



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A INFORMATIKY

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

MODELOVÁNÍ POHYBU OSOB PŘI KONÁNÍ HROMADNÝCH AKCÍ

MODELING THE MOVEMENT OF PEOPLE WHEN ORGANIZING MASS CULTURAL
EVENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Nikolov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETRA OKŘINOVÁ

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|-------------------------|--|
| Studijní program | B3656 Městské inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program |
| Studijní obor | 3647R025 Městské inženýrství |
| Pracoviště | Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|-----------------|---|
| Student | Daniel Nikolov |
| Název | Modelování pohybu osob při konání hromadných akcí |
| Vedoucí práce | Ing. Petra Okřinová |
| Datum zadání | 30. 11. 2018 |
| Datum odevzdání | 24. 5. 2019 |

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Výkresové a mapové podklady pro řešené území; statistická data od pořadatelů kulturní akce; certifikované metodiky zabývající se aplikací pokročilých modelů pohybu osob pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik; právní předpisy regulující konání veřejných kulturních akcí a festivalů, vyhlášky, normy ČSN, technické podmínky a předpisy; vyhlášky a nařízení vydané přímo městem Vizovice; vnitřní předpisy, odborné texty, studie věnující tématu navrhování a bezpečnosti kulturních akcí; metodiky a koncepce ochrany měkkých cílů pro roky 2017-2020 vydány Ministerstvem vnitra České republiky, Bezpečnostní standardy pro pořadatele sportovních, kulturních a společenských akcí; odborná literatura zabývající se dynamikou davu (např. G. Keith Still Crowd Dynamic); odborná literatura zabývající se numerickým modelováním a obsluhou software; příp. další podklady.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce je definovat optimální uspořádání areálu a přilehlých částí v souladu s novými bezpečnostními standardy ochrany měkkých cílů při konání festivalu Vizovické Trnkobraní, tak aby bylo docíleno všech náležitostí pro plynulý pohyb a bezpečnost osob. Pro samotnou optimalizaci budou využity výstupy z vytvořeného modelu, které mohou ovlivnit fázi přípravy a plánování následného ročníku této kulturní akce. Textová část bude doplněna o základní rešerši týkající se problematiky ochrany měkkých cílů, dynamiky davu a vlastní popis užití software pro tvorbu modelů. V rámci práce bude provedena analýza, zmiňované kulturní akce, která podrobně popíše všechny aspekty mající vliv na fungování a komfortu pěšího provozu při konání akce. Součástí analýzy bude i vytvoření sady scénářů zkoumající možné krizové situace dle metodik ochrany měkkých cílů. Přílohou práce může být i specializovaná část, o jejímž zpracování bude rozhodnuto vedoucím práce v průběhu práce studenta na zadaném tématu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Vizovické Trnkobraní, jeden ze středně velkých festivalů každoročně pořádaných v naší republice. Bakalářská práce se zabývá modelováním pohybu osob právě během této kulturní události. Pro lepší pochopení problematiky, byli vytvořeny rozdílné scénáře a ve vyhodnocení následně došlo k jejich srovnání.

Cílem této bakalářské práce je rozklíčování krizových míst festivalu z pohledu pěší dopravy a následně stanovit efektivní kroky vedoucí k jejich optimalizaci. Dále klade důraz na minimální požadavky základního systému ochrany měkkých cílů, při pořádání hromadně kulturních akcí. A v poslední řadě přiblížení tvorby modelu široké veřejnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pěší doprava, pohyb, dav, numerický model, Vizovické Trnkobraní, měkký cíl, Pathfinder.

ABSTRACT

One of the medium-sized festivals held annually in the Czech republic – Vizovické Trnkobraní. The bachelor thesis deals with modeling the movement of people during this cultural event. To better understand the issue, different scenarios have been created and subsequently compared.

The aim of this bachelor thesis is to decipher the crisis spots of the festival from the point of view of pedestrian traffic and subsequently to determine effective steps leading to their optimization. Furthermore, it emphasizes the minimum requirements of the basic soft target protection system when organizing mass cultural events. Last but not least, bringing the model to the general public.

KEYWORDS

Pedestrian transport, movement, crowd, numerical model, Vizovické Trnkobraní, soft target, Pathfinder.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Daniel Nikolov *Modelování pohybu osob při konání hromadných akcí*. Brno, 2019. 72 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce Ing. Petra Okřinová

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Modelování pohybu osob při konání hromadných akcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 5. 2019

Daniel Nikolov
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Modelování pohybu osob při konání hromadných akcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 5. 2019

Daniel Nikolov
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji za život, který mi byl svěřen mými rodiči.

Tímto bych chtěl tedy poděkovat v první řadě, Danovi a Monice, za nepodmíněnou lásku a trpělivost, kterou do mě vkládají. Svým blízkým za podporu a motivaci se nevzdávat. Své drahé přítelkyni, která mi byla oporou při psaní této práce a vydržela bez jediného zaváhání po mém boku. Nakonec, a vlastně především mockrát děkuji vedoucí své práce Ing. Petře Okřinové, za skvělé vedení, ochotu pomoci a zachování chladné hlavy při projevu mých nedostatků. Děkuji.

OBSAH

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | ÚVOD..... | 11 |
| 2. | TEORIE A MODELOVÁNÍ OSOB | 12 |
| 2.1 | INDIVIDUÁLNÍ PROSTOR..... | 12 |
| 2.2 | ZÁKLADNÍ ROZMĚRY JEDNOTLIVCE..... | 12 |
| 2.3 | CHOVÁNÍ JEDNOTLIVCE..... | 13 |
| 2.4 | DAV A JEHO SPECIFIKACE | 13 |
| 2.5 | KVALITA PĚŠÍ DOPRAVY..... | 14 |
| 2.6 | VZTAH MEZI HUSTOTOU A RYCHLOSTÍ PĚŠÍ DOPRAVY | 15 |
| 2.7 | PŘEKÁŽKY A OMEZENÍ PĚŠÍ DOPRAVY | 16 |
| 2.7.1 | PŘEKÁŽKY V NAŠEM MODELU | 17 |
| 2.8 | VLIV JEDNOTLIVCE A SKUPINU NA DAV | 17 |
| 2.9 | VLIV VŮDCE NA SKUPINU | 18 |
| 2.10 | DAVOVÉ SITUACE A JEJICH BEZPEČNOST | 18 |
| 2.10.1 | VYKLIZENÍ..... | 19 |
| 2.10.2 | EVAKUACE | 19 |
| 2.10.3 | DAVOVÝ KOLAPS..... | 19 |
| 2.10.4 | TLAČENICE | 20 |
| 2.10.5 | BEZPEČNOST DAVOVÝCH SITUACÍ | 20 |
| 3. | PROBLEMATIKA MĚKKÝCH CÍLŮ | 22 |
| 3.1 | MĚKKÉ CÍLE..... | 23 |
| 3.