem

V minulé kapitole jsme se podívali na způsob, jakým je možno odhadnout škody pro povodně. Postup uvedený v předchozí kapitole je ale ve skutečnosti aplikací obecnějšího přístupu k modelování škod pomocí *funkcí fragility* a *funkcí zranitelnosti*. V této kapitole se proto zaměříme na tyto dva obecné přístupy.

### Po prostudování této kapitoly budete znát

- znát základní distribuce pravděpodobnosti používané pro modelování následků
- co jsou funkce fragility a
- jak se liší od funkce zranitelnosti.



### Čas pro studium

Tato kapitola je dosti teoretická. Čas pro studium se tak může výrazně lišit podle toho, jak jste na tom se základními znalostmi statistiky a teorie pravděpodobnosti. Pokud Vám výše uvedené pojmy nic neříkají připravte se na to, že budete muset konzultovat své poznámky z předmětu *Statistika*, popř. použít studijní literaturu, která Vás provede potřebnými rozděleními pravděpodobnosti a jejich významem.

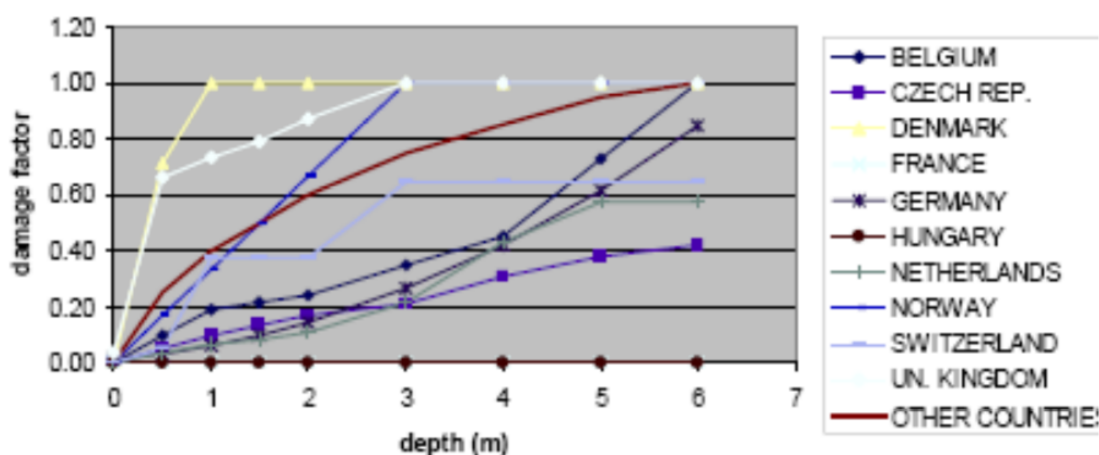
Existuje velké množství *křivek poškození*. Křivky se odvozují z empiricky shromážděných údajů zachycující škody následnou analýzou škod. Jednou z prvních škodních událostí, pro kterou byly takové křivky navrhovány byly právě povodně, kterým jsme se věnovali v předchozí kapitole. Ve skutečnosti jsme tak už s křivkami poškození už pracovali, jedná se např. o křivky znázorněné na obr. 3.8, jenom jsme nevěděli, že se jedná o křivku poškození.

Pro tento typ křivek je typické, že pro svou konstrukci vyžadují velké dat a to poměrně dosti kvalitních, aby výsledek bylo možné přenášet be problémů do jiných lokalit než těch, na základě kterých byla taková křivka navržena. Takové úpravy nejsou předmětem našeho zájmu v tomto předmětu, zejména z toho důvodu, že na to nemáme prostor.

Dobře je možné tuto situaci demonstrovat na křivkách závislosti faktoru škod na hloubce zatopení na obr. 4.1. Ačkoliv jsou všechny křivky na obr. 4.1 konstruovány pro rezidenční bydlení a jeho vybavení, průběh křivky i celková předpokládaná výše škod se velmi liší.

Všechny tyto křivky jsou přitom vytvořeny správným způsobem, na základě validních dat a poskytují svým uživatelům cenné informace. Jak je to možné.

Abychom se mohli dozvědět něco málo o způsobu konstrukce a omezeních, která jsou s tím spojena musíme se nejprve zaměřit na rozdělení pravděpodobnosti, která k tomuto účelu bývají používána nejčastěji.



Obrázek 4.1: Křivky závislosti hloubky zatopení a faktoru poškození pro rezidenční bydlení a jeho vybavení (převzato z [36])

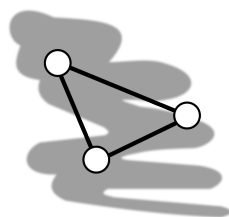
## 4.1 Rozdělení pravděpodobnosti

V češtině se kromě pojmů *rozdělení pravděpodobnosti* používají také synonyma *rozložení*, popř. *distribece pravděpodobnosti*. Technicky se jedná o pravidlo, podle kterého se určitému sledovanému náhodnému jevu přiřazuje určitá pravděpodobnost. Rozdělení pravděpodobnosti získáme tak, že přiřadíme každé diskrétní hodnotě daného náhodného jevu (nebo spíše intervalu hodnot) pravděpodobnost.

V kontextu tohoto předmětu, může být takovým jevem výše aktuálního průtoku v řece. Jednotlivé výše průtoku se budou vyskytovat méně často než jiné.

Pravděpodobnost, že diskrétní náhodná veličina  $X$  bude mít hodnotu  $x$  můžeme matematicky zaznamenat  $P[X = x]$ . Jelikož náhodný pokud má vždy pouze jeden výsledek, musí platit (4.1), že součet pravděpodobností všech možných hodnot náhodných jevů je vždy roven 1.

$$\sum_x P[X = x] = 1 \quad (4.1)$$



### Statistika

Tento text nemá ambici nahrazovat komplexnější pojetí tématu *pravděpodobnosti spojitéch funkcí* tak, jak jsou obvykle vyučovány v předmětech věnovaných *teorii pravděpodobnosti a statistice*. V případě potřeby proto konzultujte své poznámky popřípadě dostupnou literaturu k těmto předmětům.

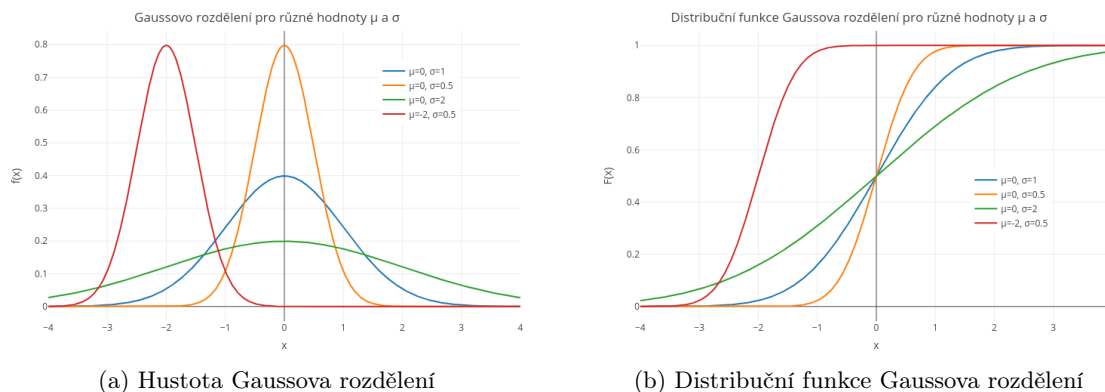
V souvislosti s funkcemi fragility a zranitelnosti se nepoužívají všechny všechny druhy rozdělení pravděpodobnosti. Tyto křivky jsou nejčastěji odvozovány z následujících druhů rozdělení:

- normální rozdělení (Gaussovo rozdělení)
- lognormální rozdělení
- uniformní rozdělení
- Gumbelovo rozdělení (log-Weibullovo, dvojitě exponenciální rozdělení)

**Funkce hustoty pravděpodobnosti** spojité náhodné proměnné je funkcí umožňující v kterémkoliv svém bodě zjistit relativní četnost hodnoty tohoto prvku ke všem možným vzorkům.

Pro hustotu pravděpodobnosti neplatí, že by musela nutně být spojitá. Platí ale že hustota pravděpodobnosti  $\rho(x)$  pro celý definiční obor veličiny  $X$ :

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx = 1 \quad (4.2)$$



(a) Hustota Gaussova rozdělení

(b) Distribuční funkce Gaussova rozdělení

Obrázek 4.2: Hustota a distribuční funkce Gaussova rozdělení pro různé hodnoty střední hodnoty ( $\mu$ ) a rozptylu ( $\sigma^2$ )

*Kumulativní funkce hustoty pravděpodobnosti* (někdy též označované jako distribuční funkce spojitě veličiny) je pak spojitou stoupající funkcí, umožňující definovat pravděpodobnost toho, že pravděpodobnost výskytu hodnoty náhodné veličiny nepřekročí specifikovanou hodnotu  $x$ .

Právě funkce hustoty a kumulativní funkce hustoty pravděpodobnosti se určují samostatně pro různé druhy rozdělení pravděpodobnosti.

#### 4.1.1 Gaussovo rozdělení

*Gaussovo rozdělení* častěji označované jako *normální rozdělení* je pravděpodobně nejznámějším typem rozložení pravděpodobnosti. Její obecné rozložení se vypočte podle vzorce (4.3) a obvykle je označováno jako  $N(\mu, \sigma^2)$ , kde  $\mu$  je střední hodnota a  $\sigma^2$  rozptyl veličiny.

Hodnota  $N(0, 1)$  odpovídá normalizované podobě rozložení. Pro tuto situaci, lze vzorec (4.3) zjednodušit do podoby (4.4). Tato forma rozdělení bývá označována jako *normované*, popř. *standardizované normální rozdělení*. Jeho hlavní výhodou je to, že jeho hodnoty jsou jednoduše odečíst z tabulek.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (4.4)$$

Kumulativní funkci hustoty pravděpodobnosti je možno vyjádřit vzorcem (4.5).

$$P[X \leq x] = F_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4.5)$$

Graficky je možno funkce  $f(x)$  a  $F(x)$  znázornit jako na obr. 4.2a a 4.2b.

#### 4.1.2 Lognormální rozdělení

Log-normální rozdělení, někdy také označované jako logaritmicko normální rozdělení je rozdělení náhodné veličiny  $x$  jejíž logaritmus je normálně rozdělen. V literatuře se objevují také alternativní názvy jako např. Galtonovo, Gibratovo nebo Cobb-Douglasovo rozdělení pravděpodobnosti.

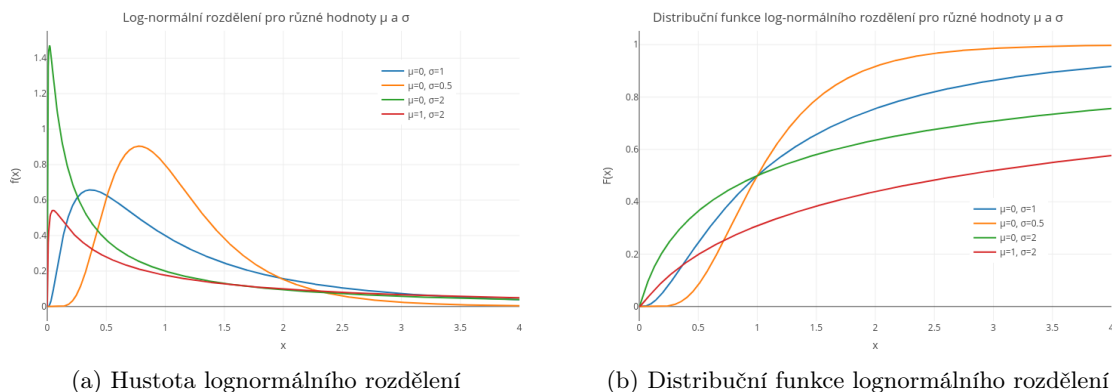
Matematické vyjádření můžeme dostat jednoduchou úpravou vzorce (4.3) do podoby vzorce (4.6). Kumulativní funkci hustoty lze spočítat pomocí vzorce (4.7).

$$f_x(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.6)$$

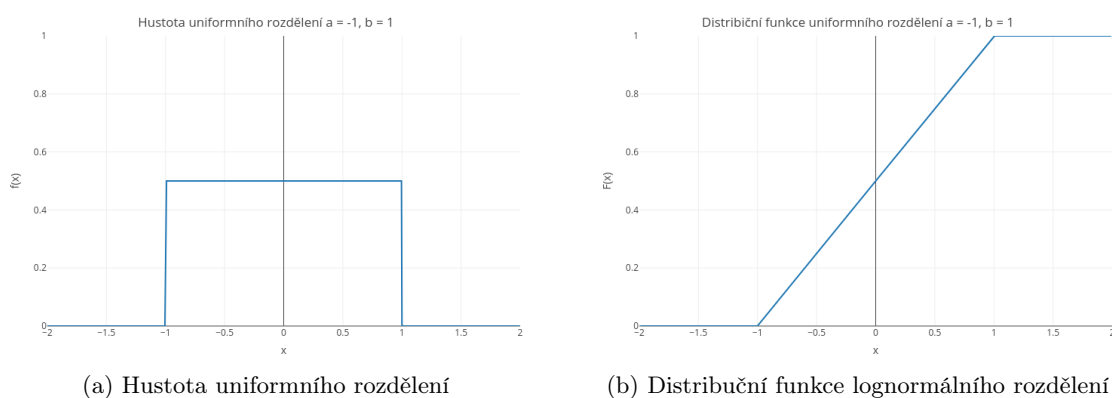
$$F(x|\mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4.7)$$

Kde  $\Phi$  je kumulativní distribuční funkce normálního rozdělení,  $\mu$  je střední hodnota a  $\sigma^2$  rozptyl.

Graficky je hustota logaritmicko-normálního rozdělení znázorněna na obr. 4.3a a kumulativní distribuční funkce pak na obr. 4.3b.



Obrázek 4.3: Hustota a distribuční funkce logaritmicke-normálního rozdělení pro různé hodnoty střední hodnoty ( $\mu$ ) a rozptylu ( $\sigma^2$ )



Obrázek 4.4: Hustota a distribuční funkce uniformního rozdělení pro hraniční hodnoty  $a = -1$  a  $b = 1$

### 4.1.3 Uniformní rozložení

**Uniformní rozložení** pak odpovídá plynulému rozložení hodnot mezi hranicemi  $a$  a  $b$  se stejnou pravděpodobností. Jeho funkce hustoty pravděpodobnosti mohou být vyjádřeny pomocí vzorců (4.8) a distribuční funkce (4.9), graficky pak jako na obr. 4.4.

$$f_x(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < a \\ \frac{1}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{pro } x > b \end{cases} \quad (4.8)$$

$$F_x(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{pro } x > b \end{cases} \quad (4.9)$$

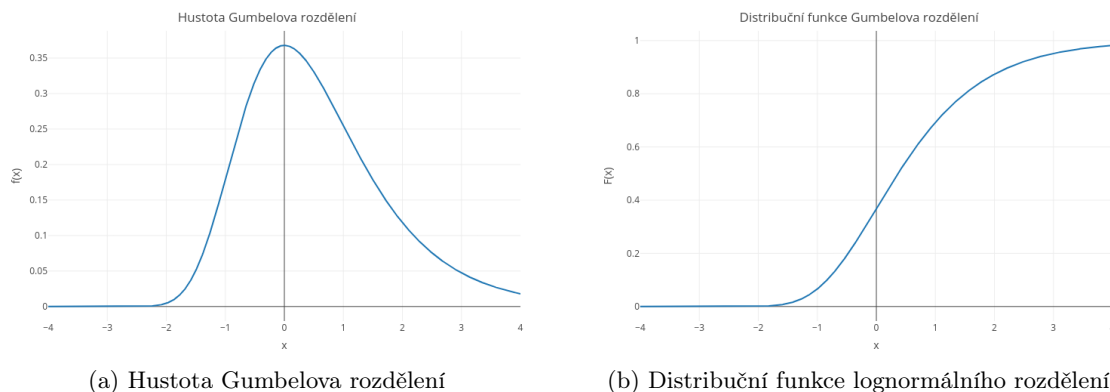
### 4.1.4 Gumbelovo rozdělení

Pro některé další matematické operace se pak používají také jiná rozdělení Gumbelovo rozložení pravděpodobnosti se vypočítá pomocí vzorce (4.10) a distribuční funkce (4.11), v grafické podobě pak je znázorněno na obr. 4.5.

$$f_x(x) = \frac{1}{\beta} e^{-(z+e^{-z})} \quad (4.10)$$

$$F_x(x) = e^{-e^{-z}} \quad (4.11)$$





Obrázek 4.5: Hustota a distribuční funkce Gumbelova rozdělení

Kde  $z$  se vypočítá dle (4.12).

$$z = \frac{x - \mu}{\beta} \quad (4.12)$$

Gumbelovo rozdělení je také známo pod názvy log-Weibullovo rozdělení a dvojitě exponenciální rozdělení.

Jak je vidět z obr. 4.5 je rozdělení asymetrické, tím se také liší od ostatních rozdělení pravděpodobnosti, která jsou představena v této kapitole.



### Experimentování s rozděleními

Zkoumání vlastností rozdělení pravděpodobnosti nemusí být zrovna jednoduchou záležitostí, z tohoto důvodu byl do přílohy 3 těchto skript, přidány segmenty kódu pro analytický nástroj R, umožňující Vám relativně jednoduše měnit jednotlivé parametry v této kapitole představených rozdělení a sledovat, jakým způsobem se mění funkce hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce.

## 4.2 Funkce fragility

Koncept *fragility* byl poprvé použit v 80. letech pro popis závislosti frekvence selhání komponent jaderné elektrárny na maximálním zrychlení povrchu (PGA)<sup>1</sup> v průběhu zemětřesení (Kenedy et al [52]). V současnosti se ale používá obecnější vyjádření funkce fragility (Porter [79]): *jako matematické funkce vyjadřující pravděpodobnost nežádoucího účinku v závislosti na zvoleném měřítku excitace prostředí*. Excitaci prostředí pak chápeme ve smyslu průvodního efektu modelovaného scénáře, tedy např. výška zatopení, nárazová rychlost větru v průběhu vichřice apod.

Alternativní definice pak chápe fragilitu jako *kapacity systému odolat nežádoucímu účinku* (Porter [79]): *funkce fragility reprezentuje kumulativní funkci distribuce kapacity systému (prvku) odolat nežádoucímu limitnímu stavu*.

Funkci fragility lze matematicky vyjádřit pomocí lognormální kumulativní funkce distribuce pravděpodobnosti následovně (4.13):

$$F_d(x) = P[D \geq d | X = x] = \Phi\left(\frac{\ln \frac{x}{\theta_d}}{\beta_d}\right) \quad (4.13)$$

Kde  $d \in 1, 2, \dots, N_D$  a  $P[A|B]$  e podmíněná pravděpodobnost že jev  $A$  je pravdivý za předpokladu, že  $B$  je pravdivé,  $D$  je stav poškození hodnocené komponenty zatížený nejistotou nabývající hodnot  $0, 1, 2, \dots, n_D$ , kde  $D = 0$  odpovídá stavu bez poškození,  $D = 1$  prvním stavu poškození,  $D = 2$  druhému stavu poškození atd.

<sup>1</sup>PGA [22] je rovno maximálnímu zrychlení povrchu, které nastalo v průběhu zemětřesení v daném místě. PGA je rovno amplitudě nejvyšší absolutní akceleraci zaznamenané akcelerometrem v průběhu zemětřesení.

$d$  je určitá hodnota  $D$ ,  $n_D$  je celkový počet možných stavů poškození,  $X$  je stav excitace prostředí zatížený nejistotou,  $x$  pak konkrétní hodnota  $X$ , parametry  $\theta_d$  a  $\beta_d$  pak jsou medián a logaritmická standardní odchylka kapacity systému danému stavu poškození  $d$  odolat spočtená podle (4.14) a (4.15).

$$\theta = e^{\mu_{\ln X}} \quad (4.14)$$

$$\beta = \sigma_{\ln X} \quad (4.15)$$

Pokud jsou k dispozici experimentální data popisující *skutečnou úroveň excitace*, při které systém selhává, potom je možné parametry  $\theta$  a  $\beta$  spočítat pomocí vzorců (4.16) a (4.17). Tento typ dat je někdy označován jako *data typu A*.

$$\theta = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \ln r_i \quad (4.16)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} \left( \ln \frac{r_i}{\theta} \right)^2} \quad (4.17)$$

Kde  $n_i$  je počet vzorků, přitom  $n_i \geq 2$ ,  $i$  je index vzorku, kde  $i \in \{1, \dots, n_i\}$ ,  $r_i$  je úroveň excitace, při které vzorek selhal.

Běžnější, než výše uvedená, je ale situace, kdy máme k dispozici datovou sadu, v rámci kterých minimálně jeden vzorek neselhal, minimálně jeden vzorek selhal a je známa hraniční úroveň excitace (peak excitation), které byl vzorek vystaven ale nikoliv skutečná úroveň excitace, při které vzorek selhal. Taková data bývají označována jako *ohraničující* (bounding failure data), popř *data typu B*.

Vzorky jsou seřazeny podle maximální úrovně excitace, které byly vystaveny. Za předpokladu, že funkce fragility je přiměřeně podobná lognormální kumulativní funkci distribuce pravděpodobnosti je možno parametry  $\theta$  a  $\beta$  spočítat. Notace vzorců je podobná jako v případě (4.16) a (4.17), navíc je však pracováno s  $f_i$  značící počet vzorků v souboru  $i$ , které selhaly,  $f_i \in \{0, 1, \dots, n_i\}$ .

Jednou z cest, jak odhadnout úroveň  $\theta$  a  $\beta$  je [79] nalézt taková  $\theta$  a  $\beta$ , která mají největší pravděpodobnost, že povedou na pozorovaná data. Při jakékoliv úrovni  $r_i$  existuje pravděpodobnost, že kterýkoliv vzorek selže, je dán distribuční funkcí lognormálního rozdělení:

$$p_i = \Phi \left( \frac{\ln \frac{r_i}{\theta}}{\beta} \right) \quad (4.18)$$

Za předpokladu, že jakékoliv dva vzorky jsou podmíněně nezávislé na excitaci lze odhadnout počet vzorků v souboru  $i$ , které selhaly jako hodnotu náhodné proměnné s binomickým rozložením pravděpodobnosti.

Rovnice (4.19) [79] udává pravděpodobnost pozorování selhání  $f_i$  ve vzorcích  $n_i$  s pravděpodobnosti  $p_i$  za každé selhání.

$$P[F_i = f_i] = \frac{n_i!}{f_i!(n_i - f_i)!} p_i^{f_i} (1 - p_i)^{n_i - f_i} \quad (4.19)$$

U binomického rozložení je možno nalézt parametry  $\theta$  a  $\beta$ , které maximalizují pravděpodobnost pozorování všech dat  $\{n_1, f_1; n_2, f_2; \dots\}$  při dané úrovni excitace  $r_i \in \{r_1, r_2, \dots\}$ . Pravděpodobnost je dána součinem pravděpodobností (4.19), násobená napříč všemi soubory. Tedy nalézt  $\theta$  a  $\beta$ , která maximalizují  $L(\theta, \beta)$ , viz (4.20).

$$L(\theta, \beta) = \prod_{i=1}^{m_i} P[F_i = f_i] \quad (4.20)$$

Pro velká  $n_i$  pak platí, že binomické rozložení aproximuje normální rozložení. V takovém případě je parametry možno odvodit minimalizací rozdílů mezi pozorovanými daty a idealizovanou funkcí fragility:

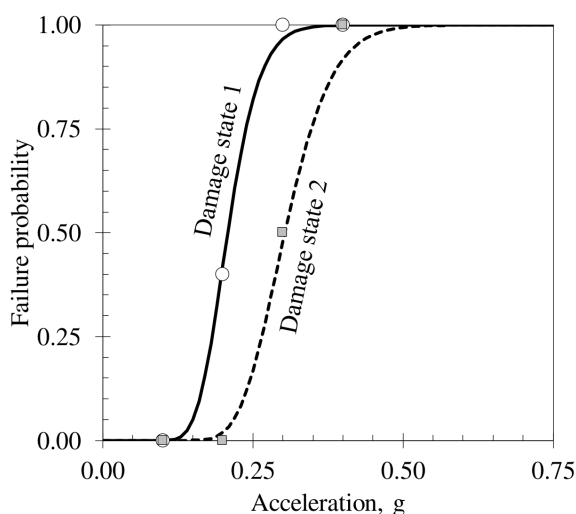
$$\epsilon^2(\theta, \beta) = \sum_{i=1}^{m_i} n_i \left( p_i - \frac{f_i}{n_i} \right)^2 \quad (4.21)$$

Z praktického hlediska vzorec (4.21) nepředstavuje nic jiného výpočet čtverce chyb.

Výpočet je možné také dále upravovat, např. pro kompenzaci malého, popř. zcela reprezentativní sady vzorků, pro některé druhy biasu apod. Podrobnosti o způsobu použití a také odkazy na další literární prameny na toto téma je možno nalézt v Porter [79].

Příklad funkce fragility je znázorněn na obr. 4.6. Jak je patrné z obrázku, je funkce fragility konstruována vždy pro specifické stavy poškození. Proto je tak důležité, aby datové sady používané pro odvozování těchto křivek byly dostatečně reprezentativní.

Obr. 4.6 také naznačuje jistý problém, co kdyby funkce stavu poškození 1 a 2 se křížily? Pokud zachováme základní princip patrný z obr. 4.6, že stavy poškození s vyšším číslem odpovídají vyššími stupni poškození. Znamenalo by to, že zvolené měřítko excitace (na obr. 4.6 zrychlení  $g$ ) není schopna objektivně rozlišit mezi takovými stavy. Důvodem může být, že dané měřítko není vhodné, nebo nejsme schopni jej dostatečně přesně měřit.

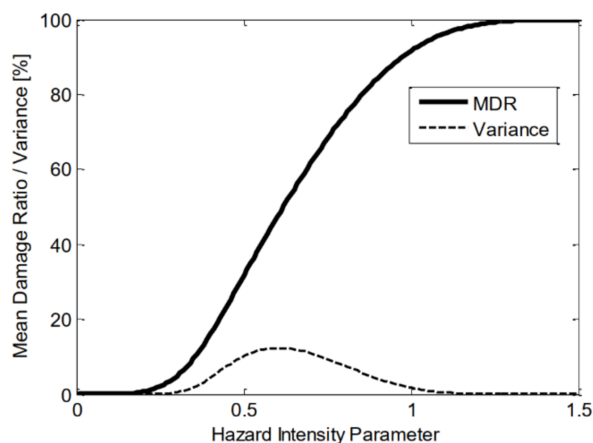


Obrázek 4.6: Příklad funkce fragility pro různé stavy poškození (převzato z Porter [79])

### 4.3 Funkce zranitelnosti

Zranitelnost je možno definovat stylově podobně jako fragilitu (Porter [79]): *funkcí zranitelnosti rozumíme ztrátu vyjádřenou jako funkce excitace prostředí*. Zranitelnost tedy měří ztrátu, zatímco fragilita měří pravděpodobnost.

V rámci projektu CAPRA byl vyvinut software pro odvozování křivek zranitelnosti na základě zadání několika základních parametrů, viz [43]. Struktura křivek vypadá podobně jako na obr. ??.



Obrázek 4.7: Příklad funkce zranitelnosti (převzato z [43])

Matematicky lze vypočítat funkci následovně:

$$E_{MDR}(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq X_0 \\ E_{MDR_{max}}(1 - E_{MDR}(x')) \left(\frac{x}{x'}\right)^\rho & \text{pro } X_0 < x < X_f \\ E_{MDR_{max}} & \text{pro } x \geq X_f \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{MDR}(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq X_0 \\ \frac{\sigma_{MDR_{max}} x^{r-1} (1-x)^{s-1}}{MDR(x)^{r-1} (1-MDR(x))^{s-1}} & \text{pro } X_0 < x < X_f \\ 0 & \text{pro } x \geq X_f \end{cases} \quad (4.23)$$

$$s = \frac{r-1}{E_{MDR}(x)} - r + 2 \quad (4.24)$$

Kde  $E_{MDR}(x)$  je očekávaná **mean damage ratio (MDR)** funkce, MDR přitom je průměrná míra škod,  $x$  představuje intenzitu nebezpečí asociovanou s uvažovaným nebezpečím,  $X_0$  je intenzita nebezpečí při které se začínají objevovat škody,  $E_{MDR_{max}}$  je maximální hodnota  $E_{MDR}(x)$ . Z výše uvedeného lze dovodit, že hodnota  $E_{MDR_{max}}$  musí nabývat hodnoty v intervalu  $<0; 100>$  %.

$E_{MDR}(x')$  je známá hodnota očekávané MDR funkce při intenzitě  $x'$ . I tato veličina má smysl pouze v intervalu  $<0; 100>$  %.  $\rho$  je parametr určující průběh funkce před a po intenzitě  $x'$ . Velmi často se jako základní hodnota používá  $\rho = 2$ .  $X_f$  je hodnota intenzity, při které je poškození úplné, a nemůže tak dále růst při dalším zvyšování intenzity nebezpečí.

$\sigma_{MDR}(x)$  je rozptyl MDR funkce,  $\sigma_{MDR_{max}}(x)$  je pak maximální rozptyl MDR funkce. Doporučovaná hodnota se obvykle pohybuje v intervalu 5 – 25 %.  $r$  je faktor vzhledu zvonové funkce popisující rozptyl. Doporučovaná je  $r = 2$ .  $s$  je pak korekční faktor definovaný podle 4.24.



#### Použití křivek zranitelnosti

funkce zranitelnosti jsou základním nástrojem kterým lze zavést následky např. do mapování rizik. Ke křivce zranitelnosti je potřeba „pouze“ namapovat výslednou hodnotu poškození na metriku používanou v rámci mapování a výsledek agregovat pro dané území jako celek.



#### Shrnutí

Funkce fragility a zranitelnosti jsou dvěma funkcemi, které nám umožňují kvantifikovat dopady mimořádných událostí na jednotlivé objekty. Funkce fragility umožňují kvantifikovat pravděpodobnost dosažení škodního stavu za dané intenzity jevu (např. výše zatopení v případě povodní, nebo **PGA** pro zemětřesení). Funkce zranitelnosti proti tomu sleduje průměrnou výši škod v závislosti na působení jevu.

Odvozování křivek probíhá obvykle analýzou empirických dat získaných z minulých mimořádných událostí stejného druhu. Křivky se odvozují z předpokládaných vlastností statistického souboru. Většinou se předpokládá lognormální rozdělení veličiny.



#### Kontrolní otázky

1. Jaký je rozdíl mezi daty typu A a B?
2. Jaké je nejpoužívanější rozdělení pro odvozování křivek fragility?
3. A jaké pro křivky zranitelnosti?
4. Vraťte se k obr. 4.1 - o jaké křivky se technicky jedná?
5. Jaký je rozdíl mezi fragilitou a zranitelností?
6. Co znázorňuje hustota rozdělení pravděpodobnosti a co distribuční funkce?

## Kapitola 5

# Větrná smršť



### Průvodce studiem

V této kapitole se zaměříme na možnosti odhadu škod způsobených větrem v rámci různých typů vichřic, větrných smrští apod.

### Po prostudování této kapitoly budete znát

- způsoby měření síly větru
- základní aspekty větrných smrští způsobující škody
- jakým způsobem je možno odhadnout poškození objektů



### Čas pro studium

Tato kapitola je relativně krátká, její prostudování Vám zabere hodinu až dvě.

Označení větrná smršť ve skutečnosti není korektní - jedná se o „lidové“ označení situace, kdy dojde k prudkému zesílení větru s následkem vzniku škod. Z hlediska meteorologie používáme obvykle Beaufortovu škálu. Tato škála byla publikována 30. letech 19. století pro námořní plavbu, v 50. letech 19. století pak byla adaptována pro použití i v jiných podmínkách.

Původní škála byla dvanáctistupňová, v roce 1946 byly do škály doplněny stupně 13 - 17. Tyto stupně jsou ale určeny pro speciální případy, jako jsou třeba tropické bouře. **World Meteorological Organization (WMO)** v posledních doporučení [106] pracuje ale v maximálně 12-tým stupněm. Pro speciální typy bouří se pak v praxi používají samostatné škály, kterými se v této kapitole budeme věnovat také.

Beaufortova škála v její aktuální podobě je v tab. 5.1. Vznik prvních škod působením větru je možno očekávat od pátého stupně Beaufortovy škály - *čerstvý vítr*. Z tohoto důvodu je v tabulce tento stupeň výrazně oddělen.

Tabulka 5.1 popisuje empiricky pozorovanou závislost vyjádřenou vzorcem (5.1).

$$v = 0,836B^{3/2} \quad (5.1)$$

Kde  $v$  je rychlost větru [m/s] a  $B$  je stupeň Beaufortovy škály. Z výše uvedeného také vyplývá, že Beaufortova škála není lineární. Nelinearita je přitom základní vlastností prakticky všech obdobně konstruovaných škál.

Pro hurikány a tropické bouře se používá Saffir–Simpsonova stupnice (**Saffir–Simpson hurricane wind scale (SSHWS)**). Tato stupnice rozlišuje pět kategorií, přičemž první (nejmírnější) rychlostí větru odpovídá přibližně stupni 12 na Beaufortově stupnici. Pozor zbývající stupně si na těchto stupnicích ale neodpovídají, viz tab. 5.2.

Podrobnější popis škod [84]:

Tabulka 5.1: Beaufortova škála síly větru (adaptováno z [103])

st.	rychlost [m/s]	označení	popis
0	0 - 0,2	bezvětří	kouř stoupá svisle vzhůru
1	0,3 - 1,5	vánek	kouř nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje
2	1,6 - 3,3	větřík	vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje
3	3,4 - 5,4	slabý vítr	listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory
4	5,5 - 7,9	dostí čerstvý vítr	vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi
5	8,0 - 10,7	čerstvý vítr	hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají
6	10,8 - 13,8	silný vítr	pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, používání deštníku se stává obtížným
7	13,9 - 17,1	prudký vítr	pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná
8	17,2 - 20,7	bouřlivý vítr	láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná
9	20,8 - 24,4	vichřice	vítr působí menší škody na stavbách (strhává komíny, tašky ze střechy)
10	24,5 - 28,4	silná vichřice	na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a poškozují domy
11	28,5 - 32,6	mohutná vichřice	rozsáhlé zpusťování plochy
12	≥ 32,7	orkán	ničivé účinky odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami

Tabulka 5.2: Saffir–Simpsonova stupnice (adaptováno z [84])

kategorie	rychlost [m/s]	škody
1	33 - 42	velmi nebezpečný vítr způsobí škody
2	43 - 49	extrémně nebezpečné větry způsobí rozsáhlé škody
3	50 - 58	nastanou devastující škody
4	58 - 70	nastanou katastrofické škody
5	≥ 70	nastanou katastrofické škody

*Kategorie 1* - poškozené střechy, šindele, obklady, popř. okapy montovaných domů. Lámání velkých větví stromů a mělce zakořeněné stromy mohou být vyvráceny. Rozsáhlé poškození elektrického vedení a stožárů pravděpodobně způsobí výpadky elektrické energie, které mohou trvat několik dní.

*Kategorie 2* - silné poškození střech a stěn montovaných domů. Mnoho mělce zakořeněných stromů se zlomí nebo vyvrátí i s kořeny - s možností zablokování cest. Je očekáván takřka úplný výpadek elektrické energie, který může trvat dny až týdny.

*Kategorie 3* - velké poškození, popř. odnesení střechy. Mnoho stromů se zlomí nebo vyvrátí i s kořeny a zablokuje cesty. Elektrická energie a přívod vody nebude dostupný několik dní až týdnů po odeznění bouře.

*Kategorie 4* - montované domy mohou být silně poškozeny včetně ztráty významné části střechy a nebo části obvodových stěn. Většina stromů se zlomí nebo vyvrátí. Stožáry elektrického vedení budou shozeny. Spadané stromy a sloupky elektrického vedení způsobí izolaci některých rezidenčních oblastí. Výpadek proudu bude trvat týdny až měsíce. Většina postiženého území nebude obyvatelná týdny až měsíce.

*Kategorie 5* - vysoké procento montovaných staveb bude zničeno, s celkovým zhroucením konstrukce střechy a obvodových stěn. Spadané stromy a stožáry elektrického vedení způsobí izolaci některých rezidenčních oblastí. Výpadek proudu bude trvat týdny až měsíce. Většina postiženého území nebude obyvatelná týdny až měsíce.

Fujitova stupnice (někdy též nazývaná F-stupnice, popř. Fujitova-Pearsonova stupnice) byla nasazena v USA v roce 1971 pro klasifikaci tornád. Původně Fujita navrhl škálu jako 13-ti stupňovou (F0-F12) propojující plynule Beaufortovu škálu a Machovo číslo. F1 přitom odpovídá 12-tému stupni Beaufortovy stupnice a F12 pak Mach 1. V praxi se ale používá pouze stupnice šestistupňová F0 - F5. Rychlosti větru a popis škod je dostupný pro stupnici v tab. 5.3.

V roce 2001 - 2004 byla vyvinuta rozšířená Fujitova stupnice, která stupnici původní nahradila. Upravená stupnice má odlišně odvozené rychlosti větru v jednotlivých stupních a precizované odhady škod.

Je zajímavé, že rychlosti jsou v tomto případě pouze odhady - nejedná se tedy o vědecky ověřené

údaje. Jedním z důvodů je, že měření rychlosti opravdu velkých tornád představuje netriviální problém, při které „lovec tornád“ riskuje život. Přesto je tato stupnice, resp. její modernější verze *rozšířená Fujitova stupnice* úspěšně používána.

Tabulka 5.3: Fujitova stupnice (adaptováno z [73, 74])

Fujitova stupnice		škody	Rozšířená Fujitova stupnice	
kategorie	rychlost [km/h]		kategorie	rychlost [km/h]
F0	64 - 116	lehké škody	EF0	105 - 137
F1	117 - 180	mírné škody	EF1	138 - 178
F2	181 - 253	značné škody	EF2	179 - 218
F3	254 - 332	vážné škody	EF3	219 - 266
F4	333 - 418	zničující škody	EF4	267 - 322
F5	419 - 512	ohromující škody	EF5	> 322

Podobně jako v případě Beaufortovy stupnice je možno rychlost větru odpovídající stupně vyjádřit také empirickým vzorcem (5.2).

$$v = 6,3 \cdot (F + 2)^{1,5} \quad (5.2)$$

Mezi Fujitovou a rozšířenou Fujitovou stupnicí je také rozdíl v předpokládané délce porvy větru. Původní Fujitova stupnice stejně jako např. Beaufortova stupnice berou v úvahu průměr rychlostí větru za 1 minutu. Rozšířená Fujitova stupnice ale zkracuje tuto dobu na 3 sekundy. To je také důvodem, proč jsou rychlosti v rozšířené stupnici opticky vyšší - berou prostě v úvahu silné, ale krátké porvy větru. Toto rozhodnutí je ve skutečnosti poměrně dobře zdůvodnitelné, protože právě silné porvy, popř. jejich rychlé střádání jsou odpovědné za značnou část způsobených škod.

Podrobnější popis škod definovaný [72] pro rozšířenou Fujitovu stupnici je následující:

- EF0 - zlomené větve stromů, vyvrácení některých mělce zakořeněných stromů, poškození některých komínů
- EF1 - mobilní domy převrácené, rozbitá okna, střešní tašky servané větrem, zlomení kmene některých stromů
- EF2 - mobilní domy zničené, střechy poškozené, vzduchem létají trosky a vzrostlé stromy jsou zlomené nebo vyvrácené
- EF3 - střechy a obvodové stěny jsou vyrvány z budov, menší budovy zničené a mětčina stromů je vyvrácených
- EF4 - i dobře postavené budovy zničené, budovy jsou zvedány ze základů, auta jsou odhozena větrem a velké kusy trosk létají vzduchem
- EF5 - i dobře postavené budovy jsou zvedány ze základů, budovy postavené z železobetonu jsou poškozené, kůra je sloupána ze stromů, vzduchem létají trosky velikosti osobního auta

Škody ve výše uvedeném přehledu jsou poměrně dobře definované, přesto v podmínkách ČR, nebo možná spíše Evropských nejsou úplně použitelné. Když se podíváme na škody podrobněji zjistíme, že předpokládají poškození odpovídající montovaným dřevostavbám, které v Evropě, jsou také stavěny, ale jedná se spíše o minoritní záležitost. A tak jsou budovy v ČR/Evropě odolnější vůči působení větru.

V tomto ohledu se tedy setkáváme s další typickou vlastností škál, založených na empirických datech - jejich přenositelnost, použitelnost do dalších geografických oblastí může a většinou také je omezená.

Pro úplnost uvádíme také TORRO stupnici, kterou vyvinul Terence Meaden pro **Tornado and Storm Research Organisation (TORRO)**, jako měřítko intenzity tornád pro nasazení ve Velké Británii. Stupnice byla vyvinuta, jako rozšíření pro Beaufortovu stupnici, kde stupeň T0 odpovídá osmému stupni na Beaufortově škále (B8). Další stupně se pak zvyšují ob 2 (tedy T1 = B10, T2 = B12, ..., T11 = B30) Matematicky je možno vztah mezi těmito stupnicemi popsat pomocí rovnic (5.3) a (5.4).

$$B = 2(T + 4) \quad (5.3)$$

$$T = (B/2 - 4) \quad (5.4)$$

Rychlost je možno vypočítat dle vzorce (5.5). Oproti Fujitově škále má TORRO stupnice popsané škodní stavy, které typově odpovídají lépe stavebnictví používaného v Evropě, viz tab. 5.4 a popis níže.

$$v = 2,365(T + 4)^{3/2} \quad (5.5)$$

Tabulka 5.4: TORRO stupnice (adaptováno z [89])

škála	rychlost větru [m/s]	škody	síla
T0	17 - 24	lehké škody	slabé
T1	25 - 32	mírné škody	
T2	33 - 41	střední škody	
T3	42 - 51	silné škody	
T4	52 - 61	těžké škody	silné
T5	62 - 72	intenzivní škody	
T6	73 - 83	středně-devastující škody	
T7	94 - 95	silně devastující škody	
T8	96 - 107	těžce devastující škody	extrémně silné
T9	108 - 120	intenzivně devastující škody	
T10	121 - 134	mega škody	
T11	> 135	fenomenální škody	

Škody pro TORRO stupnici jsou definovány [89] následovně:

- T0 - zvedá nezajištěné stelivo; stany a markýzy jsou vážně narušené; možné uvolnění střešních tašek; lámání drobnějších větví
- T1 - lehátka, menší rostliny a odpadky létají vzduchem; menší poškození přístřešků. Vážnější uvolnění střešních tašek a částí komínů; vyvrácení dřevěných plotů; mírné poškození živých plotů a stromů
- T2 - těžké mobilní domy posunuty, lehké karavany převráceny, zahradní přístřešky zničeny, střechy garáže vyrvány, silné poškození střešních tašek a komínů; poškození stromů - silné větve ohnuty nebo ulomeny, menší stromy vyvráceny
- T3 - Mobilní domy převráceny nebo těžce poškozeny; lehké karavany zničeny; garáže a lehké přístavby zničeny; střešní trámy obnaženy; některé silnější stromy se lámou nebo se vyvracejí z kořenů
- T4 - motorová vozidla jsou vymrštná vzduchem popř. zničena; přístřešky jsou vrhány na značné vzdálenosti; celé střechy jsou odstraněny z některých domů; střešní trámy zděných domů jsou zcela obnaženy; vrchol stítové stěny poškozen; velké množství stromů se láme popř. vyvrací z kořenů
- T5 - těžká motorová vozidla se vznášejí; zavažnější poškození budov než v T4, obvodové stěny budov zůstávají většinou nepoškozeny; nejstarší / nejslabší budovy se mohou zcela zřítit.
- T6 - těžké stavby ztrácejí celé střechy a v některých případech část obvodových stěn; okna výškových budov rozbitá; větší množství hůře postavených budov se hroutí
- T7 - dřevostavby zcela zničeny; některé stěny zděných domů poškozeny nebo strženy; výškové budovy vychýleny; stavby tvořené z ocelových konstrukcí mohou být vychýleny; lokomotivy převráceny; viditelné poškození kůry stromů letícími troskami
- T8 - motorová vozidla vržena na velké vzdálenosti; dřevostavby a jejich obsah rozprostřeny na velké ploše; zděné budovy nevratně poškozeny; výškové budovy silně zkriveny a mohou ukazovat viditelné vychýlení na jednu stranu; špatně ukotvené výškové zařízení strženy; ostatní ocelové konstrukce ohnuté
- T9 - všechny budovy ocelových konstrukcí těžce poškozeny; výškové budovy strženy; lokomotivy nebo vlaky vrženy na velké vzdálenosti; kompletní vyvrácení všech stojících kmenů
- T10 - celé montované a obdobné budovy zdviženy nebo odtrženy od základů a přeneseny na delší vzdálenosti kde jsou zničeny. Budovy z železobetonu mohou být těžce poškozeny nebo takřka zničeny
- T11 - dobře postavené budovy odtrženy od základů a odneseny; železobetonové konstrukce jsou kriticky poškozeny; vysoké budovy se hroutí nebo mají silné strukturální deformace; některá auta, nákladní auta, železniční vozy mohou být vrženy až na vzdálenost 1 míle (1,6 km)



Výše uvedené škály nám mohly poskytnout jisté základní informace o možných škodách v důsledku působení větru. Pokud např. zkombinujeme předpověď počasí s těmito informacemi, můžeme získat solidní základ pro systém varování, což je přesně způsob, jakým jsou tyto stupnice používány.

Pokud ale cílem prováděných analýz je poskytnutí lepší představy o reálných škodách na určitém konkrétním území, výše uvedené stupnice již nejsou tak užitečné, jelikož skutečné škody závisí na řadě dalších faktorů, které nejsou ve stupnicích zohledněny. Pro takové účely se budeme muset opřít o poněkud složitější výpočty. Začneme se samotnou podstatou toho, co měříme - tedy *silou větru*.

Tohoto problému jsme se už dotkli. Z předchozího výkladu už víme, že čím kratší časový úsek bereme v úvahu, tím extrémnější hodnoty můžeme naměřit. Problém s extrémny je ale ten, že jsou extrémní. Poryvy větru se tak nemusí projevit na celém analyzovaném území. Z toho vyplývá, že naše schopnost je změřit je dosti omezená. Oproti tomu rychlosti větru průměrované na 1 minutu, popř. 10 minut je mnohem jednodušší měřit. Problémem tedy je jak z těchto dat o „běžné“ predikované síle větru odhadnout možnou sílu poryvů větru.

Gründhal et al. [38] na základě dat z **Spolková republika Německo (SRN)** navrhuji transformaci (5.6).

$$G(t, T = 10 \text{ min}, z, z_0, v_m) = 1 + \frac{1,42 + 0,3013 \ln\left(\frac{990}{v_m t} - 4\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (5.6)$$

Kde  $G$  představuje faktor poryvu větru<sup>1</sup>, jako funkce střední rychlosti větru  $v_m$  (zprůměrované pro dobu  $T = 10$  minut), délka poryvu  $t$ ,  $z_0$  je délka drsnosti [m] – ve smyslu drsnosti povrchu,  $z$  je výška nad zemí. Gründhal et al. délku poryvu  $t$  stanovují na  $t = 3s$ , což je v souladu s přístupem, který byl volen např. také v rozšíření Fujitově stupnici, viz výše.

V odborné literatuře byly také pro některé typy povrchů publikovány faktory  $G$  viz tab. 5.5.

Tabulka 5.5: Vybrané faktory poryvu větru podle typu užití území (převzato z [39])

Vegetace	Faktor poryvu větru
Voda	1,4
Skála, písek, mokřady	1,45
Louky	1,5
Pole	1,5
Listnatý les	1,65
Smíšený les	1,7
Jehličnatý les	1,75
Zastavěné plochy	1,85

Z faktoru poryvu větru je pak možno jednoduše odvodit předpokládanou rychlost takového poryvu dle (5.7).

$$v_G = v \cdot G \quad (5.7)$$

Následně poměr je možno vypočítat dle (5.8).

$$LR(v_G) = LR\left(80 \frac{km}{h}\right) \left(\frac{v_G}{80 \frac{km}{h}}\right)^\gamma \quad (5.8)$$

Kde  $LR(v_G)$  je poměr ztrát při rychlosti poryvu  $v_G$ . Všimněte si, že poměr ztrát je ve skutečnosti odvozen z poměru ztrát při rychlosti 80 km/h. Rovnice (5.8) je pak validní pouze pro rychlosti větru nad 80 km/h. Pod touto hodnotou nepředpokládají Gründhal et al. [38] v SRN vznik škod. Data z předchozích analýz naznačují, že  $\gamma \in < 4; 5 >$ .

Gründhal et al. [38] navrhuji pro dolní hranici odhadu hodnotu  $z_0 = 0,45m$  a  $\gamma = 4$ , pro horní hranici odhadu pak  $z_0 = 0,55m$  a  $\gamma = 5$ .

Existují také klasické křivky poškození, které lze použít pro odhad poškození budov v důsledku větru, viz např. obr. 5.1.

<sup>1</sup>z angl. gust



### Výpočet poměru ztrát pro mezní rychlost větru

$$LR(190) = LR(160) \cdot \left(\frac{190}{160}\right)^4 = 1,2 \cdot 1,99 = 2,4$$

$LR(190)$  odpovídá hledané škodovosti při rychlosti nárazu větru  $190\text{ km/h}$ ,  $LR(160)$  je pak hodnota škodovosti při nárazové rychlosti  $160\text{ km/h}$ . Tento údaj je možno odečíst z tab. 5.6. Hodnota  $LR$  se udává v promilích (‰).

Tabulka 5.6: Rychlost větru a míra poškození pro vzorové portfolio pojištěných vlastníků domácností (VGW) v Německu (převzato z [69])

Rychlost větru [km/h]	80	100	120	140	160
Škodovost [‰]	0,08	0,2	0,4	0,75	1,2

U křivek zranitelnosti je potřeba brát v úvahu také způsob konstrukce. Např. pro rezidenční budovy v USA (typu rodinný dům) je preferován stavební materiál dřevo, které je ale v podmínkách ČR spíše neobvyklé.

Při případném přejímání do podmínek ČR je proto potřeba se spíše orientovat na křivky odpovídající jednotlivým materiálům. Na obr. 5.1 např. cihly a beton, popř. z nich odvodit vlastní křivku.

V podmínkách ČR realizuje dlouhodobě výzkum **Akademie věd (AV)**. Konkrétně Ústav fyziky atmosféry AV ČR vyvíjí *větrné mapy* ČR [111]. Součástí souboru map je také *Mapa extrémních rychlostí větru*. Mapa větrných oblastí pracuje s odlišnou hodnotou – a to výchozí základní rychlostí větru  $v_{b,0}$ , která odpovídá charakteristické střední rychlosti větru ve výšce 10 m nad zemí v terénu kategorie II. Náhled mapy je dostupný na obr. 5.2.

Na webových stránkách je pak mapa dostupná v interaktivní podobě. Obecně lze ale říci, že vyšší rychlosti větru v podmínkách ČR se vyskytují velmi zřídka a pokud, pak takřka výhradně na horách.

Pro úplnost doplňujeme ještě některé další možné výpočty související s rychlostí větru podle ČSN EN 1991-1-4 [120]. Střední rychlost větru  $v_m$  se vypočte:  $v_m(z) = c_r(z)c_0(z)v_b$ , kde  $c_r$  je součinitel drsnosti viz (5.9) a  $c_0(z)$  je součinitel ortografie (většinou 1).

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{pro } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z_{min}) & \text{pro } z \leq z_{min} \end{cases} \quad (5.9)$$

Kde  $k_r$  je součinitel terénu (5.10),  $z_0$  je délka drsnosti, viz tab. 5.7.

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,11}}\right)^{0,07} \quad (5.10)$$

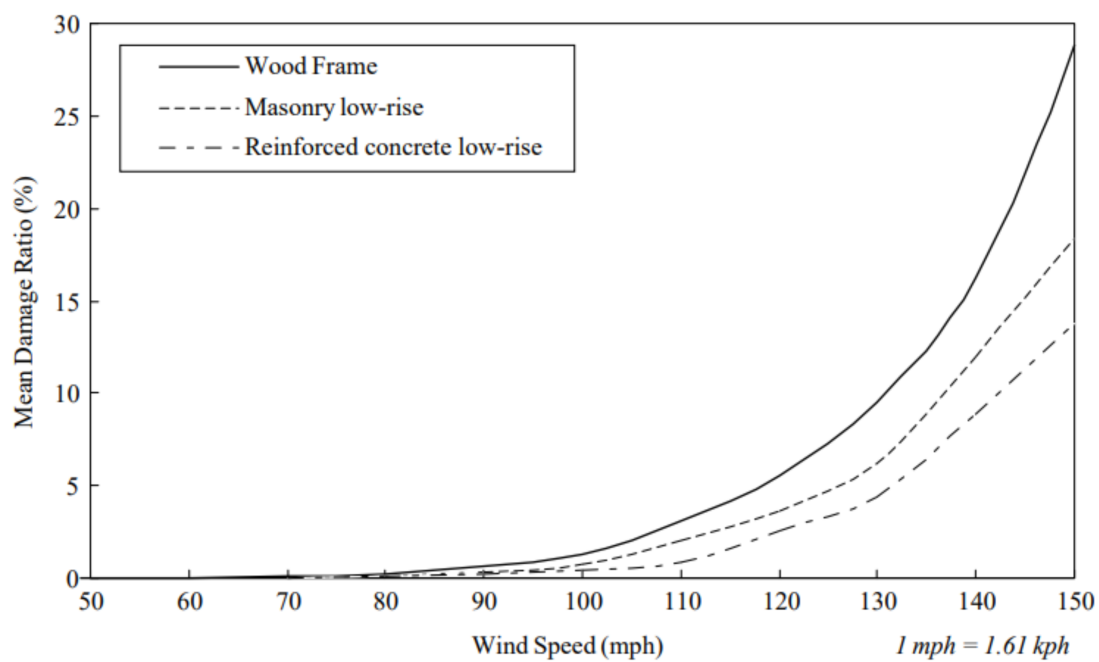
Tabulka 5.7: Kategorie terénu, délka drsnosti a minimální výška (převzato z [120])

Kategorie	Délka drsnosti	Min. výška
	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0. volný prostor bez překážek (moře)	0,003	1
I. zanedbatelná vegetace nebo jezera	0,01	1
II. nízká vegetace nízká vegetace, izolované překážky	0,05	2
III. překážky s volným prostorem (vesnice, předměstské oblasti)	0,3	5
IV. městské oblasti, 15 % s výškou nad 15 m	1	10

Alternativní křivky poškození pro různé typy budov odvodil např. také Yamin at al. [107]. Tyto funkce byly odvozeny pro **United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Global Assessment Report (GAR)** on Disaster Risk Reduction, (GAR 2013) [92]<sup>2</sup>. Článek obsahuje jednak funkce zranitelnosti pro seismickou činnost a jednat také některé základní charakteristiky tříd budov.

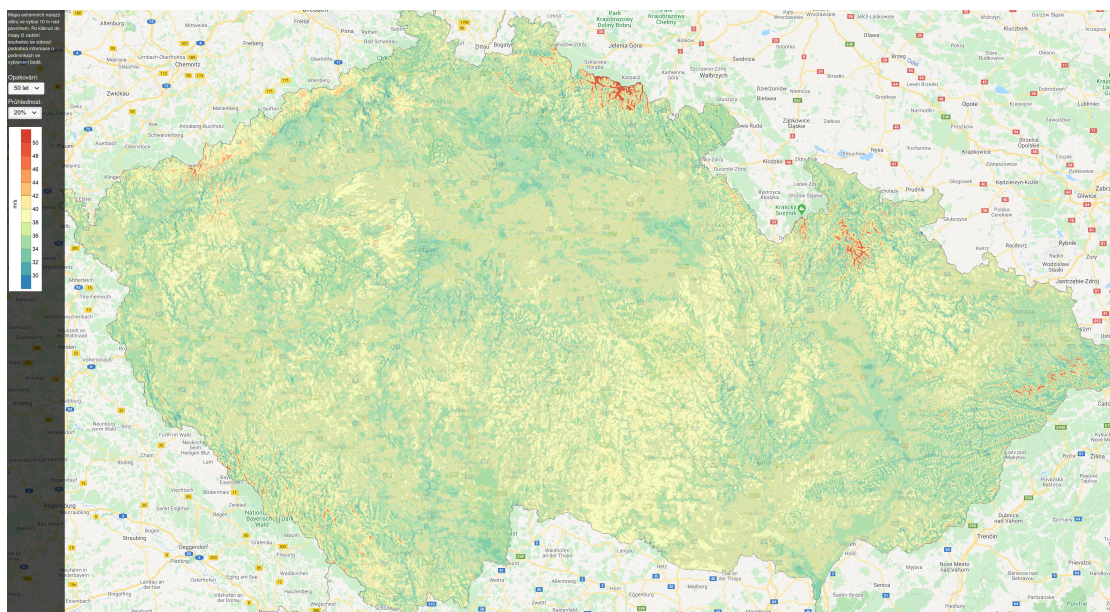
Oblast křivek zranitelností se v posledních letech značně vyvíjí a tak je potřeba před realizací studií provést rešerši dostupné literatury pro zjištění posunů v poznání v této oblasti. Křivkami týmu

<sup>2</sup>**GAR** je pravidelně vydávanou publikací hodnotící rizika na celosvětové úrovni. V době psaní tohoto textu byla poslední dostupná verze z roku 2019 [93]



Obrázek 5.1: Míra škod v závislosti na rychlosti větru pro komerční budovy (převzato z [53])

Yamina [107] se také plynule dostáváme k tématu další kapitoly, což je právě seismická činnost a škody z ní vyplývající.



Obrázek 5.2: Mapa extrémních nárazů větru ve výšce 10 m nad povrchem (převzato z [111])

### Shrnutí



Větrné smršti jako pojem nejsou zcela korektní, jedná se o spíše hovorové označení pro meteorologické jevy, provázené silným větrem schopným způsobit škody. Podle síly větru v průběhu obvykle odvozujeme očekávané škody. K tomuto účelu se používá např. Beaufortova stupnice, pro tornáda, popř. tropické bouře se pak používá např. rozšířená Fujitova stupnice nebo stupnice TORRO. Tento typ informací je možno efektivně využít pro varování a minimalizovat tak předpokládané ztráty na majetku, zdraví nebo dokonce životech obyvatelstva.

Pro účely odhadu přímých následků takových jevů ale výše uvedené stupnice nestačí. K odhadu obvykle využíváme křivky zranitelností, které jsou dostupné pro budovy z různých stavebních materiálů. Takové křivky dávají do souvislosti sílu větru měřenou obvykle rychlostí a škody, které působením větru na majetku vznikají. Zkušenosti z minulosti ukazují, že pro vznik škod není až tak určující síla větru průměrovaná za delší časové období (např. 10 minut), ale nárazy způsobené poryvy větru. Tyto poryvy totiž mohou dosahovat významně vyšší síly, která pak má mnohem vyšší potenciál iniciovat škody.

Pro ČR vyvinula AV Mapu extrémních nárazů větru, která může být zajímavým podkladem pro provádění rizikových analýz území. V obecné rovině lze říci, že síla větru je v našich podmínkách typicky vyšší v horských oblastech.

### Kontrolní otázky



1. Co měří Beaufortova stupnicí?
2. Jaký je rozdíl mezi Beaufortovou a Fujitovou stupnicí?
3. V podmínkách ČR bylo by výhodnější použít Fujitovu stupnici nebo stupnici TORRO? Proč?
4. Jaký je časový interval poryvu větru?
5. Je možno z očekávané průměrné rychlosti větru odhadovat sílu větru v poryvech?
6. Jakým způsobem můžeme odhadnout škody v území způsobené větrem?

## Kapitola 6

# Seismická činnost



### Průvodce studiem

V této kapitole se zaměříme na projevy seismické činnosti, jinými slovy zemětřesení, popř. otřesy. Ačkoliv zemětřesení nejsou v podmínkách ČR příliš častá, dějí se. Proto se zaměříme na možnosti odhadu škod i při tomto jevu.

### Po prostudování této kapitoly budete znát

- jak měříme intenzitu zemětřesení
- základní aspekty zemětřesení způsobující škody
- jakým způsobem je možno odhadnout poškození objektů seismickými projevy



### Čas pro studium

Tato kapitola je relativně krátká, její prostudování Vám zabere hodinu až dvě.

V případě, že budeme o problematice zemětřesení uvažovat intuitivně, můžeme dojít k přesvědčení, že tento typ hrozeb není v podmínkách ČR relevantní. Tento intuitivní náhled ale není zcela přesný. Jak je patrné z obr. 6.1, zemětřesení na území ČR jsou zaznamenána a to i o relativně vysokých magnitudách, při kterých již lze očekávat vznik signifikantních škod.

Pro měření se používá pojem *makroseismická intenzita*. Na obr. 6.1 označuje je taková intenzita označována I. Intenzity se liší na různých místech. V epicentru pak intenzita zemětřesení bývá obvykle nejsilnější. Tuto intenzitu označujeme jako *epicentrální intenzitu* zemětřesení.

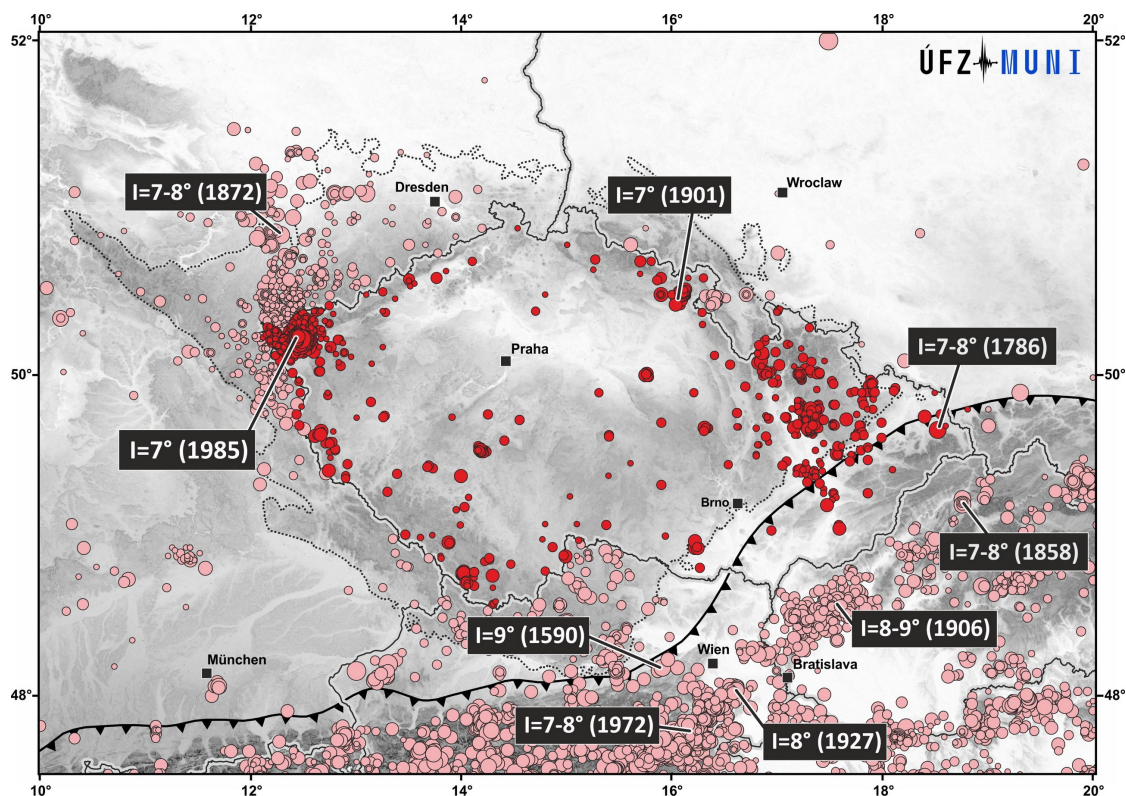
Intenzita se odvozuje se statistického vyhodnocení makroseismického dotazníku, kteří vyplňují obyvatelé v zemětřesením postižené oblasti a který popisuje způsob, jakým zkoumané zemětřesení pocítili. To je zajímavé - znamená to, že neexistuje jednoduchý přímý vztah mezi tím, jak je zemětřesení měřeno přístroji a tím jak je pocíťováno na povrchu.

To co měří přístroje je tzv. *magnituda* zemětřesení. Existuje několik stupnic, které se liší tím, pro jaký typ (nebo geografickou oblast) pokrývají a také předpokládaným účelem použití stupnice.

První a také pravděpodobně nejznámější stupnicí je *Richterova*. Tato stupnice se začala používat v 30. letech minulého století. Původní vzorec pro výpočet je k dispozici v (6.1).

$$M_L = \log A - \log A_0(\delta) = \log \left[ \frac{A}{A_0(\delta)} \right] \quad (6.1)$$

Kde  $M_L$  je lokální magnituda zemětřesení,  $A$  je maximální amplituda zaznamenaná Wood-Andersonovým seismografem,  $A_0$  je empirická funkce závislá na vzdálenosti od epicentra zemětřesení  $\delta$ .



Obrázek 6.1: Epicentra historicky nejsilnějších zaznamenaných zemětřesení na území ČR (převzato z [68])

V tab. 6.1 jsou zachyceny magnitudy a jejich obvyklé mapování *Mercalioho škálu* měřící intenzitu zemětřesení.

Mercalioho stupnice byla jednou z prvních makroseismických stupnic. Stupnice představená v tab. 6.1 odpovídá verzi označované jako Modifikovaná Mercalioho stupnice z roku 1956 (**Modified Mercali Scale of 1956 (MM56)**). Tato stupnice je 12-ti stupňová, byť z praktického pohledu je poměrně těžké z hlediska následků rozlišovat mezi stupni X - XII.

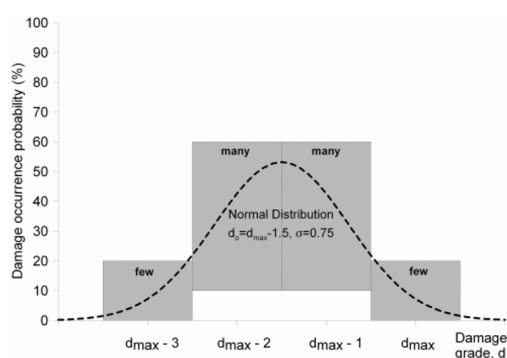
Jak je patrné z tabulky přímý vztah mezi magnitudou a intenzitou neexistuje. Intenzita tak musí být pro magnitudu uváděna jako rozsah intenzit. Z povahy vzorce (6.1) pak vyplývá, že čistě mechanicky síla zemětřesení měřená magnitudou se zdvojnásobí každých 0,2 magnitudy. Nejedná se tedy o lineární závislost.

Mercalioho stupnice posloužila jako základ pro odvozování dalších stupnic intenzity, včetně té nejmodernější Evropské makroseismické škály **European Macroseismic Scale of 1998 (EMS-98)** [37]. Všechny tyto škály používají 12 stupňů, ovšem s tím, že mezi různými stupnicemi jsou odchylky v tom, jak jsou jednotlivé stupně definovány. EMS-98 je definována následovně:

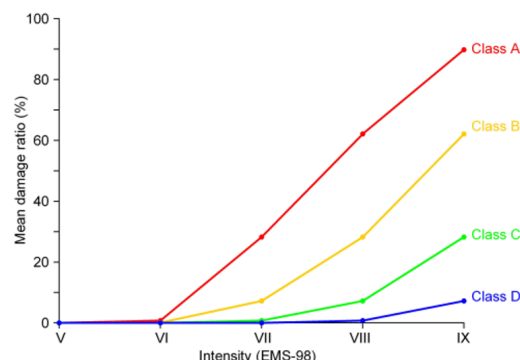
- I. *Nepocítěno* - Zemětřesení nebylo pocítěno.
- II. *Stěží pocítěno* - Pocítěno jen velmi málo jednotlivci v klidu v domech.
- III. *Slabé* - Pocítěno uvnitř budov některými osobami. Lidé v klidu pociťují jako houpání nebo lehké chvění.
- IV. *Značně pozorované* - Zemětřesení uvnitř budov cítí mnozí, venku jen výjimečně. Někteří lidé jsou probuzeni. Okna, dveře a nádobí drnčí.
- V. *Silné* - Uvnitř budov cítí většina, venku někteří. Mnozí spící se probudí. Někteří jsou vystrašení. Budovy vibrují. Visící objekty se značně houpají. Malé předměty se posouvají. Dveře a okna se otvírají a zavírají.
- VI. *Mírně ničivé* - Mnozí lidé jsou vystrašení a vybíhají ven. Některé předměty padají. Mnohé budovy utrpí malé nestrukturální škody jako např. vlásečnicové trhliny nebo odpadnuté malé kousky omítky.
- VII. *Ničivé* - Většina lidí je vystrašena a vybíhá ven. Nábytek se posouvá. Předměty padají z polic ve velkém množství. Mnohé dobře postavené běžné budovy utrpí střední škody: malé trhliny ve

Tabulka 6.1: Richterova stupnice a její mapování na Mercalliho stupnici intenzity

Magnituda	popis	Mercalliho intenzita	frekvence
1,0 - 1,9	mikro	I	kontinuálně
2,0 - 2,9	malé	I - II	> 1mil./rok
3,0 - 3,9		III - IV	> 100 000/rok
4,0 - 4,9	slabé	IV - VI	10 - 15 tis./rok
5,0 - 5,9	střední	VI - VII	1 - 1,5 tis./rok
6,0 - 6,9	silné	VIII - X	100 - 150/rok
7,0 - 7,9	velké	X+	10 - 20/rok
8,0 - 8,9	velmi velké		1/rok
9,0+			1/10-50 let



(a) Idealizovaná křivka distribuce pravděpodobnosti následku na bázi EMS-98



(b) Funkce zranitelnosti pro EMS-98 třídy zranitelnosti A - D

Obrázek 6.2: Pravděpodobnost následku (vlevo) a funkce zranitelnosti pro třídy A – D na základě datasetu EMS-98 (převzato z [91])

zdech, opadá omítka, padají části komínů; ve stěnách starších budov jsou velké trhliny a příčky jsou zřícené.

VIII. *Těžce ničivé* - Mnozí lidé mají problémy udržet rovnováhu. Mnohé domy mají velké trhliny ve stěnách. Některé dobře postavené běžné budovy mají vážně poškozené stěny. Slabé starší struktury se mohou zřítit.

IX. *Destruktivní* - Všeobecná panika. Mnoho slabých staveb se řítí. I dobře postavené běžné budovy utrpí velmi těžké škody: těžké poškození stěn a částečné i strukturální škody.

X. *Velmi destruktivní* - Mnohé dobře postavené běžné budovy se řítí.

XI. *Devastující* - Většina dobře postavených běžných budov se řítí. I některé seismicky odolné budovy jsou zničeny.

XII. *Úplně devastující* - Téměř všechny budovy jsou zničeny.

Ačkoliv existuje celá řada různých magnitud, odhad škod má v základu především makroseismické škály. Jako příklad lze zmínit shromážděná data týmem okolo Tyagunova [91] a modely škod z nich odvozené, viz obr. 6.2.

Třídy zranitelnosti systém hodnocení rozlišuje ve skutečnosti A – F, přičemž třída F označuje nejnižší zranitelnost. Škody je pak možno popsat podobně jako v tab. 6.2.

Podrobnosti o třídách zranitelnosti a celém systému EMS-98 je možno nalézt v Grünthal [37]. Rozlišování škál je poměrně důležité, protože vizuálně jsou si podobné, ale z pohledu hodnocení jsou mezi nimi určité rozdíly (např. ve smyslu rozsahů škál). Různé metody hodnocení škod jsou pak založeny na různých stupnicích, což je potřeba vzít v úvahu.

Kromě Mercalliho stupnice, kterou jsme již zmiňovali je v Evropě a zejména pak České republice populární starší stupnice MSK Medvedev–Sponheuer–Karnik s poslední revizí v roce 1981 (**Medvedev–Sponheuer–Karnik Scale of 1964 (MSK-64)**). Škála MSK je 12-ti stupňová, pro označení jednotlivých stupňů používá římská písmena. Podrobnosti viz [62].

Pravděpodobnost určitého typu škod podle třídy zranitelnosti je možno spočítat také relativně

Tabulka 6.2: Klasifikace stupňů škod a poměr škod (převzato z [91])

Stupeň škod	Poměr škod [%]
Stupeň 0: beze škod	0
Stupeň 1: zanedbatelné až mírné škody	0 - 1
Stupeň 2: střední škody	1 - 20
Stupeň 3: značné až těžké poškození	20 - 60
Stupeň 4: velmi silné poškození	60 - 100
Stupeň 5: zničení	100

jednoduše [18] podle vzorce (6.2) a tab. 6.3 pro specifikaci parametru  $p$ .

$$P_i = \frac{5!}{i!(5-i)!} p^i (1-p)^{5-i} \quad (6.2)$$

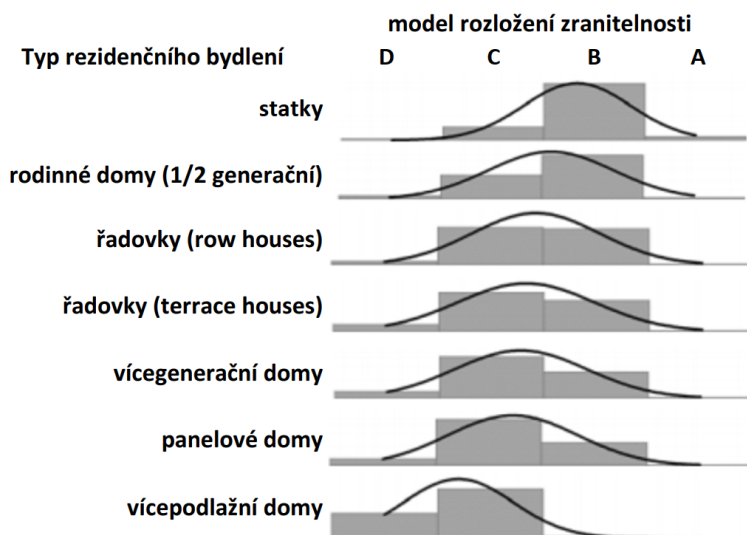
Kde  $i$  je typ škod (intenzita škod) v tab. níže a  $p'$  se odečítá z tab 6.3 níže.

Tabulka 6.3: Parametr  $p'$  binomického rozložení DPM pro strukturální typologii škod (převzato z [18])

Stupeň intenzity	Třída zranitelnosti			
	A	B	C	D
VI	0,269	0,151	0,077	0,055
VII	0,396	0,269	0,151	0,077
VIII	0,603	0,396	0,269	0,151
IX	0,811	0,603	0,396	0,269

Alternativní pohled na závislost úrovně poškození a intenzity zemětřesení poskytuje také Coburn a Spence [14]. Pravděpodobnostní matice je ale v tomto případě sestavena na základě údajů z Itálie zkompileovaných pro budovy se slabými stěnami.

Pro různé typy rezidenčního bydlení je možno vysledovat rozložení modelu zranitelnosti.



Obrázek 6.3: Rozložení typu zranitelnosti různých typů rezidenčního bydlení (převzato z [91])

Z hlediska provádění analýz dopadů je potřeba doplnit, že typ bydlení do úrovně podrobnosti vyžadované hodnocením popsaném na obr. 6.3 není v obecných datových sadách popisujících území k dispozici. Tyagunov at al proto šli jinou cestou [91] na základě podrobných místních šetření sestavili rozložení budov rezidenčního bydlení podle velikosti sídla, ve kterém se nacházejí, viz tab. 6.4.

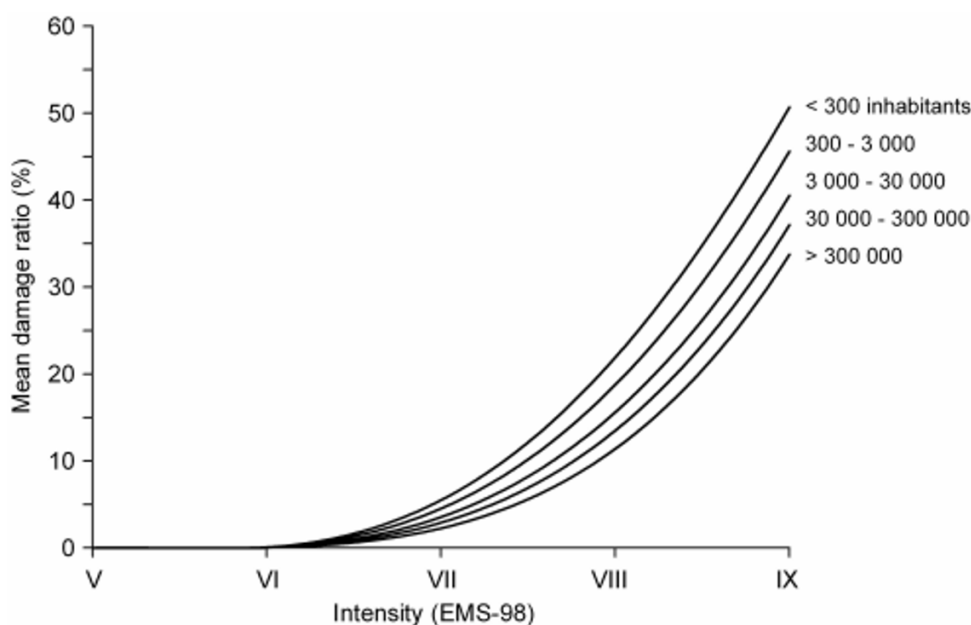
Z výše uvedeného pak lze přímo odvodit pro jednotlivé typy komunit model zranitelnosti, viz obr. 6.4.



Tabulka 6.4: Model složení budov rezidenčního bydlení (převzato z [91])

Třídy populace* (počet obyvatel)	Třídy zranitelnosti [%]			
	A	B	C	D
P1 (<300)	Pár	Většina	Pár	Pár
P2 (300-3000)	Pár	Většina	Mnoho	Pár
P3 (3000-30000)	Pár	Mnoho	Mnoho	Pár
P4 (30000-300000)	Pár	Mnoho	Většina	Pár
P5 (>300000)	Pár	Pár	Většina	Pár

\* Definice kvantity: pár = 0-20 %, mnoho = 10-60 %, většina = 50-100 %



Obrázek 6.4: Funkce poškození pro reprezentativní třídy komunit (převzato z [91])

Pro odhad počtu zabíjených v důsledku kolapsu budov je možno použít model Coburn and Spencer [14], viz vzorec (6.3):

$$K_5 = D_5 M_1 M_2 M_3 ((1 - M_4) M_5 + M_4) \quad (6.3)$$

Kde  $K_5$  je očekávaný počet usmrcených v totálně zničených budovách  $D_5$ , s průměrným počtem osob v budově  $M_1$ , procentem osob přítomných v budově v okamžiku zemětřesení  $M_2$ , očekávaném počtu uvězněných obyvatel  $M_3$ , mortalitě v důsledku kolapsu budovy  $M_4$  a mortalitě po kolapsu  $M_5$ , v tomto případě se jedná o oběti, které sice kolaps budovy přežily, ale zemřeli v důsledku to, že nebyli včas vyproštěni z trosk budovy.

Vzorec (6.3) také z hlediska interpretace vyžaduje jistou pozornost -  $M_1$  až  $M_3$  lze interpretovat jako postupné omezování počtu lidí, kteří se nachází v budově v době jejího kolapsu.  $M_4$  a  $M_5$  jsou ale jiné, protože potřebujeme odvodit procento lidí, kteří skutečně ve finále zemřou, ať už přímo kolapsem budovy nebo následně tím, že se k nim nedostane včas pomoc.  $M_4$  jsou tak lidé kteří přímo zahynou v důsledku kolapsu budovy.  $1 - M_4$  jsou naopak lidé kteří kolaps přežijí a zůstanou uvězněni pod troskami.

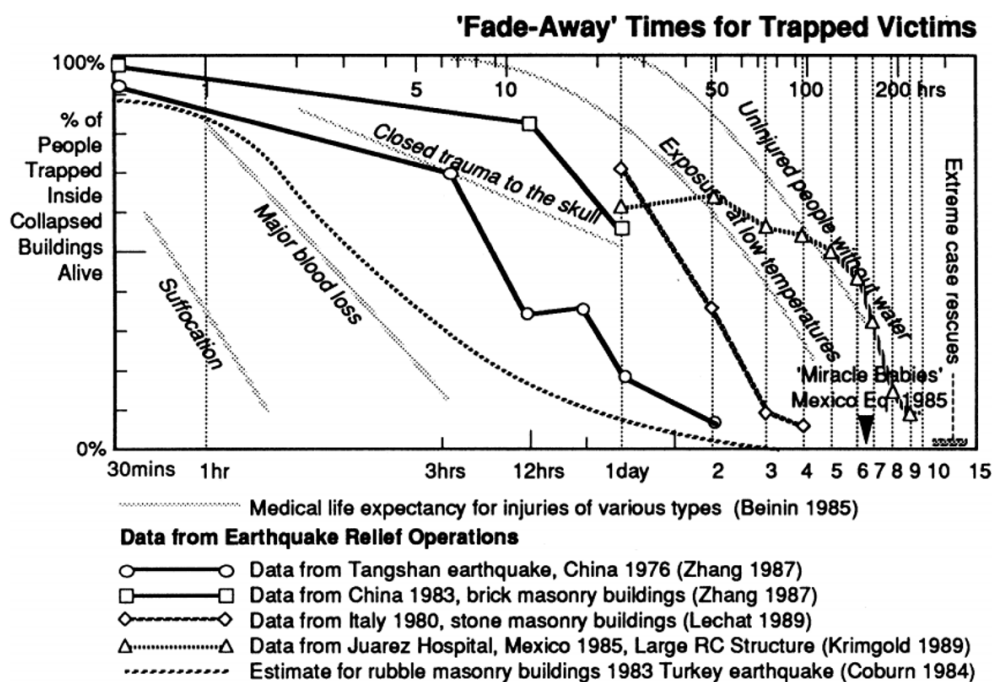
$(1 - M_4) M_5$  pak poslouží k získání proporce lidí, kteří zahynou až pozdním příchodem pomoci. Proto je k tomuto výrazu potřeba přičíst  $M_4$ , ale bylo získáno procento lidí, kteří skutečně zahynou.

Vzorec (6.3) má nevýhodu v tom, že zcela neodpovídá realitě - obyvatelé mohou být zraněni nebo dokonce zemřít i v případě, že se budova nezhroutí. Zaznamenány byly případy, kdy ke zranění došlo i v slabě poškozených budovách.

Jednotlivé parametry  $M$  se určují empiricky na základě dat získaných ze zemětřesení v minulosti.

Existují také alternativní modely popisující např. souvislost mezi **PGA** a pravděpodobnosti určitého stavu poškození, viz např. výzkumná zpráva ???. K výpočtu je ale potřeba podrobnější model scénáře zemětřesení, než je popsáno výše. K zjišťování vlastností zemětřesení mohou být používány také další veličiny jako např. spektrální posun a řada dalších.

Z pohledu počtu obětí je možno uvažovat také rychlost vyprošťování osob uvězněných pod sutinami v souvislosti s jejich zraněními. Kompilaci údajů z různých zemětřesení provedl např. Coburn a Spence [14], viz obr. 6.5 níže, na základě studií Zhang [108], Lechat [56], Krimgold [55], Coburn [13].



Obrázek 6.5: Závislost míry přežití osob uvězněných ve zhroutených budovách na čase (převzato z [14])

Známý jsou také informace o typech zranění, která při takových kolapsech vznikají, viz tab. 6.5. Tyto informace mohou být cenné pro rychlou aktivaci patřičného traumatologického plánu a přípravu jednotlivých zdravotních zařízení pro příjem akutních pacientů.

Tabulka 6.5: Typy zranění po zemětřesení, která vyžadují lékařské ošetření (převzato z [14])

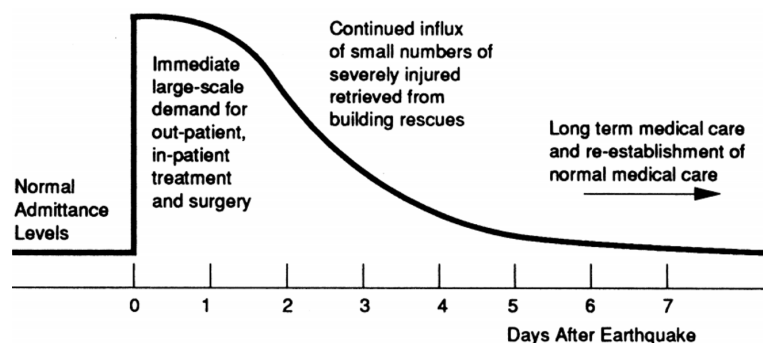
Typ zranění	Podíl [%]
Zranění měkkých tkání	30 - 70
Zlomeniny končetin	10 - 50
Zranění hlavy	3 - 10
Ostatní	5

Poptávka po zdravotnických službách je obvykle nejvyšší těsně po zemětřesení, následuje pak postupný návrat k původní úrovni poptávky a to řádově v období do týdne, viz obr. 6.6.

Informace jsou dostupné také o tom, jak rozsáhlá lékařská péče je v důsledku zemětřesení vyžadována, viz. tab. 6.6.

Tabulka 6.6: Typické rozložení následků v populaci postižené silným zemětřesením (převzato z [14])

Typ zranění	Podíl [%]
Smrtelná zranění	20 - 30
Zranění vyžadující první pomoc nebo ošetření	50 - 70
Zranění vyžadující hospitalizaci	5 - 10
Zranění vyžadující velkou operaci	1 - 2



Obrázek 6.6: Vývoj poptávky po zdravotnických službách po zemětřesení (převzato z [14])

### Shrnutí

Zemětřesení v ČR nejsou příliš častá, zejména ta silná. Dostupné datové sady však ukazují, že i na našem území se s takovými zemětřeseními setkat dá.

Z hlediska měření rozlišujeme zejména magnitudu zemětřesení, měřenou např. seismografy, a makroseismickou intenzitu. Pravděpodobně nejznámějším představitelem magnitud je Richterova stupnice. Z hlediska modelování následků je ale pro nás obvykle důležitější makroseismická intenzita, která popisuje zejména následky zemětřesení na povrchu. Intenzita se obvykle určuje na základě dotazníku vyplňovaného postiženým obyvatelstvem. Mezi magnitudou a intenzitou přitom není přímá vazba.

Nejpoužívanější makroseismickou stupnicí je EMS-98, která je 12-ti stupňová, byť z praktických důvodů jsou zemětřesení o intenzitě nad X pouze obtížně rozlišitelná. K odhadu škod lze přistoupit různým způsobem. Je možné např. škody odhadnout zařazením budov do tříd zranitelnosti a poškození odhadnout na základě odhadovaného stupně EMS-98 stupnice.

Počty mrtvých v důsledku zemětřesení je možno odhadnout na základě odhadu počtu budov, které se v důsledku zemětřesení zřítí. Odhad dále vyžaduje odhad počtu osob, které se v dané chvíli v budově budou nacházet. Na základě zkušeností z minulosti je možno také odhadnout složení zranění, kterým bude muset čelit zdravotní systém.

Z hlediska zátěže zdravotního systému lze očekávat uklidnění situace přibližně po týdnu od zemětřesení.

### Kontrolní otázky

1. Co je to magnituda zemětřesení?
2. Co je makroseismická intenzita a jak se liší od magnitudy?
3. Popište způsob odhadu škod na budovách v důsledku zemětřesení.
4. Popište způsob výpočtu odhadu osob usmrčených v důsledku kolapsu budov.
5. Odhadněte (přibližně procentem) kolik osob bude potřebovat lékařskou péči v důsledku zranění způsobených zemětřesením.



## Kapitola 7

# Varování obyvatelstva



### Průvodce studiem

Jedním ze základních způsobů jak zmenšit následky mimořádných událostí je připravit se na jejich bezprostřední příchod. Obyvatelstvo, v případě že je varováno, může přijmout řadu preventivních opatření, které mají potenciál buďto zcela předejít škodám, nebo je alespoň minimalizovat. V této kapitole se zaměříme na možnosti kvantifikace tohoto jevu.



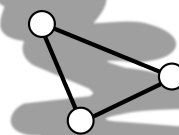
### Čas pro studium

Tato kapitola je relativně krátká, její prostudování Vám zabere hodinu.

V minulých kapitolách jsme prošli nejčastější mimořádné s potenciálem zasáhnout velké území a způsobit masivní škody. Při zkoumání dopadů jsme se ale dosud zaměřovali pouze na jeden aspekt těchto událostí - způsobem jakým „excitují“ prostředí a jak tato excitace vede ke škodám. Nezabývali jsme se ale dosud poměrně zásadní otázkou - *nelze tyto škody omezit včasnou realizací obranných/ochranných opatření?*

Odpověď zní ano. Pro většinu mimořádných událostí, o kterých jsme dosud hovořili je možno zrealizovat řadu ochranných opatření vedoucí k minimalizaci následků. Základním prostředkem pro nastartování realizace takových opatření je varování. Aby varování bylo účinné musí být realizováno způsobem, který zajistí, že informace bude:

- konkrétní - co hrozí,
- adresná - komu to hrozí, obvykle vymezeno regionálně,
- musí se dostat k adresátům.



### Ochrana obyvatelstva

Realizace ochranných opatření samotná a systémy varování jako takové nejsou předmětem zájmu tohoto předmětu. Podrobnější informace by měly být dostupné v předmětech jako *Ochrana obyvatelstva* apod.

Ačkoliv systémy varování jako takové nejsou předmětem zájmu tohoto předmětu, jejich dopady na velikost škod předmětem našeho zájmu jsou. Jak je tedy možno kvantifikovat takové dopady? Zjednodušený model (7.1) pro výpočet účinnosti systému varování pro účely varování před povodněmi

publikoval Green [35].

$$U = P_f P_d P_i P_a P_c \quad (7.1)$$

Kde účinnost varování  $U$  je definována jako součin  $P_f$  pravděpodobnosti, že bude vytvořena přesná předpověď události a následně bude konvertována do podoby varování.  $P_d$  je pravděpodobnost, že varování bude rozesláno,  $P_i$  pravděpodobnost, že člen domácnosti bude dostupný, aby mohl být varován,  $P_a$  je pravděpodobnost, že daná domácnost bude fyzicky schopna reagovat na varování a konečně  $P_c$  je pravděpodobnost, že daná osoba ví, jak reagovat efektivně.

Pro nastavení jednotlivých koeficientů lze vysledovat jistá vodítka. Např. koeficient  $P_i$  je možno odvodit z „časového rozpočtu“ domácnosti. Pokud v místě není koho varovat (např. předpokládání příjemci varování jsou v práci, ve škole, apod.) bude varování neefektivní. Podobně bude méně efektivní varování realizované hluboko v noci.

Koeficient  $P_a$  je do určité míry možno odhadnout ze statistických údajů popisujících populaci, v závislosti na tom, jaká aktivita je po příjemcích varování očekávána. Lze třeba předpokládat, že procento populace schopné evakuovat se vlastními silami bude vyšší nežli procento populace schopné vynést cenný majetek do vyšších pater, aby se minimalizovaly škody v důsledku zatopení.

Zájmové proměnné mohou být především podíl populace se závažným zdravotním postižením, věkové rozložení apod.

Byly provedeny některé studie popisující nakolik lze v důsledku včasného varování zabránit škodám. Jeden takový výsledek poskytuje např. Příručka pro ekonomické hodnocení [76] používaná ve Velké Británii, viz tab. 7.1.

Tabulka 7.1: Vážené roční průměrné škody (tis. [£], převzato z [76])

Existující ochrana	Bez varování	Varování < 8 h	Varování > 8 h
bez ochrany	4728	4559	4513
2-letá	4728	4559	4513
5-letá	2828	2727	2700
10-letá	1400	1350	1336
25-letá	612	590	584
50-letá	261	252	249
100-letá	65	63	62
200-letá	33	32	32

Tab. 7.1 se týká primárně škod v rezidenčním bydlení v důsledku povodní. Čísla by mohla naznačovat, že obyvatelé primárně zachraňují vlastní životy a také předměty, které ale nutně nemusí mít s sebou spojenou vysokou finanční hodnotu – mohou mít ale vysokou citovou hodnotu, což se ale ve statistikách neprojeví.

Čísla z Velké Británie nejsou přímo přenositelná do podmínek ČR z řady důvodů: životní standard je odlišný, stejně jako zvyklosti s ohledem na nakládání s tímto typem informací. V obecné rovině lze ale říci, že varování je tím účinnější, čím je včasější. V tomto ohledu ale platí zákon klesajícího mezního užítka - s každou další jednotkou, v tomto případě času, klesá schopnost realizovat další efektivní opatření.

Jednoduše si to lze představit na příkladu varování před povodní, v případě že varování je realizováno těsně před příchodem povodňové vlny - obyvatelstvo může udělat pouze jednu věc a to evakuovat se ve snaze zachránit si život. V případě, že bude čas před příchodem povodňové vlny o něco delší (řekněme desítky minut), budou zachráněny také cennosti, umělecké předměty apod. Pokud budou k dispozici hodiny času, lze uvažovat o přesunu věcí např. elektroniky do vyšších pater apod.

Tato opatření jsou ale poměrně rychlá a když je vyčerpáme tak co dál? Můžeme realizovat opatření, která budou chránit budovy jako takové? Pokud ano, pak je to cesta k dalšímu snižování škod. Zároveň ale jsou obvykle vyžadována opatření jako realizace improvizovaných hrází, které neorganizovaně, na úrovni jednotlivců prakticky nelze realizovat.

Alternativní pohled popisuje Penning-Rowell et al. [77] na bázi průzkumů realizovaných ve Velké Británii v průběhu 70. let. Výzkum byl realizován formou řízených rozhovorů s 1200 respondenty.

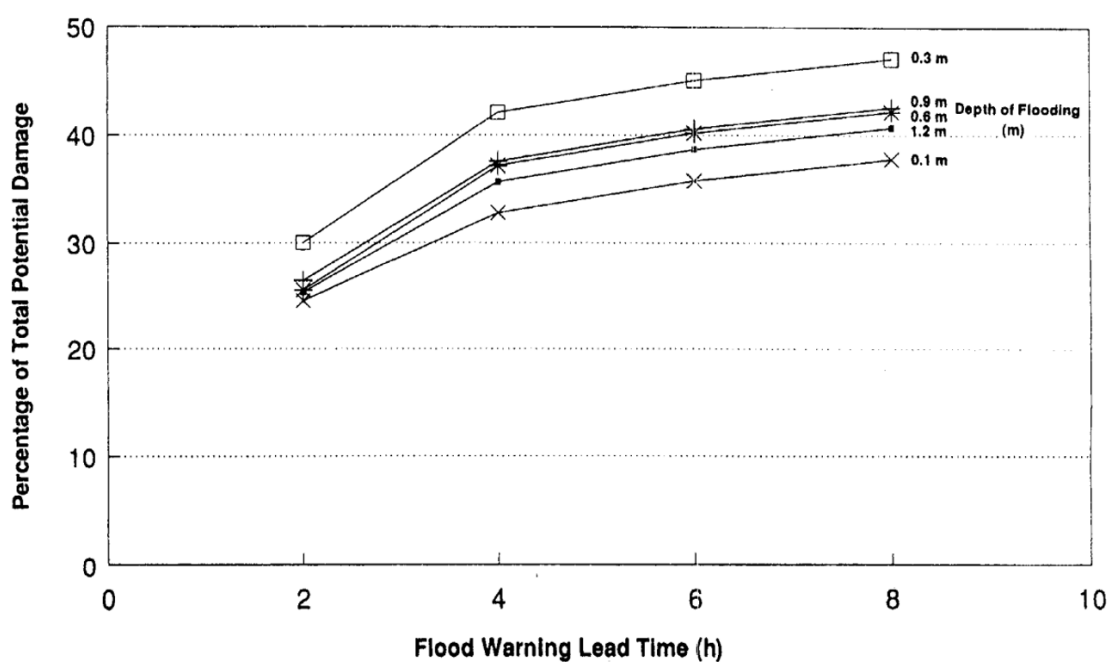
Formální vyjádření je obdobně jako v případě (7.2):

$$FDA = PFA \cdot R \cdot PRA \cdot PHR \cdot PHE \quad (7.2)$$

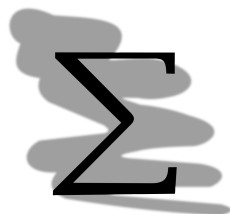
Kde  $FDA$  jsou odhadované škody vyvolané povodní, kterým se podařilo vyhnout v důsledku varování,  $PFA$  jsou potenciální škody způsobené povodní, kterým se je možné vyhnout (škody na budovách a vozidlech),  $R$  je spolehlivost procesu varování (např. ve smyslu podílu ohrožené populace, která je v dostatečném předstihu varována),  $PRA$  je podíl rezidentů, kteří mohou na varování reagovat,  $PHR$  je podíl domácností schopných reagovat na varování,  $PHE$  je podíl domácností, které reagují efektivně.

Z průzkumu vyšla jako dominantní kombinace  $PRA$ ,  $PHR$  a  $PHE$  zodpovědná za přibližně 70 % škod, následné výzkumy zaměřené na zpřesnění faktorů ale reportovaly mnohem větší rozptyl hodnot, konkrétně 0,55, 0,75 a 0,7, což vede na kombinovanou hodnotu 0,29 (což je výrazně méně než původně odvozená hodnota 0,7).

Na obr. 7.1 je pak znázorněn odhad závislosti výše škod, kterým se je možno vyhnout a doby varování.



Obrázek 7.1: Odhad závislosti výše škod, kterým se je možno vyhnout a doby varování (převzato z [77])



### Shrnutí

Jedním ze základních prostředků jak omezit škody je připravit se na příchod mimořádné události a zrealizovat opatření k minimalizaci škod. Aby se tak mohlo stát musí se potenciálně ohrožení dozvědět včas o hrozbě, na kterou se mají připravit. **Varování** je tak účinným prostředkem pro aktivaci preventivních opatření na straně jednotlivců.

Z hlediska možnosti odhadu efektů varování je většina výpočtů založena na pravděpodobnostním modelu specifikujícím procento lidí, kteří „zachytí“ varování, porozumí mu a jsou schopni na ně efektivně reagovat. Přitom platí, že varování je vysoce účinné z pohledu ochrany životů a zdraví, z hlediska minimalizace materiálních škod způsobených mimořádnými událostmi je situace složitější. Platí, že čím delší je doba mezi varování a příchodem **mimořádná událost (MU)** tím větší je prostor pro realizaci ochranných opatření.

Portfolio opatření, které mohou jednotliví občané realizovat je ale omezené a tak uchráněné škody s tímto časem nerostou lineárně.



### Kontrolní otázky

1. Co je varování a jaký je jeho účel?
2. Jak je systém varování realizován v ČR? (opakování z předmětu *Ochrana obyvatelstva*)
3. Vysvětlete pravděpodobnostní model uchráněných škod v důsledku včasného varování.
4. Vysvětlete zákon klesajícího mezního užítku.



## Kapitola 8

# Riziko - integrace různých scénářů MU



### Průvodce studiem

V této kapitole přejdeme od posuzování následků jednotlivých případů **MU** k pohledu na tyto události případy náhodného jevu následujícího určité rozdělení pravděpodobnosti. Tento pohled pak využijeme pro specifikaci rizika.



### Čas pro studium

Tato kapitola je na jedné straně krátká, na druhé straně některé její části nejsou úplně intuitivní. Na prostudování této kapitoly si proto vyčleňte delší čas, zejména pokud si nejste jisti v matematice - konkrétně v integrálním počtu.

V této kapitole navážeme na naše poznatky o mimořádných událostech jako případech náhodného jevu, kterými jsme se zabývali v kapitole věnované *křivkám poškození*. Z tohoto pohledu je např. povodeň případem jediné náhodného jevu, jehož intenzita se řídí patřičnou distribucí. Pro pochopení možných následků tak není korektní posuzovat izolovaně jednotlivé výskyty tohoto jevu např. pro povodně uvažovat samostatně povodně charakterizované průtokem  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ , apod.

Scénáře událostí definované podobně jako např. povodně s různou frekvencí návratu je proto interpretačně výhodnější spočítat z hlediska rizika společně na základě křivky překročení škod  $D(p)$ , viz obr. 8.1.

Křivky tohoto typu označujeme jako křivky překročení škod. V angličtině se používá označení **Exceedance Probability (EP)** křivky. Společně s křivkami fragility a zranitelnosti nám EP křivky dotvářejí pohled na následky mimořádných událostí.

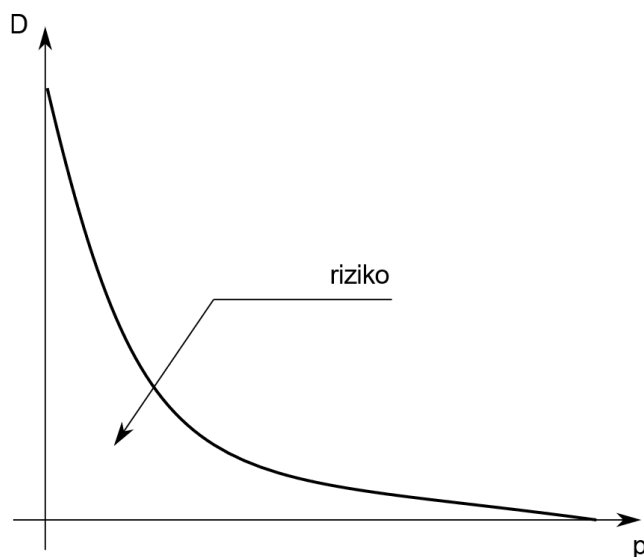
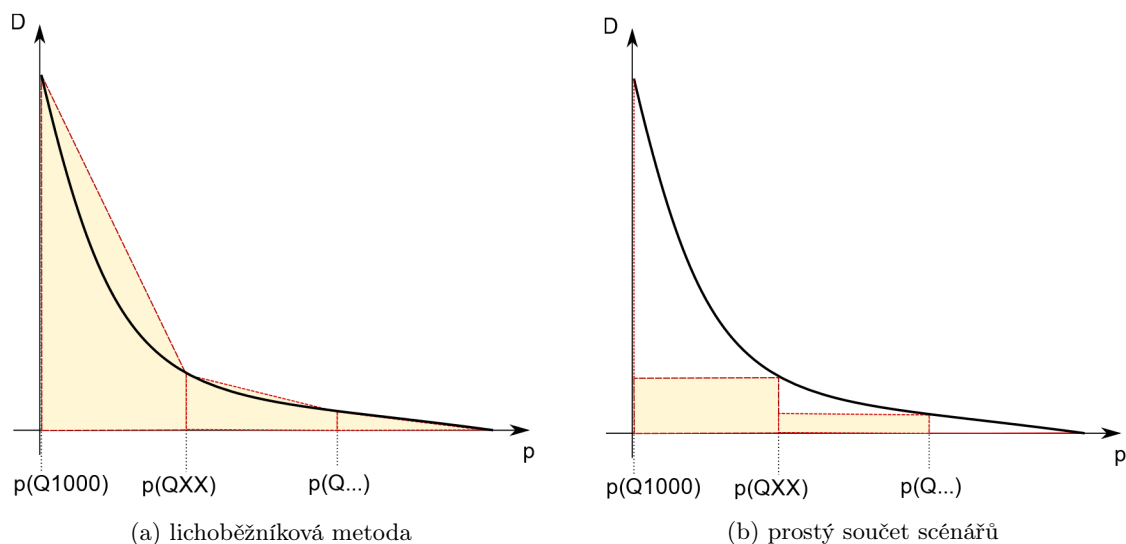
Celková hodnota rizika spojeného s uvažovanými scénáři je vypočitatelná podle vzorce (8.1).

$$R = \int_0^{p_H} D(p) dp \quad (8.1)$$

Pravděpodobnost lze pro dostatečně velké frekvence návratu  $N \geq 5$  vypočítat:  $p \approx 1/N$ .

Při výpočtech rizika pracujeme v případě mimořádných událostí prakticky výhradně s empiricky získanými daty - tedy daty popisujícími v minulosti proběhlé děje, pro které již byly vyčísleny škody. Tímto způsobem nám vznikají datové body na křivce charakterizující riziko.

Integrál samotný pak logicky nemůžeme počítat analytickými metodami ale metodami numerickými. Zmínit lze např. *lichoběžníkovou metodou*, kdy výpočet škod pro jednotlivé scénáře při průtocích např.  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$  apod. poslouží jako body, kterými se křivka škod aproximuje. Vizually je toto znázorněno na obr. 8.2a.

Obrázek 8.1: Křivka překročení škod  $D(p)$ 

Obrázek 8.2: Aproximace křivky překročení škod - lichoběžníková metoda vs prostý součet scénářů

Výpočet pomocí lichoběžníkové metody lze aproximovat rovnicí (8.2):

$$R = \sum_{k=1}^p \frac{D(p_{k+1}) + D(p_k)}{2} |p_{l+1} - p_k| \quad (8.2)$$

Pokud by výše uvedený postup nebyl použit a jednotlivé hodnoty škod  $D$  s k nim příslušející pravděpodobnosti byly prostě sečteny, pak by výpočet vizuálně odpovídal spíše obr. 8.2b.

Jak je patrné z obr. 8.2 může vést takový přístup k silnému podcenění škod, což je silně nežádoucí. Alternativně je možno hodnotu  $R$  vypočítat také jinými numerickými metodami určenými k integraci.

Výše uvedený postup je pak univerzálně použitelný.

A large, stylized, black letter 'P' with a shadow effect, positioned to the left of the main text.

### Místo shrnutí

Tato kapitola je příliš krátká na to, abychom zde vkládali shrnutí. Místo toho je potřeba abyste výše uvedený koncept vstřebali.

Zkuste spočítat riziko pro křivku překročení škod definovanou body:

- $Q_5 = 5$
- $Q_{10} = 8$
- $Q_{25} = 16$
- $Q_{50} = 35$
- $Q_{1000} = 100$



## Kapitola 9

# Pohyb ostatních hmot



### Průvodce studiem

V předchozích kapitolách jsme se již zabývali nejtýpčtějším představitelem scénářů pohybu hmot v prostředí - povodním. Povodně jsou však natolik časté a ničivé, že jejich popsání si vyžádalo samostatnou kapitolu. V této kapitole se proto zaměříme na ostatní scénáře, které řadíme do modelování pohybu hmot.

Především se jedná o

- sesuvy půdy,
- sněhové laviny,
- tok trosek,
- pád kamení.



### Čas pro studium

Tato kapitola je poměrně obsáhlá a zaměřuje se na řadu nesouvisejících jevů. Studium proto bude náročnější - vyčleňte si 2 - 4 hodiny času.

Výše uvedené scénáře mají společné dvě věci - škody jsou způsobeny pohybem určitého média ať už je to půda, kamení nebo třeba sníh a zároveň se jedná o scénáře, se kterými se sice můžeme setkat v praxi, frekvence jejich výskytu je ale výrazně nižší než v případě povodní. Dostupné datové sady jsou tak dostatečně rozsáhlé, aby umožnily vytvořit prvotní modely škod těchto jevů, avšak nejsou natolik rozsáhlé, aby je bylo možné přenášet mezi různými státy (oblastmi), tedy aniž by utrpěla vypovídající schopnost modelů.

Proto prosím berte modely představované touto kapitolou spíše z pohledu možné struktury vlivů, ze kterých je možno odvozovat škody a také přístupu, jakým jsou tyto škody modelovány.

## 9.1 Sesuvy půdy

*Sesuvy půdy*, někdy též označované jako svahové pohyby nebo svahové pochody, označují situaci, kdy proběhne relativně rychlý krátkodobý pohyb hornin ve svahu. Existuje řada důvodů takových pohybů - od morfologické situace stavu až po vnější vlivy jako jsou např. otřesy vyvolané prací v lomu, silné srážky, zemní práce v předpolí svahu.

Jedním z nejničivějších sesuvů, tedy alespoň finančně, byl sesuv svahu na přibližně 200 metrů dlouhý úsek takřka hotové dálnice D8 v roce 2013 u Litochovic, viz obr. 9.1. Následky tohoto sesuvu byly odstraňovány více než 3 roky a vyžádaly si opětovnou výstavbu dálnice v daném úseku včetně realizaci dalších dodatečných opatření proti obdobným sesuvům.

Železniční trať, která byla v horní části svahu pak dosud nebyla (psáno v roce 2020) obnovena.

V prostředí ČR existuje *Registr svahových nestabilit* udržovaný Českou geologickou službou – Geofondem. Jednotlivé záznamy jsou pak dostupné v databázi svahových nestabilit České geologické



Obrázek 9.1: Sesuv svahu na dálnici D8 u Litochovic v roce 2013 (převzato z [8])

služby [114] pomocí webového rozhraní.

Existuje celá řada postupů a modelů, pomocí kterých lze následky sesuvu půdy kvantifikovat. Na následujících stránkách se seznámíme s některými z nich.

### 9.1.1 Model Kherkheulidze, Armanini a zjednodušený model závislosti škod na relativní intenzitě sesuvu

Pro sesuvy půdy, popř. různé typy následků způsobující se pohybujícími troskami existují různé empirické modely. Jako všechny empirické modely i tyto jsou založeny na datech získaných z existujících sesuvů půdy a škod, které vyvolaly. Pro použití těchto modelů platí z hlediska interpretace a také zdroje chyb stejná pravidla jako pro modely např. škod způsobených povodněmi nebo zemětřeseními.

Např. Kherkheulidze [54] navrhuje jako indikátor škod průměrný tlak vytvořený nárazem tekoucích trosek do překážky (např. budovy), viz vzorec (9.1).

$$P = 0,1\rho_d g(5h + v^2) \quad (9.1)$$

Kde  $P$  je průměrný tlak [ $kN/m^2$ ],  $\rho_d$  je hustota toku trosek [ $kg/m^3$ ],  $g$  je konstanta gravitačního zrychlení [ $m/s^2$ ],  $h$  je hloubka toku [ $m$ ] a  $v$  je rychlost toku [ $m/s$ ].

Armanini et al. [5] formuluje model (9.2) odlišně na základě kombinace údajů shromážděných z provedených experimentů a teoretických poznatků. Dynamickou síla dopadu vyjadřuje hydrostatickým tlakem  $P_{df}$ .

$$P_{df} = 4,5\rho_d g h^2 \quad (9.2)$$

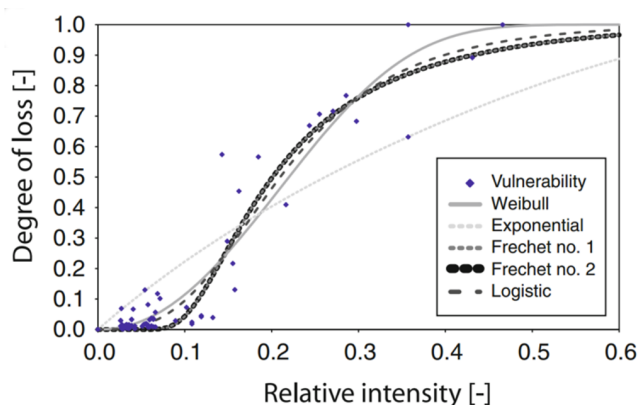
Armanini et al. [?] stejně jako Hungr et al. [42] poskytují podrobnější přehled dalších vlastností těchto událostí, které mohou být relevantní pro odhad škod. Pro odhad škod samotných mohou být použity, podobně jako v případě povodní, křivky závislosti poškození na zvoleném faktoru - tedy *křivky zranitelnosti*. Určité úspěchy byly také dosaženy konstrukcí indexu intenzity toku trosek (viz např. Jakob et al. [47]). Index relativní intenzity  $I_R$  (9.3) je pak definován jako poměr výšky depozitu trosek  $I$  a výšky postižené budovy  $H$ .

$$I_R = \frac{I}{H} \quad (9.3)$$

Totschnig et al. [90] zobecnil data o vlivu výšky nesených trosek a procenta škod na objektu. Ve studii byla testována různé možné distribuce dat, jako nejlepší Totschnigovi vyšlo Weitbulovo rozdělení s regresní křivkou (9.4). Graficky je pak regresní model znázorněn na obr. 9.2.

$$V_E = 1 - \exp\left(-0,463 \left(\frac{I_R + 1,442}{1,442} - 1\right)^{2,233}\right) \quad (9.4)$$

Kde  $V_E$  je ekonomická zranitelnost a  $I_R$  pak relativní intenzita působení toku hmot na budovu vypočtená dle vzorce (9.3).

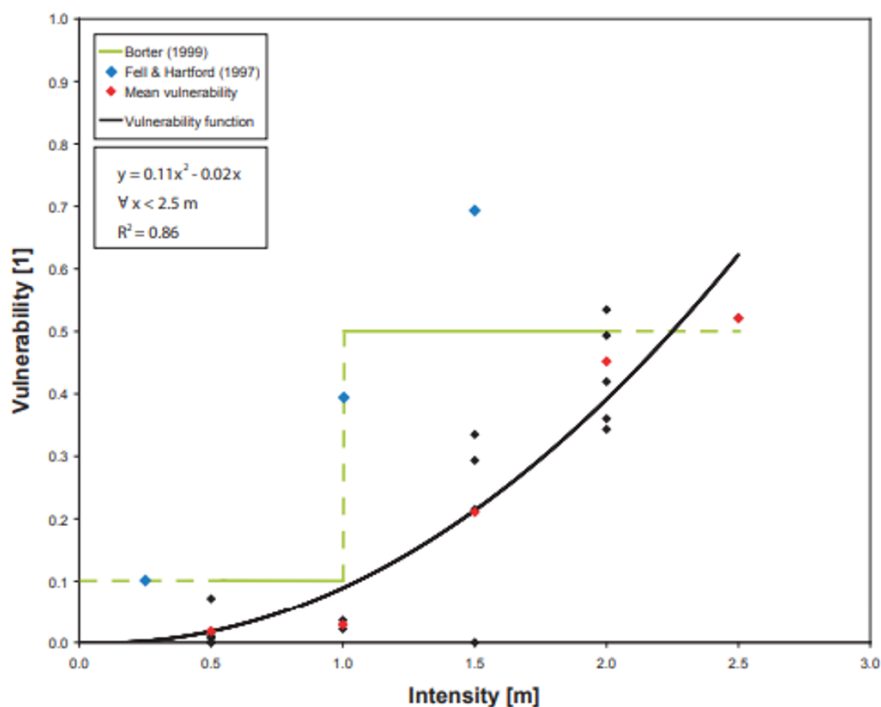


Obrázek 9.2: Závislost poškození budov na výšce toku materiálu na budovu působící (převzato z Totschnig et al. [90])

Fuchs et al. [32] odvodil empiricky funkci závislosti výše ztrát na hloubce toku trosek, viz obr. 9.3. Funkci odvodil až do hloubky 2,5 m. Vzhledem k charakteru křivky pro vyšší úrovně toku předpokládá prudký nárůst škod směrem k úplné ztrátě. Rovnice odvozené křivky je dostupná v (9.5).

$$y = 0,11x^2 - 0,02x \tag{9.5}$$

Kde  $x$  je intenzita vyjádřená hloubkou depozitu trosek [m],  $y$  je pak hodnota zranitelnosti v intervalu 0 - 1, kde 1 znamená úplnou ztrátu a 0 pak absenci škod.



Obrázek 9.3: Závislost výše ztrát na hloubce toku trosek (převzato z [32])

### 9.1.2 Zjednodušený model nebezpečí sesuvu

Je však potřeba poznamenat, že množina dat, se kterými se pracuje pro odhady následků proudu hmot je podstatně menší než v případě povodní. Použití modelů proto může vyžadovat přijetí určitých předpokladů, které mohou, ale nemusí být splněny v uvažovaném scénáři události.

Pro mapu výpočet nebezpečí je možno provést hrubý odhad [70] na základě vzorce (9.6).

$$H = S_r S_l S_h (T_s + T_p) \quad (9.6)$$

Kde  $H$  je nebezpečí,  $S_r$  je faktor sklonu viz tab. 9.1,  $S_l$  je faktor geologických podmínek,  $S_h$  je faktor popisující půdní vlhkost,  $T_p$  je srážkový faktor a  $T_s$  popisuje seismické podmínky.

Tabulka 9.1: Kategorizace dat o sklonu - faktor sklonu  $S_r$  (převzato z [70])

Sklon (stupně)	Klasifikace	$S_r$
0 - 1	velmi nízký	0
1 - 8	nízký	1
8 - 16	mírný	2
16 - 32	střední	3
> 32	velký - velmi velký	4

Faktor  $S_r$  je možno odvodit buďto z topografie terénu z běžně dostupných GIS vrstev, pro ČR např. ZABAGED, nebo je možno použít celosvětově dostupný dataset SRTM3 [71], který vytvořila NASA v rozlišení přibližně 90m.

Faktor geologických podmínek  $S_l$  je možno odvodit z geologických map. Základní informace může poskytnout také General geologic map of the world [33]. Koeficient  $S_l$  je pak možno odvodit z tab. 9.2.

Tabulka 9.2: Koeficient  $S_l$  – geologické podmínky (převzato z [70])

Geologie	Náhylnost	$S_l$
Extruzivní vulkanické horniny - prekambrie, proterozoika, paleozoika a archeanu	nízká	1
Endogenní horniny (plutonické a nebo metamorfované) - prekambrikové, proterozoické, paleozoika a archeanu		
Staré sedimentární horniny - prekambrie, archean, proterozoika, paleozoika	mírná	2
Extruzivní vulkanické horniny - paleozoické, mezozoické		
Endogenní horniny - paleozoické, mezozoické, triasové, jurské, křídové		
Sedimentární horniny - paleozoické, mezozoické, triasové, jurské, křídové	střední	3
Extruzivní vulkanické horniny - mezozoické, triasové, jurské, křídové		
Endogenní horniny - mezozoikum, kenozoikum		
sedimentární horniny - kenozoikum, kvartérní	vysoká	4
Extruzivní vulkanické horniny - mezozoikum		
Extruzivní vulkanické horniny - kenozoikum	Velmi vysoká	5

Informace o vlhkosti jsou také dostupné globálně, viz např. [15]. V tab. 9.3 je  $S_h$  odvozeno na základě indexu Willmotta a Feddema [104].

Tabulka 9.3: Koeficient  $S_h$  – půdní vlhkost (převzato z [70])

Index vlhkosti [104]	Náhylnost	$S_h$
-1 až -0,6	nízká	1
-0,6 až -0,2	mírná	2
-0,2 až 0,2	střední	3
0,2 - 0,6	vysoká	4
0,6 - 1	velmi vysoká	5

Srážkový faktor  $T_p$  je odvozen na základě extrémních měsíčních srážkových úhrnů za 100 let [mm]. Samotná studie [70] ale použila pouze 17 let a k odhadu extrémů pak použila Gumbelovo rozdělení pravděpodobnosti.

Místní faktory  $T_p$  by musely být odvozeny na základě dlouhodobých měření z lokálních meteorologických stanic.

Faktor spuštění sesuvu seismickou činností  $T_s$  se odvozují na základě PGA s frekvencí návratu přibližně 500 let (konkrétně 475 let). Údaje je možno převzít např. z výsledků projektu GSHAP z let 1992 - 1999 [30] a hodnotu parametru odečíst z tab. 9.5.



Tabulka 9.4: Koef.  $T_p$  – srážkový faktor [70])

Extrémní měsíční srážkový úhrn za 100 let [mm]	Náchylnost	$T_p$
0 - 330	nízká	1
331 - 625	mírná	2
626 - 1 000	střední	3
1 001 - 1 500	vysoká	4
> 1 500	velmi vysoká	5

Tabulka 9.5: **GSHAP**  $PGA_{475}$  kategorizované do desíti tříd (převzato z [70])

$PGA_{475}$ [ $m/s^2$ ]	$T_s$
0 - 0,5	1
0,51 - 1	2
1,01 - 1,5	3
1,51 - 2	4
2,01 - 2,5	5
2,51 - 3	6
3,01 - 3,5	7
3,51 - 4	8
4,01 - 4,5	9
4,51	10

Výsledná hodnota  $H$  je pak klasifikována podle tab. 9.6.

Tabulka 9.6: Klasifikace potenciálního nebezpečí sesuvu  $H$  (převzato z [70])

Hodnota $H$	Třída	Klasifikace	Přibližná roční frekvence v gridu 1 $km^2$
< 14	1	zanedbatelné	0
15 - 50	2	velmi nízké	zanedbatelná
51 - 100	3	nízké	Velmi malá
101 - 168	4	nízké - mírné	malá
169 - 256	5	mírné	0,0025 - 0,01 %
257 - 360	6	střední	0,0063 - 0,025 %
361 - 512	7	střední - vysoké	0,0125 - 0,05 %
513 - 720	8	vysoké	0,025 - 0,1 %
> 720	9	velmi vysoké	0,05 - 0,2 %

### 9.1.3 Model zranitelnosti sesuvy

Model zranitelnosti proti účinkům sesuvům půdy vyvinul také Uzielli et al. [98], viz vzorec (9.7)

$$V = I \cdot S \tag{9.7}$$

Kde  $V$  je zranitelnost,  $I$  je intenzita sesuvu a  $S$  je citlivost ohrožených prvků na účinky sesuvu. Všechny tyto parametry se udávají v intervalu 0 - 1.

Model náchylnosti ke škodám  $S$  je pak zachycen ve vzorci (9.8).

$$S = 1 - \prod_{i=1}^{n_s} 1 - \xi_i \tag{9.8}$$

Kde  $\xi_i$  je  $i$ -tý faktor náchylnosti ke škodám, každý v intervalu 0 - 1. Existuje řada přístupů identifikujících různé faktory přispívající k citlivosti jednotlivých typů chráněných zájmů. Pro budovy ( $S_{STR}$ ) jsou definovány následující faktory:

1. struktura-morfologie typu budovy  $\xi_{STY}$
2. stav údržby  $\xi_{SMN}$
3. Strategická relevance

Pro obyvatelstvo ( $S_{PSN}$ ):

1. věk
2. kapacita k předpovědi sesuvu půdy

Pro přepravní infrastrukturu:

1. strukturální infrastruktura
2. stav údržby
3. strategická relevance

Pro environment:

1. funkce (ochranná, produktivní, rekreační)
2. sensitivita a vzácnost

Z výše uvedených faktorů pak Uzielli a kol. [98] vybírají některé, pro které specifikují hodnoty.

Tabulka 9.7: Faktor  $\xi_{STY}$  pro různé stavebních struktur (převzato z [98])

Typologie stavebních struktur	Odolnost	$\xi_{STY}$
Lehké, jednoduché struktury	žádná	1
Lehké struktury	velmi nízká	0,9
Kameny, beton a dřevo	nízká	0,7
Cihly, betonové struktury	střední	0,5
Zpevněné betonové struktury	vysoký	0,3
Zpevněné struktury	velmi vysoká	0,1

Faktor citlivosti na stav údržby budovy v tab. 9.8 funguje jako redukční faktor vyjadřující redukovanou kapacitu budovy odolat účinkům sesuvu ve srovnání s velmi dobrou úrovní údržby.

Tabulka 9.8: Faktor  $\xi_{SMN}$  pro stav údržby budovy (převzato z [98])

Stav údržby	$\xi_{SMN}$
velmi špatný	0,5
špatný	0,4
střední	0,25
dobrý	0,1
velmi dobrý	0

Pro budovy bude pak výpočet na základě vzorce (9.8) vypadat následovně (9.9):

$$S_{STR} = 1 - (1 - \xi_{STY})(1 - \xi_{SMN}) \quad (9.9)$$

Pro obyvatelstvo je určující hustota zalidnění  $\xi_{SMN}$ , viz obr. 9.4, matematicky pak vzorcem (9.10), příjem  $\xi_{GDP}$ , viz obr. 9.5 a vzorec (9.11), konečně citlivost obyvatelstva z hlediska věku je zachycena v tab. 9.9. Celkový výpočet v intencích vzorce (9.8) je zachycen v (9.12).

$$\xi_{PDN} = \begin{cases} 0,1D_P^{0,25} & \text{pro } D_P \leq 10000 \\ 1 & \text{pro } D_P > 10000 \end{cases} \quad (9.10)$$

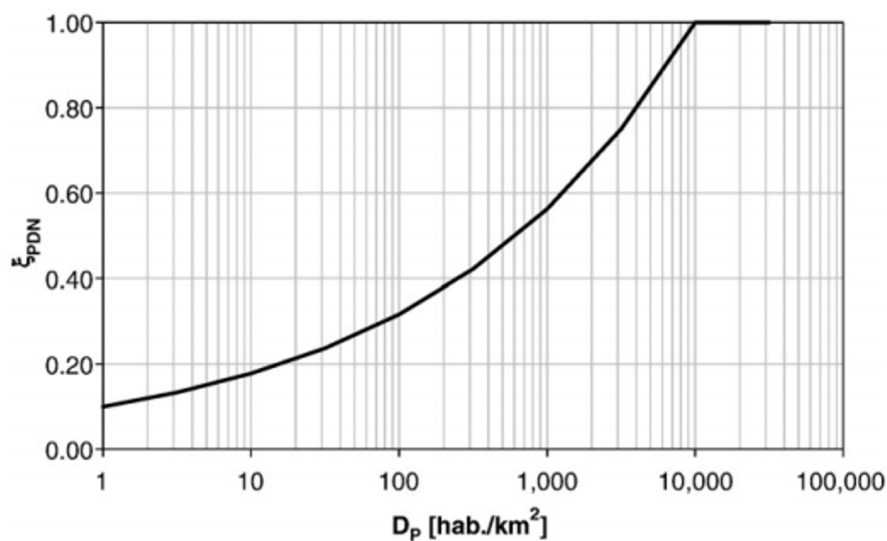
Kde  $D_P$  je hustota zalidnění na  $km^2$ .

$$\xi_{GDP} = \begin{cases} 0,95 - 0,9 \left(\frac{GDP_c}{10000}\right)^{1,4} & \text{pro } GDP_c \leq 10000 \\ 0,05 & \text{pro } GDP_c > 10000 \end{cases} \quad (9.11)$$

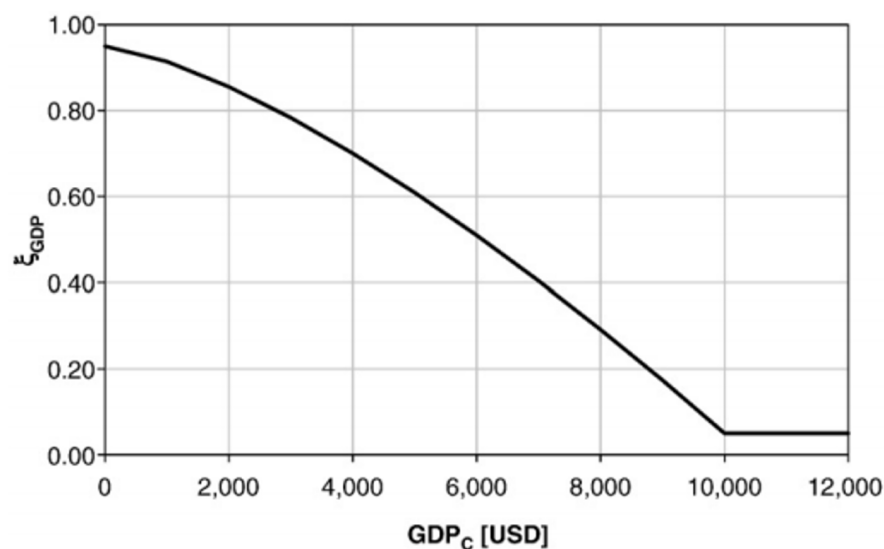
$$S_{PSN} = 1 - (1 - \xi_{PDN})(1 - \xi_{GDP})(1 - \xi_{AGE}) \quad (9.12)$$

Uvedený model je možno doplnit ještě o faktor citlivosti obyvatelstva uvnitř budov  $S_{PST}$  spočteného pomocí vzorce (9.13) a obr. 9.6.

$$S_{PST} = S_{STR}^{3,2} \quad (9.13)$$



Obrázek 9.4: Faktor citlivosti na hustotu populace (převzato z [98])



Obrázek 9.5: Faktor citlivosti výše příjmu (převzato z [98])

Intenzitu je pak možno vypočítat pomocí vzorce (9.14).

$$I = k_S(r_K I_K + r_M I_M) \quad (9.14)$$

$$k_S = \frac{A_i}{A_t} \quad (9.15)$$

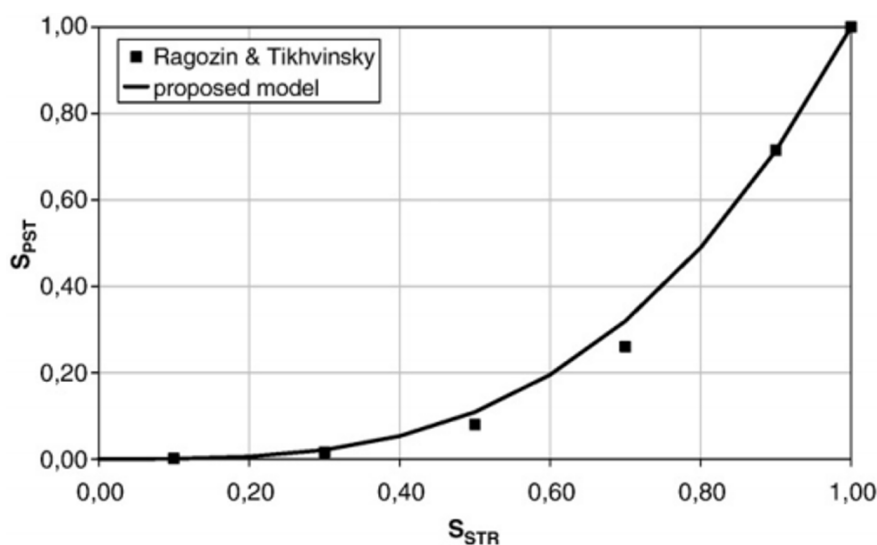
$$r_K + r_M = 1 \quad (9.16)$$

Kde  $I$  je intenzita sesuvu,  $k_S$  je prostorový poměr dopadu, viz 9.15),  $A_i$  je plocha odpovídající kategorii, která je postižena sesuvem,  $A_t$  je pak celková plocha odpovídající dané kategorii,  $r_K$  je faktor kinetické relevance kategorie,  $r_M$  je faktor kinematické relevance kategorie,  $I_K$  je parametr kinetické intenzity kategorie a  $I_M$  je parametr kinematické intenzity kategorie.

Pro odhad koeficientů  $r_K$  a  $r_M$  je možno použít tab. 9.10.

Tabulka 9.9: Faktor citlivosti pro průměrný věk populace  $\xi_{AGE}$  (převzato z [98])

Průměrný věk populace [roky]	$\xi_{AGE}$
0 - 5	1
5 - 10	0,9
10 - 15	0,7
15 - 20	0,3
20 - 50	0
50 - 55	0,1
55 - 60	0,3
60 - 65	0,5
65 - 70	0,7
70 - 75	0,9
>75	0,95



Obrázek 9.6: Model citlivosti obyvatelstva uvnitř budov (převzato z [98])

Parametr kinetické intenzity  $I_K$  je možno spočítat podle vzorce (9.17) a obr. 9.7.

$$I_K = \begin{cases} 0 & \text{pro } C < 5 \cdot 10^{-7} \\ 0,1(\log_{10}(C) + 6,3) & \text{pro } 5 \cdot 10^{-7} \leq C \leq 5 \cdot 10^3 \\ 1 & \text{pro } C > 5 \cdot 10^3 \end{cases} \quad (9.17)$$

Kde  $C$  je rychlost pohybu sesuvu (mm/s) v místě dopadu.

Parametr kinematické intenzity  $I_M$  je pak možno vypočítat pomocí vzorce (9.18) a obr. 9.8.

$$I_M = \begin{cases} \frac{2D_G^2}{D_{G,t}^2} & \text{pro } \frac{D_G}{D_{G,t}} < 0,5 \\ 1 - \frac{2(D_{G,t} - D_G)^2}{D_{G,t}^2} & \text{pro } 0,5 \leq \frac{D_G}{D_{G,t}} \leq 1 \\ 1 & \text{pro } \frac{D_G}{D_{G,t}} > 1 \end{cases} \quad (9.18)$$

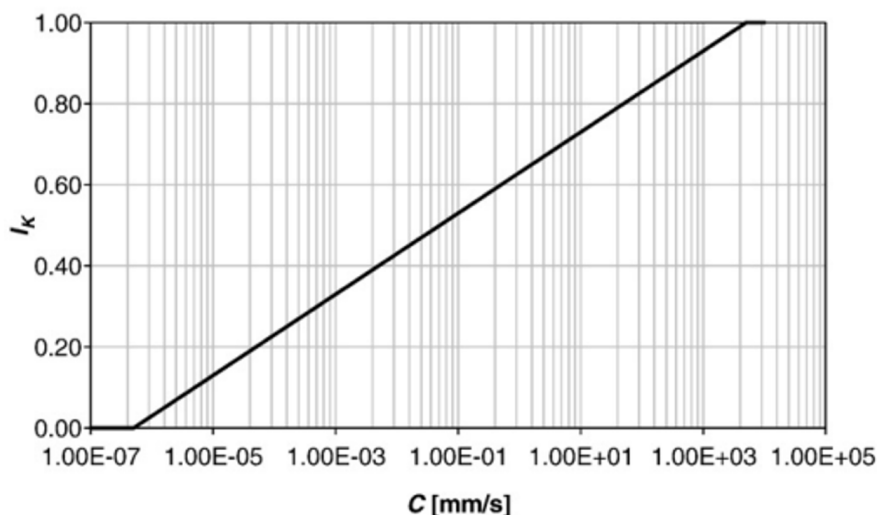
Kde  $D_G$  je absolutní hodnota posuvu (např. v mm) půdy a  $D_{G,t}$  je hraniční hodnota  $D_G$  (ve stejných jednotkách), po jejímž překročení je možno očekávat fyzické poškození nebo ztrátu funkcionality.

#### 9.1.4 Model závislosti zranitelnosti na intenzitě sesuvu

V pozdějších materiálech Uzielli a kol. [97] pracuje se zranitelností odlišným způsobem, viz vzorec (9.19). Tento postup filozoficky vychází z postupu představeného v předchozí podkapitole (konečně je

Tabulka 9.10: Možné hodnoty faktorů kinetické a kinematické relevance (převzato z [98])

Kategorie	Typ sesuvu	$r_K$	$r_M$
struktury	rychlý	0,9	0,1
struktury	pomalý	0,15	0,85
osoby	rychlý	0,75	0,25
osoby	pomalý	1	0



Obrázek 9.7: Model parametru kinetické intenzity  $I_K$  (převzato z [98])

od stejného autora), ale pracuje se zranitelností budov proti působení sil vyvolaných sesuvem půdy.

$$V = \begin{cases} \frac{2I^2}{\Omega^2} & \text{pro } \frac{I}{\Omega} < 0,5 \\ 1 - \frac{2(\Omega - I)^2}{\Omega^2} & \text{pro } 0,5 \leq \frac{I}{\Omega} \leq 1 \\ 1 & \text{pro } \frac{I}{\Omega} > 1 \end{cases} \quad (9.19)$$

Kde  $V$  je zranitelnost,  $I$  je parametr intenzity a  $\Omega$  je index resilience. Uzielli pracuje s veličinami  $I$  a  $\Omega$ , jako indexy v intervalu 0 - 1. Vykreslení funkce zranitelnosti  $V$  je pak dostupné pro různé hodnoty  $\Omega$  na obr. 9.9.

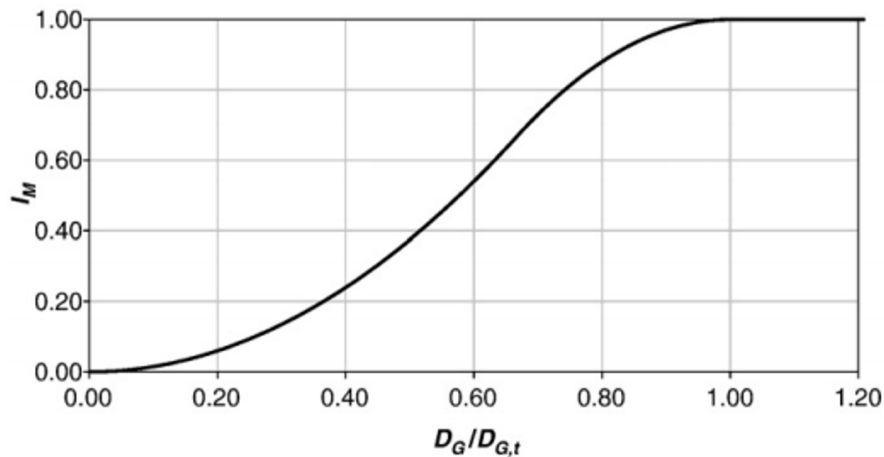
Hodnota  $I$  je definovaná jako posteriorní intenzita v místě hodnocení  $I_p$ , a je možno ji vypočítat pomocí vzorce (9.20). Posteriorní v tomto případě odkazuje ke specifickému datu - 13.12.1982, které dopovídá sesuvu půdy v Anconě, Itálie jako události a jejím následkům, na základě kterých se jednotlivé vztahy odvozovaly.

Vzorce jsou tak odvozeny na základě dat z jediné události. Pokud to porovnáme např. se vztahy v kapitolách o škodách vyvolaných povodněmi nebo působení větru - založených na datech za delší časové úseky a větší množství zaznamenaných událostí a jejich následků je jasně patrné, že přesnost předpovědí provedených na základě takových vzorců bude nutně nižší. Uvedené postupy jsou tak vhodné spíše pro hrubé odhady.

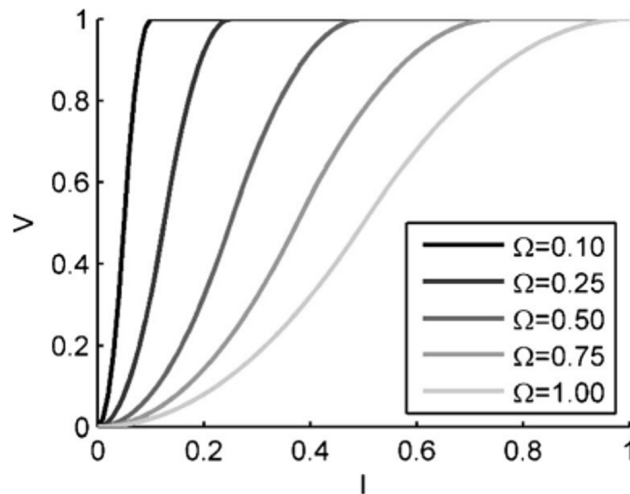
Zároveň k tomu lze poznamenat, že i přes tyto problémy se stále jedná o kvantitativní model, s popsanými statistickými vlastnostmi a to znamená, že i takto nepřesný model bude poskytovat podstatně přesnější výsledky než by třeba poskytly různé indexové metody založené na kvalitativním, popř. semi-kvantitativním modelu.

$$I_p = \begin{cases} \Omega \sqrt{\frac{V_p}{2}} & \text{pro } V_p \leq 0,5 \\ \Omega(1 - \frac{\sqrt{2-2V_p}}{2}) & \text{pro } V_p > 0,5 \end{cases} \quad (9.20)$$

$$V_p = \sum_{k=1}^m \epsilon_k \eta_k \Gamma_k \quad (9.21)$$



Obrázek 9.8: Model parametru kinematické intenzity  $I_M$  (převzato z [98])



Obrázek 9.9: Funkce závislosti zranitelnosti na intenzitě sesuvu (převzato z [97])

$$\eta_k = \frac{\psi_k}{\sum_{k=1}^m \psi_k} \quad (9.22)$$

$$\Gamma_k = 0,25(G_k - 1) \quad (9.23)$$

Kde  $I_p$  je posteriorní intenzita sesuvu,  $V_p$  je posteriorní zranitelnost,  $\Omega$  je index resilience,  $m$  je počet indikátorů zranitelnosti,  $\Gamma_k \in \langle 0; 1 \rangle$  je  $k$ -tý indikátor zranitelnosti,  $\psi_k \in \langle 0; 1 \rangle$  je koeficient relevance pro  $k$ -tý indikátor zranitelnosti,  $\epsilon_k$  je binární proměnná, která je rovna 0 pokud  $\psi_k \Gamma_k = 0$ , jinak je rovno 1.

Faktory zranitelnosti  $\Gamma_k$  jsou vypočítány konverzí indikátorů poškození  $G_k$  do intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ . Popis poškození způsobených sesuvem z roku 1982 byl právě realizován na škále 1 – 5.

Koeficienty relevance byly ve studii nastaveny na základě literatury, po konzultacích na místě a expertním odhadem. Očividně se tak bude jednat o váhu, která není nikterak přesně stanovena. Hodnoty použité ve studii jsou dostupné v tab. 9.11.

Index resilience je možno vypočítat podle vzorce (9.24).

$$\Omega = \sum_{j=1}^n \delta_j \rho_j \Theta_j \quad (9.24)$$

$$\rho_j = \frac{\varphi_j}{\sum_{j=1}^n \varphi_j} \quad (9.25)$$

Tabulka 9.11: Faktory relevance pro strukturální poškození budov v Anconě (převzato z [97])

	<b>Strukturální komponenta</b>	$\psi_k$
MS	hlavní konstrukce	1
FL	podlahy	0,9
PW	obvodové stěny	0,8
IW	vnitřní stěny	0,7
IS	vnitřní schodiště	0,6
ES	externí schodiště	0,3
RW	opěrné zdi	0,4

Kde  $n$  je počet indikátorů resilience,  $\Theta_j \in \langle 0; 1 \rangle$  je  $j$ -tý indikátor resilience,  $\varphi_j \in \langle 0; 1 \rangle$  je koeficient relevance pro  $j$ -tý indikátor resilience,  $\delta_j$  je binární proměnná, která je rovna 0 pokud  $\varphi_j \Theta_j = 0$ , jinak je rovno 1.

Z hlediska resilience byly v rámci studie brány v úvahu pouze vybrané faktory - především pak typ struktury (viz tab. 9.12), stáří budovy (viz tab. 9.13) a typ základů (viz tab. 9.14).

Tabulka 9.12: Typy struktur - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])

	<b>Typologie struktur</b>	$\Theta_{STY}$	$\varphi_{STY}$
1	kámen	0,3	1
2	tuff*	0,4	1
3	cihly	0,5	1
4	zpevněný beton	0,7	1
5	smíšené struktury	0,3	1
6	rekonstruované budovy		1

\* Tuff je stavební materiál vytvořený z sopečného popela. Tento typ materiálu je typický pro některé oblasti Itálie. V podmínkách ČR se ale tento materiál prakticky nevyužívá.

Tabulka 9.13: Stáří budovy - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])

	<b>Rok dokončení stavby</b>	<b>Stáří v okamžiku průřezu</b>	$\Theta_{AGE}$	$\varphi_{AGE}$
1	< 1900	> 85	0,2	0,8
2	1901 - 1943	42 - 84	0,4	0,8
3	1944 - 1962	23 - 41	0,7	0,8
4	1963 - 1971	14 - 22	0,8	0,8
5	1972 - 1985	< 13	0,9	0,8
6	není známo	není známo	0,2	0,8

Pro účely zkoumání intenzity využila studie pozorování posunu půdy. Empiricky tak byl odvozen model (9.26), který byl následně zobecněn do podoby referenčního modelu intenzity podle vzorce (9.27).

$$D_{Gp,tot} = \sqrt{D_{Gp,ver}^2 + D_{Gp,hor}^2} \tag{9.26}$$

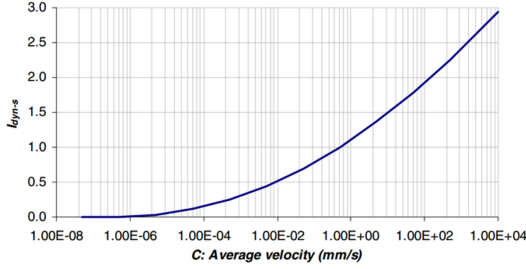
$$I = 0,22D_{Gtot}^{0,73} \tag{9.27}$$

Kde GP,ver a GP,hor představují pozorovaný vertikální a horizontální posun, Gp,tot je pak celková délka posunu. Ve své podstatě nejedná se o nic jiného než výpočet délky vektoru. Celková délka posunu je přitom určující pro odhad intenzity, nikoliv ale směru posunu.

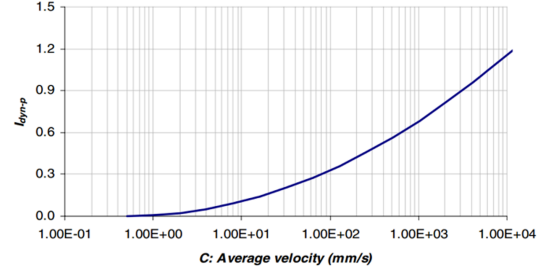
Výše uvedený způsob může představovat zajímavou možnost jak odvodit zranitelnost, zejména budov vůči svahovým pohybům.

Tabulka 9.14: Typ základů - studie sesuvu Ancona (převzato z [97])

	Typ základů	$\Theta_{BASE}$	$\varphi_{BASE}$
1	sokl	0,1	0,9
2	pásový základ	0,3	0,9
3	mat footing	0,5	0,9
4	piloty	0,7	0,9



(a) faktor dynamické intenzity pro budovy



(b) faktor dynamické intenzity pro osoby na volném prostranství

Obrázek 9.10: Dynamický model intenzity pro budovy a osoby ve volném prostranství (převzato z [57]).

### 9.1.5 Model zranitelnosti na základě rychlosti pohybu a odolnosti

Alternativní model formuloval Li a kol [57]. Model zranitelnosti je specifikován ve vzorci (9.28).

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \text{pro } \frac{I}{R} \leq 0,5 \\ 1 - \frac{2(R-I)^2}{R^2} & \text{pro } 0,5 < \frac{I}{R} \leq 1 \\ 1 & \text{pro } \frac{I}{R} > 1 \end{cases} \quad (9.28)$$

Kde zranitelnost  $V$  je definována jako funkce intenzity  $I$  a schopnosti odolat  $R$ .  $I$  v tomto případě jsou jednotlivé parametry modelu bez dimenzí, tedy v intervalu 0 - 1. Intenzita samotná je chápána jako funkce dynamického ( $I_{dyn}$ ) a geometrického faktoru ( $I_{gem}$ ) intenzity, viz (9.29).

Všimněte si také, že vzorec (9.28) je ve skutečnosti takřka totožný jako vzorec (9.19) s drobnými odchylkami v ohraničení intervalů a označením veličin. Jak uvidíme dále, způsob dalšího výpočtu se ale razantně liší.

$$I = f(I_{dyn}, I_{gem}) = \begin{cases} I_{dyn} I_{dpt} & \text{pro budovy v oblasti sesuvu} \\ I_{dyn} I_{dfm} & \text{pro budovy mimo oblast sesuvu} \end{cases} \quad (9.29)$$

Pro dynamický faktor intenzity existují generalizované křivky závislosti intenzity na průměrné rychlosti posuvu, viz obr. 9.10, vzorci (9.30) a (9.31).

$$I_{dyn-s} = \begin{cases} 0 & \text{pro } C \leq 5 \cdot 10^{-7} \\ \frac{1}{36} (\log_{10} C + 6, 3)^2 & \text{pro } C > 5 \cdot 10^{-7} \end{cases} \quad (9.30)$$

$$I_{dyn-p} = \begin{cases} 0 & \text{pro } C \leq 0,5 \\ \frac{1}{16} (\log_{10} C + 0, 3)^2 & \text{pro } C > 0,5 \end{cases} \quad (9.31)$$

Kde  $C$  je průměrná rychlost svaňových pohybu v (mm/s). Pro budovy je použita mezní rychlost  $5 \cdot 10^{-7}$  mm/s a pro osoby pak rychlost 0,5 mm/s. Hodnota  $5 \cdot 10^{-7}$  mm/s představuje mez pod jejíž úrovní se nepředpokládají jakékoliv škody na budovách, pro osoby pak hodnota 0,5 mm/s je považována za hodnotu pro účely modelu rovnu 0.

Geometrický faktor intenzity je závislý na hloubce zavalení pohybem hmot, viz (9.32).

$$I_{dpt} = 0,1 D_{dpt} \quad (9.32)$$

Kde  $I_{dpt}$  je faktor hloubky zasypání,  $D_{dpt}$  je hloubka zasypání (m).



Deformační faktor  $I_{dfm}$  je možno vypočítat dle vzorce (9.33).

$$I_{dfm} = \frac{D_S}{D_{S,T}} \quad (9.33)$$

Kde  $D_S$  je index posunu (displacement index) základů nebo budovy a  $D_{S,T}$  je hraniční hodnota po jejímž překročení lze předpokládat úplné zničení nebo ztrátu funkce budovy. Některé příklady jsou dostupné v tab. 9.15.

Tabulka 9.15: Příklady hraničních hodnot (převzato z [57])

deformace		Půda v základech	
		stř./málo stlačitelná	vysoce stlačitelná
zděné stavby	částečné vychýlení zákl.	0,002	0,003
1-podl. mont. stavba	usazení (mm)	120 (pro střední)	200
jednod.výškové domy	prům.usazení (mm)	200	
Běžné průmyslové budovy a budovy občanské vybavenosti			
- montované	vyrovnání nerovností	0,0027 l <sup>1</sup>	0,003 l
- zděný plášť budovy		0,0007 l	0,001 l
Výškové budovy			
$H_g^2 \leq 24$	naklonění	0,004	
$24 < H_g \leq 60$		0,003	
$60 < H_g \leq 100$		0,0025	
$H_g > 100$		0,002	
Mrakodrapy			
$H_g \leq 20$	vychýlení základů	0,008	
$20 < H_g \leq 50$		0,006	
$50 < H_g \leq 100$		0,005	
$100 < H_g \leq 150$		0,004	
$150 < H_g \leq 200$		0,003	
$200 < H_g \leq 250$		0,002	
Mrakodrapy			
$H_g < 100$	usazení základů	400	
$100 < H_g \leq 200$		300	
$200 < H_g \leq 250$		200	

<sup>1</sup> l v mm, vzdálenost mezi středy sousedících kup

<sup>2</sup>  $H_g$  je výška budovy nad zemí v m

Faktor odolnosti je počítána podobným způsobem jako v metodě Uzielli [97] (viz výše), s tím, že „směry“ indexů jsou upraveny pro trochu odlišný způsob nasazení v tomto modelu, viz (9.34).

$$R = \sqrt[n_s]{\prod_{i=1}^{n_s} \xi_i} \quad (9.34)$$

Kde  $\xi_i$  je  $i$ -tý, z celkového počtu  $n_s \geq 1$  faktorů odolnosti.

Faktory odolnosti pro budovy obsahují 4 hlavní charakteristiky:

- stavební materiál použitý pro vertikální nosné struktury ( $\xi_{sty}$ ) – tab. 9.17
- výška (počtem podlaží) ( $\xi_{sht}$ ) – tab. 9.18
- stáří (ve smyslu stavu údržby) ( $\xi_{smn}$ ) – tab. 9.16
- základy – ve smyslu hloubky ( $\xi_{sfd}$ ) – viz (9.36)

Odtud výpočet dle vzorce (9.35).

$$R_{str} = \sqrt[4]{\xi_{sfd}\xi_{sty}\xi_{smn}\xi_{sht}} \quad (9.35)$$

$$\xi_{sfd} = 0,05 + \sqrt[3]{\frac{D_{fod}}{10}} \quad (9.36)$$

Tabulka 9.16: Faktor odolnosti podle stavu údržby  $\xi_{smn}$  (převzato z [57])

Stav údržby	$\xi_{smn}$
velmi špatný	0,1
špatný	0,4
střední	0,8
dobrý	1,2
velmi dobrý	1,5

Tabulka 9.17: Faktor odolnosti podle typologie použité konstrukce  $\xi_{sty}$  (převzato z [57])

Typologie struktur	$\xi_{sty}$
nejlehčí konstrukce (jednoduché dřevěné konstrukce)	0,1
lehké konstrukce	0,2
smíšené konstrukce (beton a dřevo)	0,4
cihlové stěny, beton	0,8
zpevněný beton	1,3
zpevněné	1,5

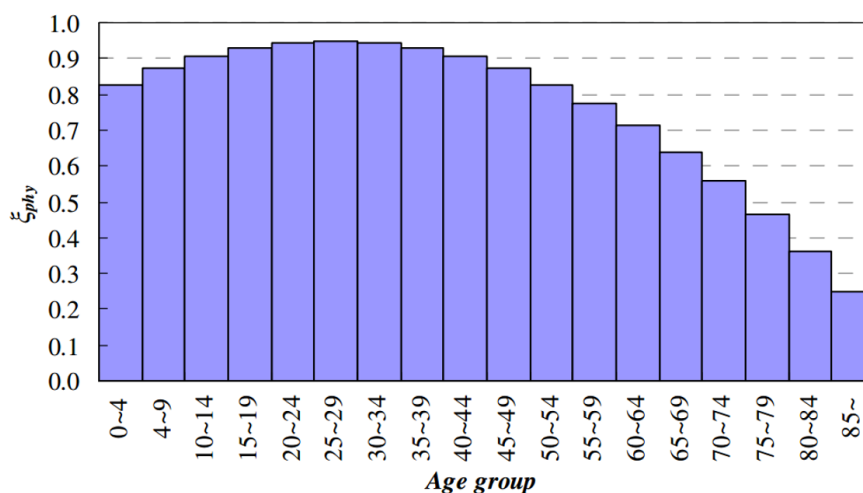
Kde  $D_{fod}$  je hloubka základů v metrech.

Faktor odolnosti pro osoby:

- fyzický faktor v závislosti na věku osob ( $\xi_{phy}$ ) – viz obr. 9.11 a vzorec (9.38)
- povědomí o riziku sesuvu ( $\xi_{kng}$ ) – tab. 9.19

Celkový výpočet pro osoby je pak realizován pomocí vzorce (9.37).

$$R_{per} = \sqrt{\xi_{phy}\xi_{kng}} \quad (9.37)$$

Obrázek 9.11: Fyzický faktor odolnosti osob v závislosti na věku  $\xi_{phy}$  (převzato z [57])

$$\xi_{phy} = 0,95 - 0,00486 \left( INT \left( \frac{a}{5} \right) - 5 \right)^2 \quad (9.38)$$

Kde  $INT()$  představuje operaci zaokrouhlení na celé číslo dolů,  $a$  je pak věk.

Studie Lie et al. [57] se zabývá taktéž problematikou odhadu charakteru zranění osob uvnitř budov v závislosti na vypočtené zranitelnosti budovy.

Předtím, než přejdeme na další skupinu škod, zastavme se ještě na chvíli u obr. 9.11. Tento obr. je zajímavý tím, že nám ilustruje širší koncept, který popisuje s věkem se měnící schopnost člověka odolávat/reagovat na negativní vlivy. Na obrázku je znázorněna fyzická odolnost vůči působení v tomto

Tabulka 9.18: Faktor odolnosti pro výšku  $\xi_{sht}$  (převzato z [57])

Výška	Počet podlaží	$\xi_{sht}$
jednopodlažní	1	0,1
nízké	2	0,4
středně vysoké	3 - 5	0,9
vysoké	6+	1,5

Tabulka 9.19: Faktor odolnosti podle povědomí o riziku sesuvu  $\xi_{kng}$  (převzato z [57])

Povědomí o sesuvu	$\xi_{kng}$
špatné	0,25
střední	0,6
silné	0,95

případě sesuvu půdy. Obdobný graf bychom ale mohli sestavit na prakticky všechny typy přírodních pohrom, ale také antropogenních mimořádných událostí.

Vývoj odolnosti, jako veličiny, by byl podobný. Odolnost s věkem nejprve stoupá - nejzranitelnější jsou z tohoto pohledu tak logicky malé děti. Všimněte si ale, že hodnota odolnosti je v tomto případě i pro tuto skupinu poměrně vysoká. To je způsobeno tím, že lze předpokládat zásah opatrovníka, nejčastěji rodiče, který dítěti pomůže.

Oproti tomu od přibližně 50 let začíná poměrně silná degradace fyzické odolnosti, která postupuje s přibývajícím věkem. Výše jednotlivých sloupců přitom poskytuje pohled na „průměrného“ zástupce věkové skupiny. Na úrovni jednotlivců se ale reálná odolnost může výrazně lišit oběma směry. Mohou tak existovat „zdatní“ sedmdesátníci a naopak „málo“ odolní třicátníci, např. vlivem úrazu nebo nemoci, apod.



#### Faktor odolnosti

Zkuste zkonstruovat podobný graf, jako je na obr. 9.11 pro závislost schopnosti přežít infekci COVID-19 na věku. Ke konstrukci použijte data dostupná ze stránek MZDR: <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19>.

Pozn.: dostupná data rozlišují menší počet věkových skupin - graf tak nebude tak podrobný.

### 9.1.6 Vliv sesuvů půdy na silnice

Některé informace o předpokládaném vlivu na dopravní infrastrukturu je možno získat ze studie Jaiswal et al. [45].

Jaiswal rozlišuje typy sesuvů podle jejich charakteristik, viz tab. 9.20. Pro jednotlivé prvky pak zranitelnost specifikuje tab. 9.21.

V článku jsou specifikovány také škody na infrastruktuře vyjádřené finančně, cena stavebních prací v podmínkách ČR však bude jiná a proto tyto informace nejsou relevantní.

Určitou aproximaci magnitudy sesuvu je možno získat také ze studie Jaiswal et al [46], viz obr. 9.12, matematicky pak viz vzorec (9.39).

$$R_d = V_L^{0,55} \quad (9.39)$$

Kde  $R_d$  je run-out vzdálenost [m] a  $V_L$  je celkový objem sesuvu. Poskytuje také jisté vodítko ke zranitelnosti různých typů budov, viz tab. 9.22, byť studie v tomto ohledu nepracuje s úplně reprezentativním vzorkem dat. alespoň z pohledu výstavby typické v ČR.

## 9.2 Sněhové laviny

Dalším typem pohybujících vod je ... voda ... opět. Problematikou pohybu vody jsme se už zabývali v kapitole věnované povodním, v tomto případě se ale zaměříme na pohyb vody ve zmrzlém stavu - tedy *sněhu*. Sesuvu většího množství sněhu říkáme *laviny*.

Tabulka 9.20: Třída magnitudy sesuvu (adaptováno z [45])

Třída	Objem	Hloubka	run-out vzdálenost	Hloubka trosek
	$V [m^3]$	$S_d [m]$	$RD [m]$	$A_d [m]$
M-I	< 102	< 1	< 10	1
M-II	102 - 103	< 2	10 - 50	< 2
M-III	> 103	2 - 8	> 50	< 5

Tabulka 9.21: Zranitelnost sesuvy jednotlivých zájmových objektů dopravní infrastruktury (převzato z [45])

Typ ohroženého prvku	Zranitelnost		
	M-I	M-II	M-III
<i>infrastruktura</i>			
železnice	0,5	1	1
silnice (asfaltová)	0,2	0,4	0,8
<i>pohybující se vozy</i>			
autobus	0,01	0,1	0,8
nákladní auto	0,01	0,1	0,8
osobní auto	0,1	0,5	1
motocykl	0,5	0,8	1
vlak	1	1	1
<i>Osoby v pohybujícím se voze (pravděpodobnost úmrtí)</i>			
autobus	0,001	0,1	0,8
nákladní auto	0,001	0,1	0,8
auto	0,01	0,1	1
motocykl	0,5	1	1
vlak	0,5	0,5	0,5

Laviny se vyskytují ve většině zemí světa, která jsou buďto geograficky dostatečně na severu/jihu, nebo disponují dostatečně vysokými horami, aby se na nich udržel sníh. Nebezpečí lavin je tak dlouhodobě známé a zkoumané. Ne všech státech je však úroveň tohoto nebezpečí stejná. Například v ČR laviny primárně ohrožují turisty, popř. lyžaře na horách. Byly zaznamenány případy utržení laviny a zasypání lidí v jejím důsledku, avšak obvykle se jedná o jednotlivé případy.

Oproti tomu ve Švýcarsku jsou známy případy, kdy jsou lavinou zasypany celé obce. Počty obětí se v takovém případě mohou vyšplhat na úroveň desítek nebo dokonce stovek osob a extenzivních škod na majetku a infrastrukturu.

Většina modelů představovaných v této kapitole je odvozována právě z dat ze Švýcarska.

Analogii koeficientu nebezpečí  $H$  pro sesuvy půdy je možno zkonstruovat také pro laviny - opět na základě studie Nadim et al. [70]. Výpočet je možno provést podle vzorce (9.40).

$$H = F(0,4S_r + 0,4T_{pw} + 0,2T_t) \quad (9.40)$$

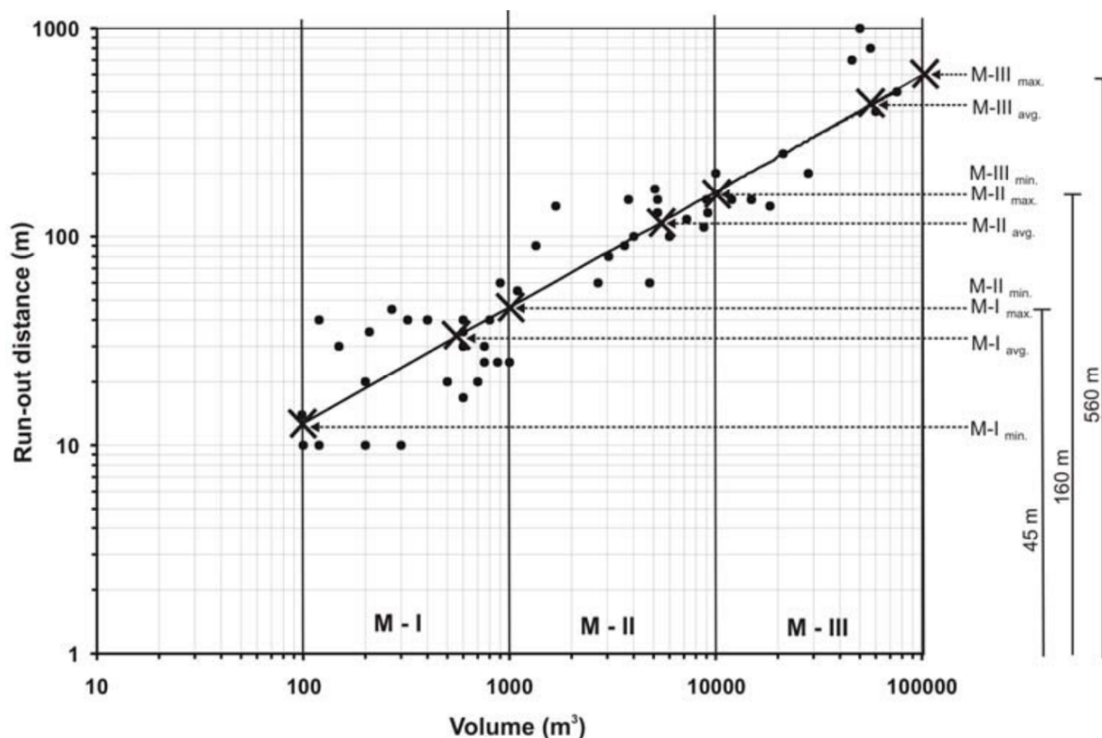
Kde  $S_r$  je faktor sklonu, viz tab. 8.1,  $T_{pw}$  je faktor srážek za čtyři měsíce zimy,  $T_t$  je teplotní faktor a  $F$  je faktor závislý na průměrné teplotě v průběhu zimních měsíců pro  $> 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$   $F = 0$ , jinak  $F = 1$ . Hodnoty koeficientů  $T_{pw}$  a  $T_t$  je pak možno určit na základě údajů statisticky zpracovaných meteo dat a odečtení hodnot z tab. 9.23, resp. 9.24.

Celkové vyhodnocení koeficientu  $H$  je možno odvodit z tab. 9.25.

K tomuto modelu, ale lze mít obdobné připomínky jako k modelu nebezpečí  $H$  pro sesuvy půdy.

Informace z modelu z obr. 9.12 může být cenná i pro odhad následků na dopravní infrastrukturu jako takovou. Winter et al [105] sestavili křivky fragility na základě expertních odhadů a stanovili jednotlivé úrovně podmíněné pravděpodobnosti přesáhnutí určitých stavů poškození v důsledku svaňových pohybů - viz tab. 9.26.

Existují také určité studie o šanci na přežití, viz obr. 9.13. Tento model je ale založen na poměrně omezeném vzorku sněhových lavin.



Obrázek 9.12: Závislost run-out vzdálenosti na objemu sesuvu (převzato z [46])

Analytický vzorec pro křivku je zachycen v (9.41).

$$s(v) = \begin{cases} 1 - kv^2 & \text{pro } v < v_1 \\ c + \frac{a}{v-b} & \text{pro } v \geq v_1 \end{cases} \quad (9.41)$$

Kde  $k = 0,00130$ ,  $c = 0,05$ ,  $a = 1,151$ ,  $b = 18,61$  a  $v_1 = 23,0$ . Přitom  $v$  je rychlost laviny (m/s),  $v_1$  je mezní rychlost, v tomto případě byla zvolena na 23 m/s. Pro vyšší rychlosti (zejména nad 27 m/s) pak v rámci studie nebyla dostupná data. Koeficient  $c$  představuje určité procento obyvatel, které se zachrání bez ohledu na rychlost laviny. Jedná se o lidi, kteří se v okamžiku zásahu budovy lavinou nachází buďto v podzemních částech budovy nebo naopak ve vyšších patrech. Tato proporce byla ve studii nastavena na 5 %.

Parametry  $k$ ,  $a$ ,  $b$  a  $v_1$  byly určeny na základě odhadu maximální pravděpodobnosti za předpokladu je funkce přežití  $s$  je spojitá. Toto omezení je znázorněno ve vzorcích (9.42) a (9.43).

$$b = v_1 - \frac{c - kv_1^2}{2kv_1} \quad (9.42)$$

$$a = \frac{c - kv_1^2}{v_1 - b} \quad (9.43)$$

Pro tyto omezující podmínky vyšla na základě dostupných dat mezní rychlost 27 m/s, její křivka, ale byla ale pro tyto rychlosti příliš strmá, a proto byla mezní rychlost redukována na hodnotu 23 m/s.

Z hodnoty šance na přežití  $s$  je možno odvodit pravděpodobnost úmrtí  $d$  podle vzorce (9.44).

$$d(v) = 1 - s(v) \quad (9.44)$$

V souvislosti s lavinami je možno specifikovat také některé dodatečné parametry, viz obr. 9.14.

Runout index je možno pro lavinu získat buďto simulací, nebo případně jej lze odhadnout na základě tab. 9.27 níže.

Zranitelnost budov je pak znázorněna na obr. 9.15 reprezentujícího závislost zranitelnosti budovy na tlaku vyvolaného zásahem budovy lavinou.

Obr. 9.15 znázorňuje závislost pěti typů budov reprezentovaných na obr. samostatnými křivkami:

Tabulka 9.22: Zranitelnost budov a osob v nich (adaptováno z [46])

	Třída magnitudy sesuvu								
	M-I			M-II			M-III		
	min.	prům.	max.	min	prům.	max.	min.	prům.	max.
<i>Zranitelnost budov jako takových</i>									
Typ-1*	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Typ-2	0,2	0,4	0,8	0,8	1	1	1	1	1
Typ-3	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,8	0,8	1	1
Typ-4	0	0,05	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,8	1
<i>Zranitelnost osob v budovách</i>									
Typ-1	0,4	0,8	1	1	1	1	1	1	1
Typ-2	0,2	0,6	0,8	0,8	1	1	1	1	1
Typ-3	0,1	0,4	0,6	0,6	0,8	1	1	1	1
Typ-4	0	0	0,2	0,2	0,6	0,8	0,8	1	1

\* Typ-1 - plechová bouda, typ-2 - cihla v blátě bez opěrného sloupu, typ-3 - cihla v betonovém základu s opěrnou strukturou, typ-4 - zpevněný beton.

Tabulka 9.23: Klasifikace hodnot srážkového faktoru  $T_{pw}$  (převzato z [70])

Srážky mm/4 měsíce zimy	$T_{pw}$
0 - 50	1
51 - 100	2
101 - 200	3
201 - 300	4
301 - 500	5
501 - 750	6
751 - 1 000	7
1 001 - 1 500	8
> 1 500	9

1. lehké konstrukce
2. smíšené konstrukce
3. masivní konstrukce
4. konstrukce ze zpevněného betonu
5. zpevněné konstrukce

Na obr. 9.15 jsou také znázorněny některé hraniční hodnoty tlaku:

- $p_u$  je obecná hranice škod - odpovídá prvním viditelným škodám (zničená okna a dveře)
- $p_{ui}$  je specifická úroveň hranice škod - hranice poškození samotné konstrukce budovy (podle typu stavební konstrukce)
- $p_{oi}$  je hranice destrukce budovy - maximální úroveň ztráty odpovídající typu budovy
- $p_{ai}$  je hranice oddělení (detached limit) - při překročení je nutná demolice budovy a úplná rekonstrukce

Obdobný přístup je možné vysledovat také ve studii Cappabianca et al [11]. Zranitelnost budov zde ale není rozepsána podle typu stavební konstrukce, resp. jako stavební konstrukce se předpokládá beton, viz obr. 9.16.

Pro sněhové laviny z „prašanu“ popisuje zranitelnost Barboliny et al [7]. Zranitelnost je v tomto případě odvozována jako poměr mezi náklady na opravu budovy a hodnotou budovy. Graficky je tento vztah znázorněn na obr. 9.18 a matematicky pak ve vzorci (9.45).

$$SL = \begin{cases} 0,0297P_{imp} & \text{pro } P_{imp} \leq 34 \text{ kPa} \\ 1 & \text{pro } P_{imp} > 34 \text{ kPa} \end{cases} \quad (9.45)$$

Zranitelnost osob uvnitř budov tímto typem lavin je pak znázorněna na obr. 9.19 a vzorci (9.46).

Tabulka 9.24: Klasifikace hodnot teplotního faktoru  $T_t$  (převzato z [70])

Průměrná teplota v zimě [°C]	$T_t$
2,5 - 30,5	0
1,5 - 2,5	1
0,5 - 1,5	2
0 - 0,5	3
-0,5 až 0	4
-1 až -0,5	5
-1,5 až -1	6
-2 až -1,5	7
-3 až -2	8
< -3	9

Tabulka 9.25: Klasifikace potenciálu nebezpečí lavin  $H$  (převzato z [70])

Hodnoty $H$	Třída	Klasifikace
$\leq 4$	1	-
4,1 - 4,5	2	-
4,6 - 5,0	3	-
5,1 - 5,5	4	zanedbatelný
5,6 - 6,0	5	nízký
6,1 - 7	6	mírný
7,1 - 7,5	7	mírný až vysoký
7,6 - 8,2	8	vysoký
8,3 - 9	9	velmi vysoký

$$D_{in} = \begin{cases} 0 & \text{pro } P_{imp} \leq 5 \text{ kPa} \\ 0,0094P_{imp} - 0,0508 & \text{pro } 5 \text{ kPa} < P_{imp} \leq 34 \text{ kPa} \\ 0,27 & \text{pro } P_{imp} > 34 \text{ kPa} \end{cases} \quad (9.46)$$

Šance osob na přežití v otevřeném prostoru je u tohoto typu lavin specifikován na obr. ?? a vzorci (9.47). Šance na přežití je odvozena z hloubky zasypání osob lavinou. [6]

$$D_{out} = \begin{cases} 0 & \text{pro } h \leq 40 \text{ cm} \\ 0,0039h - 0,1546 & \text{pro } 40 \text{ cm} < h \leq 210 \text{ cm} \\ 0,65 & \text{pro } h > 210 \text{ cm} \end{cases} \quad (9.47)$$

### 9.3 Bahnotoky

Dalším *toků* jsou bahnotoky. *Bahnotok* je rychlý pohyb směsi sedimentu a vody po svahu. Jde o jeden z typů gravitačního transportu.

Svémi projevy se výrazně liší od běžných svahových pohybů, kdy dochází k posunu celé jedné vrstvy. Bahnotoky se proti tomu svými charakteristikami mohou do určité míry podobat spíše běžným povodním, ovšem s tím, že bahnotoky jsou exkluzivně spouštěny vnějšími stimuly - především pak silnými srážkami a otřesy půdy.

Bahnotoky jsou poměrně časté v oblastech s výraznou sopečnou aktivitou. V podmínkách České republiky se jedná o velmi vzácný fenomén. V případě výskytu ale následky mohou být katastrofické.

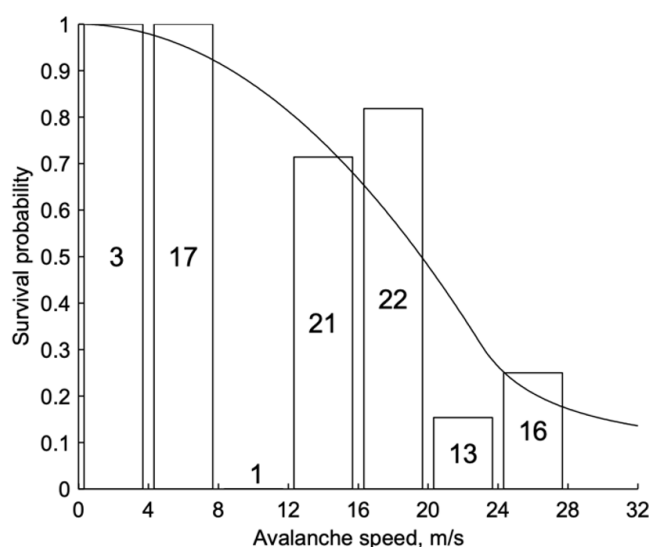
V současnosti není k dispozici nějak obzvláště velké množství dat, ze kterých by bylo možné konstruovat přesné křivky poškození. Asi nejrozsáhlejší podklady pro analýzu dopadů bahnotoků poskytuje série studií pro Hong Kong [16].

Zranitelnost osob tokem trosek je zachycena v tab. 9.28.

Zpráva AGSO ?? pro tento typ událostí specifikuje zranitelnost taxativně, viz tab. 9.29.

Tabulka 9.26: Pravděpodobnosti přesáhnutí různých stavů poškození a podmíněné pravděpodobnosti pro vysokorychlostní silnice pro stanovené objemy sesuvů (převzato z [105])

	Objem sesuvu [ $m^3$ ]			
	200 $m^3$	1000 $m^3$	5000 $m^3$	10000 $m^3$
<i>Pravděpodobnost přesáhnutí stavu poškození</i>				
omezené	0,2	0,3	0,6	0,7
značné	0,05	0,2	0,4	0,55
zničeno	0,01	0,02	0,3	0,4
<i>Podmíněná pravděpodobnost</i>				
beze škod	0,8	0,7	0,4	0,3
omezené	0,15	0,1	0,2	0,15
značné	0,4	0,18	0,1	0,15
zničeno	0,01	0,02	0,3	0,4



Obrázek 9.13: Závislost šance na přežití na rychlosti laviny (převzato z [51])

Pro rychle proudící toky trosek existují také odhady zranitelnosti budov (viz např. projekt *SafeLand* D2.5 [6] str. 52) to pro různé rychlosti pohybu toku ( $v$ ):

Pro budovy z cihel:

- pokud  $v \geq 5$  m/s - velmi vysoká pravděpodobnost kolapsu budovy (totální ztráta),  $V_i = 1$
- pokud  $v < 5$  m/s - vysoká pravděpodobnost kolapsu,  $V_i = 0,8$

Pro budovy s kostrou ze zpevněného betonu:

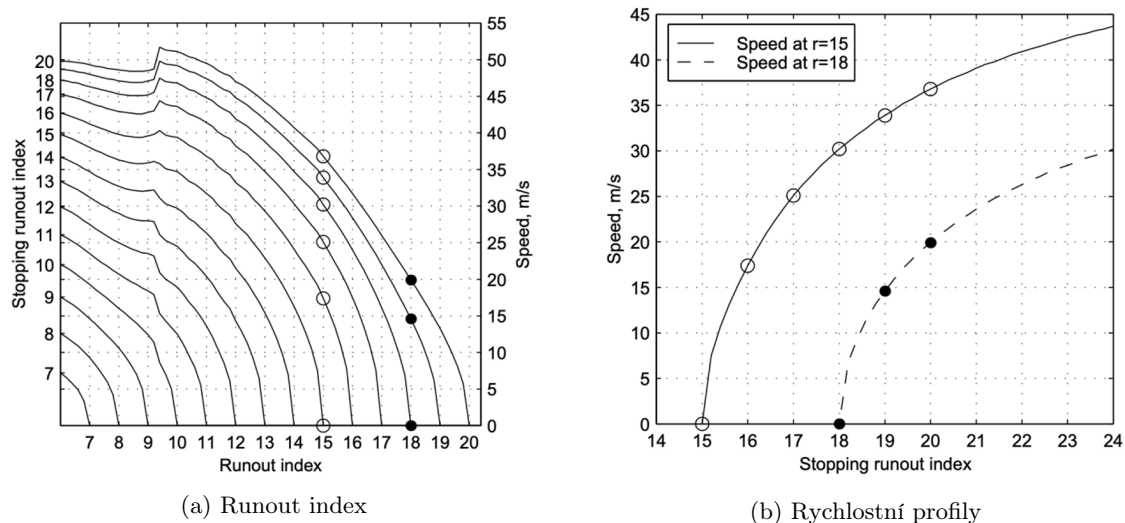
- pokud  $v \geq 10$  m/s - velmi vysoká pravděpodobnost kolapsu,  $V_i = 1$
- pokud  $7 \leq v < 10$  m/s - vysoká pravděpodobnost kolapsu,  $V_i = 0,8$
- pokud  $3 \leq v < 7$  m/s - střední pravděpodobnost kolapsu  $V_i = 0,5$
- pokud  $v < 3$  m/s - nízká pravděpodobnost kolapsu,  $V_i = 0,2$

Zranitelnost je v tomto případě vnímána ve smyslu pravděpodobnosti kolapsu budovy v důsledku proudu trosek na budovu působící.

## 9.4 Pád kamení

Posledním typem toků, kterým se v těchto skriptech budeme zabývat jsou *pády kamení*. Škody v tomto případě jsou způsobeny uvolněním kamenů různé velikosti a jejich pád na vozovku, ohrožení domů v blízkosti apod.





Obrázek 9.14: Runout index vs rychlostní profily (převzato z [51])

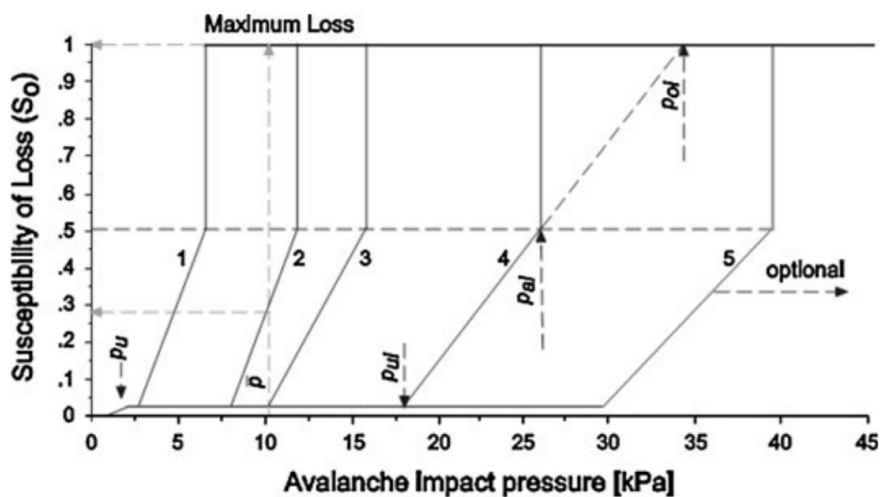
Tabulka 9.27: Runout index vs runout vzdálenost (převzato z [51])

<b>Runout index</b>	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17
<b>Runout vzdálenost</b>	1309	1374	1425	1471	1537	1591	1638	1686	1737
<b>Runout index</b>	17,5	18	18,5	19	19,5	20			
<b>Runout vzdálenost</b>	1790	1842	1896	1950	2004	2059			

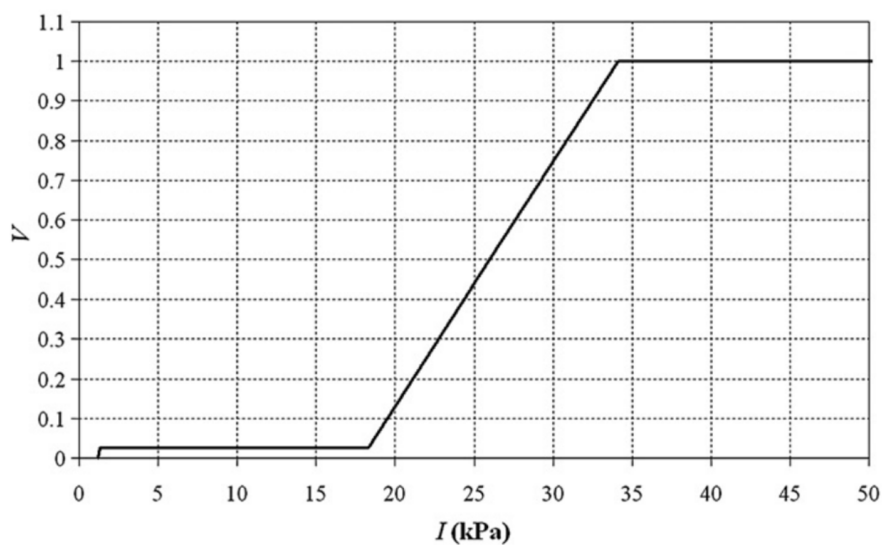
V ČR se s pády kamení setkáváme poměrně často, obvykle však nedosahují katastrofálních rozměrů a tak potenciál k ohrožení jednotlivých aut, popř. domů. Známou oblastí, která je tímto fenoménem ohrožována pravidelně je Hřensko.

Z hlediska možnosti odhadu škod lze najít některá východiska v projektu SafeLand - Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies (konkrétně zpráva D.2.5 [6]), který vznikl v rámci 7. rámcového programu EU. V rámci tohoto projektu byly odvozeny některé křivky fragility pro pád kamení, které pracují s různou velikostí kamenů a také rychlostí jejich pádu – viz obr. 9.20.

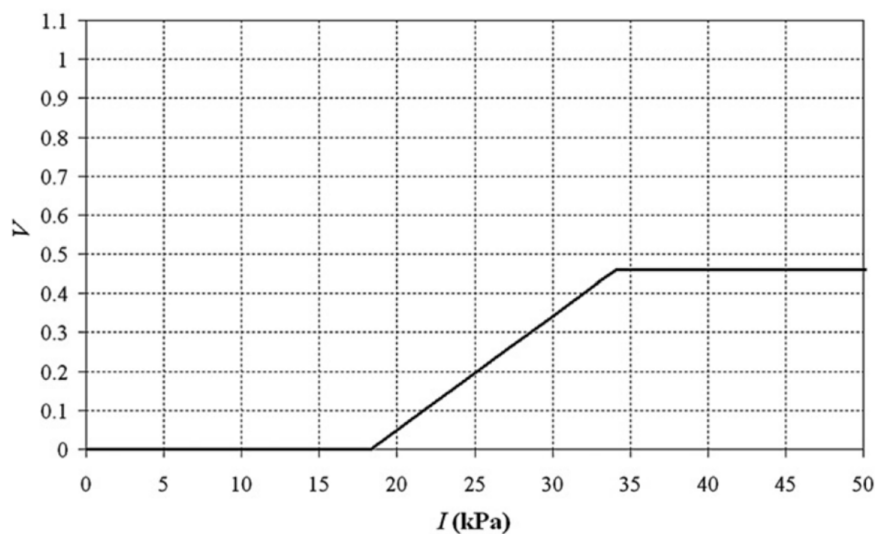
Vzhledem k rozsahu problému se ale pravděpodobně v podmínkách ČR nemá smysl zabývat problematikou pádu kamení podrobněji, popř. ji řešit systémově procesy jako je mapování rizik, jak se děje u jiných zdrojů rizik.



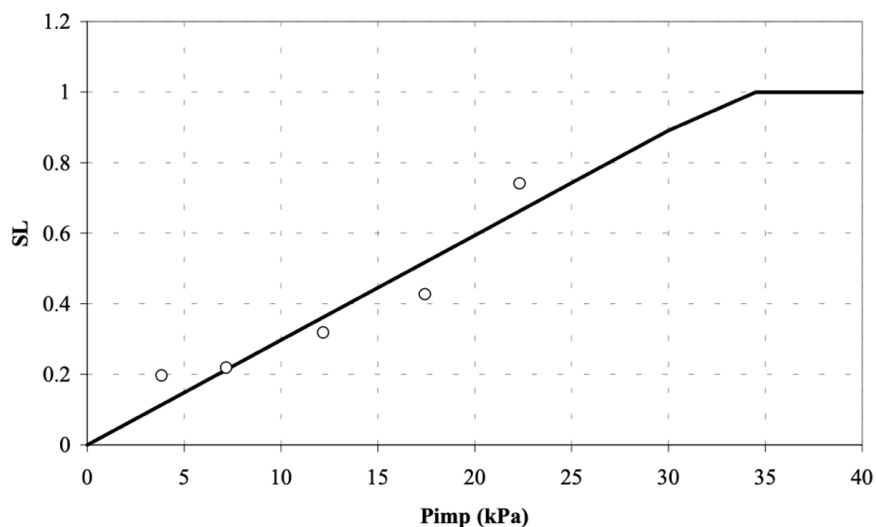
Obrázek 9.15: Zranitelnost budov v závislosti na tlaku vyvolaného dopadem laviny (převzato z [75])



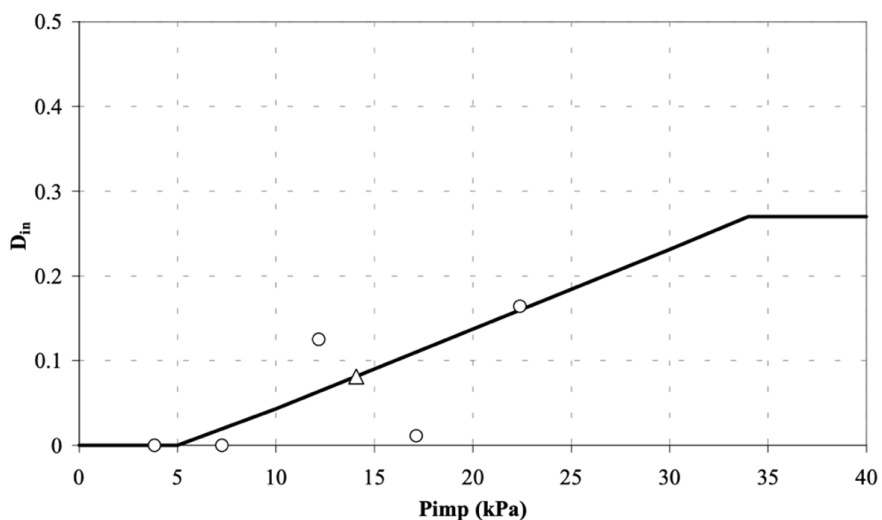
Obrázek 9.16: Zranitelnost budov (konstr. beton) účinky „hustých“ lavin navržených Wilhem 1998 (převzato z [11])



Obrázek 9.17: Zranitelnost osob v budovách (konstr. beton) účinky „hustých“ lavin (převzato z [11])



Obrázek 9.18: Zranitelnost budov tlakem dopadu laviny (powder avalanche) – empirické hodnoty a odvozená funkce (převzato z [7])



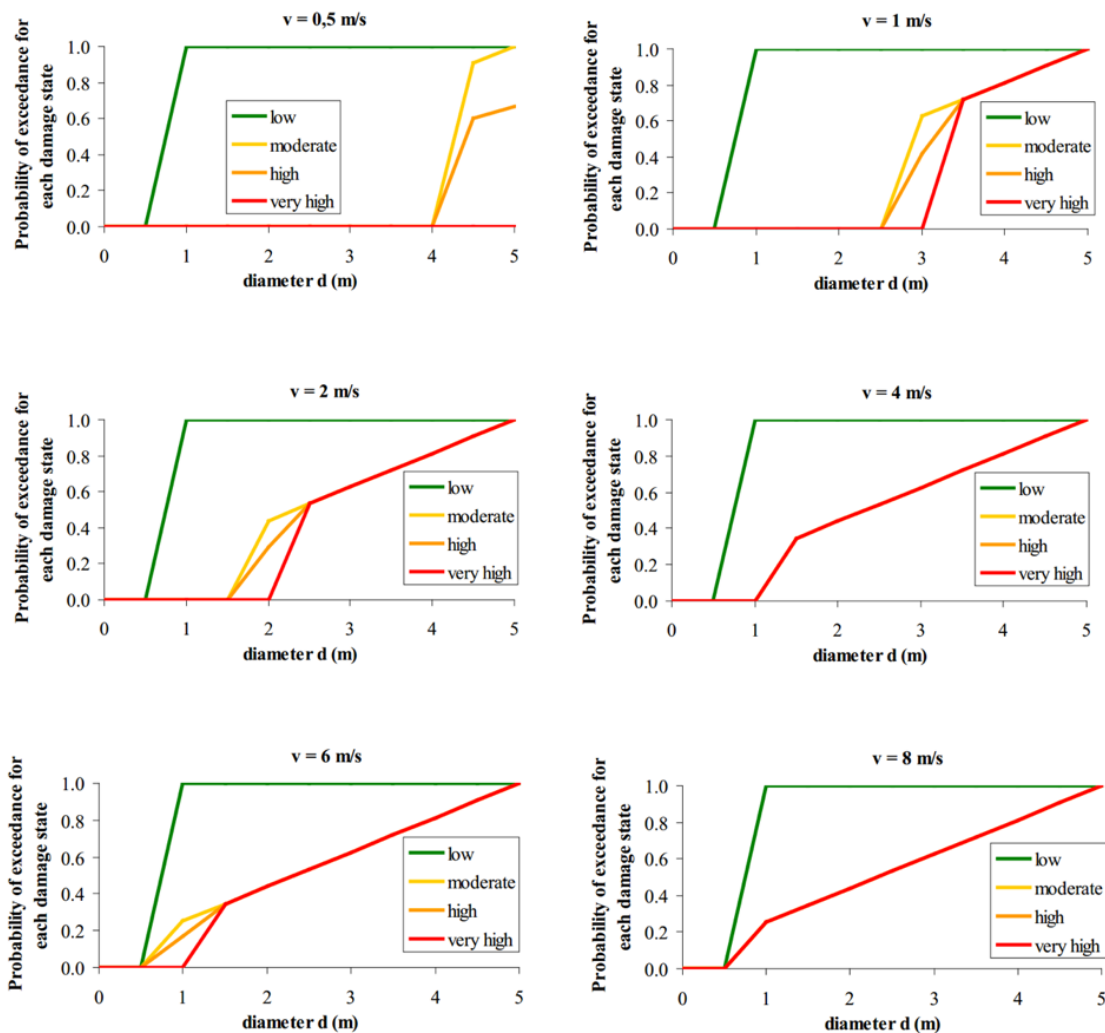
Obrázek 9.19: Zranitelnost osob uvnitř budov účinky dopadu lavin (laviny prašanu - powder avalanche) – empirické hodnoty a odvozená funkce (převzato z [7])

Tabulka 9.28: Shrnutí rozsahu zranitelnosti a doporučených hodnot pro smrt v důsledku toku trosek na základě dat z Hong Kongu (převzato z [16])

Případ	Zranitelnost osob stř. hodnota (rozsah)	Komentář
<i>Osoby ve volném prostoru</i>		
1. při zasažení pádem kamení	0,5 (0,1 - 0,7)	zranění, ale úmrtí je nepr.
2. při zasypání kamením	1 (0,8 - 1)	smrt udušením
3. pokud nebude osoba zasypána	0,1 (0,1 - 0,5)	vysoká šance na přežití
<i>Osoba v automobilu</i>		
1. při zasypání/rozdrcení vozu	1 (0,9 - 1)	smrt je skoro jistá
2. pokud je vůz pouze poškozený	0,3 (0 - 0,3)	smrt je vysoce prav.
<i>Osoby v budovách</i>		
1. kolaps budovy	1 (0,9 - 1)	smrt je skoro jistá
2. budova zasypána bahnem, osoba zalitá	1 (0,8 - 1)	smrt je vysoce prav.
3. budova zasypána bahnem, osoba nezasažena	0,2 (0 - 0,5)	vysoká šance na záchranu
4. bahno pouze zasáhlo budovu	0,05 (0 - 0,1)	takřka beze škod

Tabulka 9.29: Zranitelnost prvků (převzato z ??)

	Zranitelnost		
	Osoby	Budovy	Cesty
Debris slides, toky a pády kamení, sklon $> 25^\circ$	0,9	1	1
rotational slides and slumps, sklon $< 25^\circ$	0,05	0,25	0,3
Small debris slides, flows, slumps and rock falls	0,05	0,25	0,3



Obrázek 9.20: Křivky fragility pro kameny padající různou rychlostí (převzato z [6])

### Shrnutí

V této kapitole jsme se zabývali zbývajícími typy pohybů hmot, které mají potenciál způsobit škody.

V podmínkách ČR je pravděpodobně nejzávažnější problematika sesuvů půdy. Škody jsou v tomto případě přímo závislé na objemu celého sesuvu. Kromě odhadů škod jako takových, lze kvantifikovat také nebezpečí toho, že k sesuvu dojde na základě geologických vlastností terénu.

Vysoký potenciál škod mají také bahnotoky a sněhové laviny. V podmínkách ČR se ale s těmito fenomény nesetkáváme buďto často (bahnotoky) nebo v intenzitě, která by měla potenciál způsobit závažnější škody.

Pády kamení jsou pak uvedeny pouze pro úplnost.



**Kontrolní otázky**

1. Jakým způsobem přistupujeme k modelování nebezpečí sesuvů půdy?
2. Co je to bahnotok?
3. Jakým způsobem sněhové laviny, popř. také bahnotoky způsobují škody?
4. Jaké typy škod můžeme očekávat u budov v důsledku sesuvu půdy?



# Přílohy

## Příloha 1 - probit přepočítání na procenta

Tabulka P1 Probitová transformace (převzato z [41])

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

## Příloha 2 - Průměrná roční míra inflace v ČR

Tabulka P2 Průměrná roční míra inflace v ČR (převzato z ČSÚ [125])

rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010		
inlace [%]	2,8	1,9	2,5	2,8	6,3	1,0	1,5		
rok	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
inlace [%]	1,9	3,3	1,4	0,4	0,3	0,7	2,5	2,1	2,8

## Příloha 3 - Funkce hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce vybraných rozdělení pravděpodobnosti

Listing 1: Funkce vyžadované pro vykreslování

```

1 library("plotly") #vykreslování grafů
2 library("dplyr") #podpora pipe operátoru %>%
3 library("evd") #podpora Gumbelova rozdělení

```

Výše uvedené knihovny je potřeba doinstalovat do Vaší instalace R pomocí příkazu `install.packages()`, např. `install.packages("evd")`.

Listing 2: Vykreslení funkce hustoty normálního rozdělení

```

1 x = seq(-4, 4, length=1000)
2 x1 = dnorm(x) #normalizované
3 x2 = dnorm(x, 0, 0.5) #posun nahoru
4 x3 = dnorm(x, 0, 2) #posun dolů
5 x4 = dnorm(x, -2, 0.5) #posun doleva
6 data = data.frame(x, x1, x2, x3, x4)
7 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
8   add_trace(y = ~x1, name = paste("mi=0, sigma=1"), mode="lines", type = "scatter") %>%
9   add_trace(y = ~x2, name = paste("mi=0, sigma=0.5"), mode="lines", type = "scatter") %>%
10  add_trace(y = ~x3, name = paste("mi=0, sigma=2"), mode="lines", type = "scatter") %>%
11  add_trace(y = ~x4, name = paste("mi=-2, sigma=0.5"), mode="lines", type = "scatter") %>%
12  layout(
13    title = 'Gaussovo rozdeleni pro ruzne hodnoty mi a sigma',
14    yaxis = list(title = 'f(x)'),
15    xaxis = list(title = 'x'),
16    legend = list(x = 0.7, y = 0.9)
17  )
18 fig

```

Pozn. absence češtiny ve výše uvedeném výpisu je způsobena nekompatibilitou na straně L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. „Správná“ čeština v tomto případě byla obětována na oltář možnosti zvýraznit syntaxi. R češtinu podporuje běžným způsobem.

Listing 3: Vykreslení distribuční funkce normálního rozdělení

```

1 x = seq(-4, 4, length=1000)
2 x1 = pnorm(x) #normalizované
3 x2 = pnorm(x, 0, 0.5) #posun nahoru
4 x3 = pnorm(x, 0, 2) #posun dolů
5 x4 = pnorm(x, -2, 0.5) #posun doleva
6 data = data.frame(x, x1, x2, x3, x4)
7 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
8   add_trace(y = ~x1, name = paste("mi=0, sigma=1"), mode="lines", type = "scatter") %>%
9   add_trace(y = ~x2, name = paste("mi=0, sigma=0.5"), mode="lines", type = "scatter") %>%
10  add_trace(y = ~x3, name = paste("mi=0, sigma=2"), mode="lines", type = "scatter") %>%
11  add_trace(y = ~x4, name = paste("mi=-2, sigma=0.5"), mode="lines", type = "scatter") %>%
12  layout(
13    title = 'Distribucni funkce Gaussova rozdeleni pro ruzne hodnoty mi a sigma',
14    yaxis = list(title = 'F(x)'),
15    xaxis = list(title = 'x'),
16    legend = list(x = 0.7, y = 0.3)
17  )
18 fig

```

Listing 4: Funkce hustoty lognormálního rozdělení

```

1 x = seq(0, 4, length=1000)
2 x1 = dlnorm(x) #normalizované
3 x2 = dlnorm(x, 0, 0.5) #posun nahoru
4 x3 = dlnorm(x, 0, 2) #posun dolů
5 x4 = dlnorm(x, 1, 2) #posun dolů
6 data = data.frame(x, x1, x2, x3, x4)
7 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
8   add_trace(y = ~x1, name = paste("mi=0, sigma=1"), mode="lines", type="scatter") %>%
9   add_trace(y = ~x2, name = paste("mi=0, sigma=0.5"), mode="lines", type="scatter") %>%
10  add_trace(y = ~x3, name = paste("mi=0, sigma=2"), mode="lines", type="scatter") %>%
11  add_trace(y = ~x4, name = paste("mi=1, sigma=2"), mode="lines", type="scatter") %>%
12  layout(

```



```

13     title = 'Log-normalni rozdeleni pro ruzne hodnoty mi a sigma',
14     yaxis = list(title = 'f(x)'),
15     xaxis = list(title = 'x'),
16     legend = list(x = 0.7, y = 0.9)
17 )
18 fig

```

Listing 5: Distribuční funkce lognormálního rozdělení

```

1 x = seq(0, 4, length=1000)
2 x1 = plnorm(x) #normalizované
3 x2 = plnorm(x, 0, 0.5) #posun nahoru
4 x3 = plnorm(x, 0, 2) #posun dolů
5 x4 = plnorm(x, 1, 2) #posun dolů
6 data = data.frame(x, x1, x2, x3, x4)
7 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
8   add_trace(y = ~x1, name = paste("mi=0, sigma=1"), mode="lines", type="scatter") %>%
9   add_trace(y = ~x2, name = paste("mi=0, sigma=0.5"), mode="lines", type="scatter") %>%
10  add_trace(y = ~x3, name = paste("mi=0, sigma=2"), mode="lines", type="scatter") %>%
11  add_trace(y = ~x4, name = paste("mi=1, sigma=2"), mode="lines", type="scatter") %>%
12  layout(
13    title = 'Distribucni funkce log-normalniho rozdeleni pro ruzne hodnoty mi a sigma',
14    yaxis = list(title = 'F(x)'),
15    xaxis = list(title = 'x'),
16    legend = list(x = 0.7, y = 0.2)
17  )
18 fig

```

Listing 6: Hustota uniformního rozdělení

```

1 x = runif(1000, min = -2, max = 2)
2 x1 = dunif(x, min = -1, max = 1)
3 data = data.frame(x, x1)
4 data = data[order(data$x),]
5 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
6   add_trace(y = ~x1, mode="lines", type="scatter") %>%
7   layout(
8     title = 'Hustota uniformniho rozdeleni a = -1, b = 1',
9     yaxis = list(title = 'f(x)', range=c(0, 1)),
10    xaxis = list(title = 'x', range=c(-2, 2))
11  )
12 fig

```

Listing 7: Distribuční funkce uniformního rozdělení

```

1 x = runif(1000, min = -2, max = 2)
2 x1 = punif(x, min = -1, max = 1)
3 data = data.frame(x, x1)
4 data = data[order(data$x),]
5 fig = plot_ly(data, x = ~x) %>%
6   add_trace(y = ~x1, mode="lines", type="scatter") %>%
7   layout(
8     title = 'Distribucni funkce uniformniho rozdeleni a = -1, b = 1',
9     yaxis = list(title = 'F(x)', range=c(0, 1)),
10    xaxis = list(title = 'x', range=c(-2, 2))
11  )
12 fig

```

Listing 8: Hustota Gumbelova rozdělení

```
1 x = seq(-4, 4, length=1000)
2 y = dgumbel(x)
3 data = data.frame(x, y)
4 fig = plot_ly(data, x = ~x, y = ~y, mode="lines", type="scatter") %>%
5   layout(
6     title = 'Hustota Gumbelova rozdeleni',
7     yaxis = list(title = 'f(x)'),
8     xaxis = list(title = 'x')
9   )
10 fig
```

Listing 9: Distribuční funkce Gumbelova rozdělení

```
1 x = seq(-4, 4, length=1000)
2 y = pgumbel(x)
3 data = data.frame(x, y)
4 fig = plot_ly(data, x = ~x, y = ~y, mode="lines", type="scatter") %>%
5   layout(
6     title = 'Distribucni funkce Gumbelova rozdeleni',
7     yaxis = list(title = 'F(x)'),
8     xaxis = list(title = 'x')
9   )
10 fig
```

---

# Literatura

- [1] ChemSpider.
- [2] Chemical & Process Technology: Should we consider JET FIRE for Pressure Relief Valve (PSV) load determination?, 2007. Library Catalog: [webwormcpt.blogspot.com](http://webwormcpt.blogspot.com).
- [3] AIHA. *2019 ERPG/WEEL Handbook*. AIHA, Washington, 2019.
- [4] ANSYS. ANSYS Fluent Software | CFD Simulation, 2019.
- [5] Aronne Armanini and Masanori Michiue. *Recent Developments on Debris Flows*. Springer, Berlin, 1997.
- [6] AUTH. *Deliverable D2.5: Physical vulnerability of elements at risk to landslides: Methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines*. 2011.
- [7] M. Barbolini, F. Cappabianca, and R. Sailer. Empirical Estimate Of Vulnerability Relations For Use In Snow Avalanche Risk Assessment. *Risk Analysis*, 77(4):533–542, 2004.
- [8] Blesk. Geologové: Víme, kde hrozí v Česku sesuvy půdy. Nikdo se podle údajů ale neřídí. Library Catalog: [www.blesk.cz](http://www.blesk.cz).
- [9] Pavel Bokr. Geologické mapy: on-line prohlížení, informace, prodej a archivní mapy | Geovědní a geologické mapy, 2019.
- [10] J. Bubník. Problémy interpretace výsledků modelových výpočtů znečištění ovzduší z hlediska nové metodiky SYMOS'97. In *Rozptylové studie látek znečišťujících ovzduší a náhrady škod jimi způsobených*, pages 26–37, Hradec Králové, 1998. EMPLA, s.r.o.
- [11] F. Cappabianca, M. Barbolini, and L. Natale. Snow avalanche risk assessment and mapping: A new method based on a combination of statistical analysis, avalanche dynamics simulation and empirically-based vulnerability relations integrated in a GIS platform. *Cold Regions Science and Technology*, 54(3):193–205, November 2008.
- [12] CCPS. *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases*. Wiley, 2 edition, 2012.
- [13] A. W. Coburn and R. E. Hughes. *Report on Damage to Rural Building Types in the Erzurum-Kars Earthquake 30.10.1983*. Martin Centre, Department of Architecture, Cambridge University, 1984.
- [14] Andrew Coburn and Robin Spence. *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2 edition, 2002.
- [15] Copernicus. Soil Water Index.
- [16] Jordi Corominas and Olga-Christina Mavltouli. *Deliverable D2.4 Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning*. Technical University of Catalonia, Barcelona, 2011.
- [17] Valerio Cozzani and Ernesto Salzano. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*, 107(3):67–80, March 2004.

- [18] E. J. Daniell. *Comparison and Production of Open Source Earthquake Loss Assessment Packages*. Università degli Studi di Pavia, Pavia, 2009.
- [19] DHI. MIKE HYDRO River, 2019.
- [20] DHI. MIKE SHE, 2019.
- [21] DMI. Types of major chemical/industrial hazards - Fire. Library Catalog: [www.hrdp-idrm.in](http://www.hrdp-idrm.in).
- [22] J Douglas. Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1):43–104, April 2003.
- [23] Karel Drbal, Pavla Štěpánková, Miriam Dzuráková, Ladislav Pavlovský, Pavel Balvín, Jaromír Říha, Aleš Dráb, Hana Uhmánová, David Duchan, Gabriela Kolečkářová, Ladislav Satrapa, and Martin Horský. *Metodika stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území*. VÚV T.G.M.,v.v.i, Brno, 2008.
- [24] Karel Drbal, Pavla Štěpánková, Viktor Levitus, Jaromír Říha, Aleš Dráb, Ladislav Satrapa, Martin Horský, Petr Valenta, Jana Valentová, and Lucie Friedmannová. *Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Brno, 2012.
- [25] ECHA. Informace o chemických látkách, 2019.
- [26] EPA. Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) Values, April 2014.
- [27] EPA. CAMEO Chemicals, 2014.
- [28] EPA. ALOHA, 2016.
- [29] EPA. *Compiled Acute Exposure Guideline Values (AEGLs)*. EPA, Washington, USA, r. 2018 edition, 2018.
- [30] ETHZ. Global Seismic Hazard Assessment Program, 2002.
- [31] FEMA. *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*. FEMA, Washington, 2003.
- [32] S. Fuchs, K. Heiss, and J. Hübl. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5):495–506, 2007.
- [33] Geological Survey of Canada. General geologic map of the world, 1995.
- [34] GEXCON. FLACS Software, 2019.
- [35] C. Green. *Handbook of Water Economics: Principles and Practice*. Wiley, Chichester, 2003.
- [36] Colin Green, Christophe Viavattene, and Paul Thompson. *Guidance for assessing flood losses CONHAZ Report*. Middlesex University, Middlesex, 2011.
- [37] G. Grünthal. *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Lucemburk, 1998.
- [38] G. Grünthal, J. Schwarz, K. S. Radtke, A. Smolka, B. Merz, and A. H. Thieken. Comparative risk assessments for the city of Cologne – storms, floods, earthquakes. In *Risiken durch Naturgefahren in Deutschland : Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK)*, pages 286–305, Potsdam, 2004. GeoForschungsZentrum Potsdam.
- [39] P. Heneka, T. Hofherr, B. Ruck, and C. Kottmeier. Winter storm risk of residential structures - Model development and application to the German state of Baden-Württemberg. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2006(6):721–733, 2006.

- [40] Michaela Hořínková, Tomáš Kocyan, Jan Martinovič, Michal Podhorányi, Veronika Říhová, Jan Unucka, and Pavel Veselý. *Nové technologie ochrany životního prostředí před negativními následky pohybujících se přírodních hmot TA01021374 - Dílčí zpráva o řešení projektu za rok 2011*. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2011.
- [41] HSE. *Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment*.
- [42] O. Hungr, G. C. Morgan, and R. Kellerhals. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4):663–677, November 1984.
- [43] Alvaro Ivan Hurtado. *FUNVUL-Simplified-V1.0.0*. Univesidad de los Andes, Bogota, 2018.
- [44] HySoft Brno. *HYDROG - Základní informace*, 2016.
- [45] P. Jaiswal, C. J. van Westen, and V. Jetten. Quantitative assessment of direct and indirect landslide risk along transportation lines in southern India. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(6):1253–1267, June 2010.
- [46] P. Jaiswal, C. J. van Westen, and V. Jetten. Quantitative estimation of landslide risk from rapid debris slides on natural slopes in the Nilgiri hills, India. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(6):1723–1743, June 2011.
- [47] M. Jakob, D. Stein, and M. Ulmi. Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, 60(2):241–261, 2011.
- [48] S. N. Jonkman and N. Asselman. Method for the Estimation of Loss of Life Caused by Floods in the Netherlands. In *Flood Risk Management in Europe*, pages 155–170. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007.
- [49] S. N. Jonkman, P. H. A. J. M. van Gelder, and J. K. Vrijling. Loss of Life Models for Sea and River Floods. In *Flood Defence*, pages 196–206, New York, 2002. Science Press.
- [50] S.n. Jonkman and E. Penning-Rowsell. Human Instability in Flood Flows. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(5):1208–1218, 2008.
- [51] Kristján Jónasson, Sven Þ. Sigurðsson, and Þorsteinn Arnalds. *Estimation of avalanche risk*. Rit Veðurstofu Íslands, Reykjavík, 1999.
- [52] R. P. Kennedy, C. A. Cornell, R. D. Campbell, S. Kaplan, and H. F. Perla. Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 59(2):315–338, August 1980.
- [53] A. C Khanduri and G. C Morrow. Vulnerability of buildings to windstorms and insurance loss estimation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(4):455–467, March 2003.
- [54] II Kherkheulidze. Estimation of basic characteristics of mud flows. *Proceedings of the Leningrad symposium august 1967, international association of scientific hydrology (IAHS) studies and reports in hydrology*, 2(3):940–948, 1967.
- [55] F. Krimgold. Earthquake Casualty Estimation and Response Modeling. In *International Workshop on Earthquake Injury Epidemiology*, pages 17–25. John Hopkins University, 1989.
- [56] M. F. Lechat. *Corporal Damage as Related to Building Structure and Design: The Need for an International Survey*. Baltimore, 1989.
- [57] Zhihong Li, Farrokh Nadim, Hongwei Huang, Marco Uzielli, and Suzanne Lacasse. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2):125–134, June 2010.
- [58] H. Maiwald and J. Schwarz. Damage and loss prognosis tools correlating flood action and building’s resistance-type parameters. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 5(3):222–250, 2015.

- [59] Holger Maiwald and Jochen Schwarz. *Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit*. Verlag, 2011.
- [60] Holger Maiwald and Jochen Schwarz. Neue Schadensmodelle zur Bewertung der Konsequenzen von extremen Hochwassern. In *Informationstag Ingenieurbau*, pages 1–10, Weimar, 2014. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar.
- [61] Sam Mannan. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 4 edition, 2012.
- [62] S. V. Medvedev and W. Sponheuer. MSK Scale of Seismic Intensity. In *Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering: Chilean Association of Seismology and Earthquake Engineering*, volume 1, pages 143–153, Santiago de Chile, 1969.
- [63] Lubos Mitas and Helena Mitasova. Process based distributed erosion modeling using SIMWE.
- [64] Lubos Mitas and Helena Mitasova. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34(10):505–516, 1998.
- [65] Helena Mitasova, Jaroslav Hofierka, Maros Zlocha, and Louis R. Iverson. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5):629–641, 1996.
- [66] Helena Mitasova and Lubos Mitas. USPED model for erosion/deposition, 1999.
- [67] MSK. Záplavová území, 2020.
- [68] MUNI. Zeměměření v ČR a okolí, 2020. Library Catalog: [www.ipe.muni.cz](http://www.ipe.muni.cz).
- [69] Munich Re. *Winterstürme in Europa (II)*. Munich Re, Mnichov, 2001.
- [70] Farrokh Nadim, Oddvar Kjekstad, Pascal Peduzzi, Christian Herold, and Christian Jaedicke. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3(2):159–173, May 2006.
- [71] NASA. Terrain data - SRTM3 - Shuttle Radar Topography Mission Global Coverage (~90m) Version 2, 2009.
- [72] National Geographic Society. Tornadoes and the Enhanced Fujita Scale, August 2019. Library Catalog: [www.nationalgeographic.org](http://www.nationalgeographic.org).
- [73] NOAA. Enhanced Fujita Tornado Damage Scale.
- [74] NOAA. Fujita Tornado Damage Scale.
- [75] M. Papathoma-Köhle, M. Kappes, M. Keiler, and T. Glade. Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Natural Hazards*, 58(2):645–680, August 2011.
- [76] Edmund Penning-Rowsell, Sally Priest, Dennis Parker, Joe Morris, Sylvia Tunstall, Christophe Viavattene, John Chatterton, and Damon Owen. *Handbook for Economic Appraisal 2013: Flood and Coastal Erosion Risk Management*. DEFRA, London, 2013.
- [77] E. C. Penning-Rowsell, S. M. Tunstall, S. M. Tapsell, and D. J. Parker. The Benefits of Flood Warnings: Real But Elusive, and Politically Significant. *Water and Environment Journal*, 14(1):7–14, 2000.
- [78] G. A. Pinhasi, A. Ullmann, and A. Dayan. 1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23):4780–4795, November 2007.
- [79] Keith Porter. *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. University of Colorado Boulder, Boulder, 2020.
- [80] PSE. Mechanisms for, and possible consequences of fires. – Process Safety Engineering.

- [81] Juan Francisco Sánchez Pérez, Enrique González Ferradás, Fernando Díaz Alonso, Daniel Palacios García, María Victoria Mínguez Cano, and José Ángel Bautista Cotorruelo. New Probit equations for the calculation of thermal effects on humans. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(2):109–113, March 2010.
- [82] Otto. Redlich and J. N. S. Kwong. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. *Chemical Reviews*, 44(1):233–244, February 1949.
- [83] RTS Data. Cenové ukazatele ve stavebnictví pro rok 2019, 2020.
- [84] Timothy Schott, Chris Landsea, Gene Hafele, Jeffrey Lorens, Arthur Taylor, Bill Ward, Mark Willis, and Walt Zaleski. The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale, 2020.
- [85] Holger Schwartz and Holger Maiwald. Empirical vulnerability assessment and damage for description natural hazards following the principles of modern macroseismic scales. In *15th World Conference Earthquake Engineering*, pages 1–10, Lisabon, 2012.
- [86] Zakia Sultana, Tobias Sieg, Patric Kellermann, Meike Müller, and Heidi Kreibich. Assessment of Business Interruption of Flood-Affected Companies Using Random Forests. *Water*, 10(8):article 1049, 2018.
- [87] Texas A & M University. SWAT | Soil & Water Assessment Tool, 2019.
- [88] TNO. EFFECTS - software for safety- and hazard analysis, 2019.
- [89] TORRO. TORRO - International Tornado Intensity Scale.
- [90] Reinhold Totschnig, Walter Sedlacek, and Sven Fuchs. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards*, 58(2):681–703, September 2010.
- [91] S. Tyagunov, G. Grünthal, R. Wahlström, L. Stempniewski, and J. Zschau. Seismic risk mapping for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4):573–586, 2006.
- [92] UNISDR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2013, 2013.
- [93] UNISDR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019, 2019.
- [94] US Army Corps of Engineers. HEC-HMS, 2019.
- [95] US Army Corps of Engineers. HEC-RAS, 2019.
- [96] USDA. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) - Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2 : USDA ARS, 2016.
- [97] M. Uzielli, F. Catani, V. Tofani, and N. Casagli. Risk analysis for the Ancona landslide—II: estimation of risk to buildings. *Landslides*, 12(1):83–100, February 2015.
- [98] Marco Uzielli, Farrokh Nadim, Suzanne Lacasse, and Amir M. Kaynia. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3):251–256, December 2008.
- [99] VÚV T.G.Masaryka. O projektu DIBAVOD, 2017.
- [100] P. H. Waarts. Methoden voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie, September 1992.
- [101] H. R. Wallingford. *FD2321/TR1 Flood Risks to People, Phase 2 - Flood Risks to People*. DEFRA, Londýn, 2006.
- [102] H. R. Wallingford. *FD2321/TR2 Flood Risks to People, Phase 2 - Guidance Document*. DEFRA, Londýn, 2006.
- [103] Wikipedia. Beaufort scale.
- [104] Cort J. Willmont and Johannes J. Feddema. A More Rational Climatic Moisture Index. *The Professional Geographer*, 44(1):84–88, 1992.

- [105] M. G. Winter, J. T. Smith, S. Fotopoulou, K. Pitolakis, O. Mavrouli, J. Corominas, and S. Argyroutis. An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2):291–305, May 2014.
- [106] WMO. *Manual on Marine Meteorological Services Volume I – Global Aspects*. WMO, Ženeva, 2012 (aktualizováno 2018) edition, 2018.
- [107] Luis E. Yamin, Alvaro I. Hurtado, Alex H. Barbat, and Omar D. Cardona. Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10:452–460, December 2014.
- [108] Quinnan Zhang. Urban earthquake disaster mitigation planning and information in China. In *International Research and Training Seminar on Regional Development Planning for Disaster Prevention*, Tokio, 1987. United Nations Centre for Regional Development.
- [109] Y. Zhang, J. Degroote, C. Wolter, and R. Sugumaran. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk. *Land Degradation and Development*, 20(1):84–91, 2009.
- [110] Johanna Zwinger. *The Simbach Flash Flood – A Damage Analysis and Validation of the EDAC-Damage Model*. Technischen Universität, Mnichov, 2017.
- [111] Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. Větrné mapy.
- [112] ÚZEI. Nákladovost zemědělských výrobků, 2019.
- [113] Česko. Zákon 254/2001 Sb., o vodách a změně některých zákonů (vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů, 2001.
- [114] ČGS. Databáze svahových nestabilit České geologické služby, 2020.
- [115] ČHMÚ. Větrná růžice Ostrava-Zábřeh, rok 2018, 2019.
- [116] ČHMÚ. Větrné růžice na imisních stanicích (2018), 2019.
- [117] ČR. Zákon 200/1994 Sb., o zeměměřičství, 1994.
- [118] ČR. Vyhláška 31/1995 Sb., Vyhláška Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřičství a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením, 1995.
- [119] ČR. Zákon 183/2006 Sb., Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), 2006.
- [120] ČSN. ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.
- [121] ČSÚ. Vydání a spotřeba domácností statistiky rodinných účtů - 2016, 2017.
- [122] ČSÚ. Ekonomické výsledky průmyslu ČR - 2017, 2019. Library Catalog: [www.czso.cz](http://www.czso.cz).
- [123] ČSÚ. Osevní plochy zemědělských plodin, 2019.
- [124] ČSÚ. Soupis ploch osevů - k 31. 5. 2019, 2019. Library Catalog: [www.czso.cz](http://www.czso.cz).
- [125] ČSÚ. Inflace - druhy, definice, tabulky, 2020.
- [126] ČÚZK. Vektorová data nové podoby státní mapy v měřítku 1:5 000.
- [127] ČÚZK. *Katalog objektů ZABAGED verze 3.0 ve znění dodatku č. 1 a č. 2*. ČÚZK, Praha, 3 edition, 2018.



---

# Slovník

**AEGL** Acute Exposure Guideline Levels.

**AV** Akademie věd.

**BLEVE** Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion.

**CFD** Computational Fluid Dynamics.

**CONHAZ** Costs of Natural Hazards.

**DEFRA** Department for Environment and Food and Rural Affairs.

**DIBAVOD** DÍgitální BÁze VOdohospodářských Dat.

**EMS-98** European Macroseismic Scale of 1998.

**EP** Exceedance Probability.

**EPA** Environmental Protection Agency.

**ERPG** Emergency Response Planning Guidelines.

**ESIS** European chemical Substances Information System.

**GAR** Global Assessment Report.

**GIS** Geografický informační systém.

**GSHAP** Global Seismic Hazard Assessment Program.

**JKSO** Jednotná klasifikace stavebních objektů.

**LEL** Lower Explosion Limit.

**LNG** Liquefied Natural Gas.

**LOC** Levels of Concern.

**MDR** mean damage ratio.

**MM56** Modified Mercalli Scale of 1956.

**MSK-64** Medvedev–Sponheuer–Karnik Scale of 1964.

**MU** mimořádná událost.

**MUSLE** Modified Universal Soil Loss Equation.

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration.

**PAC** Protective Action Criteria for Chemicals.

**PGA** Peak Ground Acceleration.

**ppm** parts per milion.

**RUSLE** Revised Universal Soil Loss Equation.

**SIMWE** SIMulated Water Erosion.

**SM 5** Státní mapa v měřítku 1:5 000.

**SRN** Spolková republika Německo.

**SSHWS** Saffir–Simpson hurricane wind scale.

**SWAT** Soil & Water Assessment Tool.

**TEEL** Temporary Emergency Exposure Limits.

**TORRO** Tornado and Storm Research Organisation.

**UNISDR** United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

**USPED** Unit Stream Power - based Erosion Deposition.

**VCE** Vapour Cloud Explosion.

**WMO** World Meteorological Organization.

**ZABAGED** Základní báze geografických dat České republiky.

**ÚPD** územně plánovací dokumentace.

**ÚZEI** Ústav zemědělské ekonomiky a informací.

**ČHMU** Český Hydrometeorologický ústav.

**ČSÚ** Český statistický úřad.

**ČÚZK** Český úřad zeměměřický a katastrální.

[title=Seznam zkratk]

# Rejstřík

## ALOHA

- metrický systém, 24
- situace
  - lokace, 24
  - nebezpečná látka, 25
  - povětrnostní podmínky, 26
- zdroj úniku, 27
- únik
  - kaluž, 28
  - potrubí, 30
  - přímý, 28
  - zásobník, 29

bahnotoky, 111

BLEVE, 38

CAMEO Chemicals, 25

## data

- ohraničující, 66
- typ A, 66
- typ B, 66

EDAC, 57

EMS-98, 57

epicentrální intenzita, 77

fragilita, 65

## funkce

- fragility, 65
- zranitelnosti, 67

## GIS

- DIBAVOD, 21
- SM 5, 20
- ZABAGED, 20

Global Assessment Report, 74

jet fire, 41

## koncentrace

- PAC, 32
  - AEGL, 32
  - ERPG, 33
  - TEEL, 33

## křivky

- EP, 89
- fragility, 89
- zranitelnosti, 89

křivky poškození, 61, 89

## laviny

- nebezpečí, 108
- sněhové, 107

lichoběžníková metoda, 89

makroseismická intenzita, 77

model, 17

- empyrický, 17
- fyzikální, 17

## mortalita

- rychlost stoupání hladiny, 54
- výška hladiny, 54

nestabilita člověka v proudu, 55

pool fire, 42

poryv větru, 73

## povodeň

- hydrodynamický model, 21
- model eroze půdy, 21
- přirozená, 47
- Q100, 48
- Q20, 48
- Q5, 48
- srážkoodtokový model, 21
- zvláštní, 47

## pravděpodobnost

- distribuce, 62
- hustota, 62
- rozdělení, 62
- rozložení, 62

pád kamení, 112

riziko, 89

## rozdělení

- dvojitě exponenciální rozdělení, 64
- Gaussovo, 63
- Gumbelovo, 64
- log-Weibullovo, 64
- lognormální, 63
- normální, 63
- uniformní, 64

scénář, 18

- flash fire, 35
- VCE, 36

sesuv

- relativní intenzita, 94
- sesuv půdy, 93
  - model nebezpečí, 95
  - odolnost, 104
  - relativní intenzita, 94
  - silnice, 107
- stupnice
  - EMS-98, 78
  - MM56, 78
  - Modifikovaná Mercalioho stupnice, 78
  - Richterova, 77
- varování obyvatelstva, 85
- VCE
  - přetlak
    - lidi, 37
    - věci, 37
- větrná smršť, 69
- zdroj úniku, 18
- zemětřesení, 77
- zranitelnost sesuvy, 97
- zájmová koncentrace látky, 32
- území
  - ÚPD, 21
  - územně plánovací dokumentace, 21
- škála
  - Beaufort, 69
  - F-škála, 70
  - Fujita, 70
  - Fujita-Pearson, 70
  - rozšířená Fujitova, 71
  - Saffir-Simpson, 69
  - TORRO, 71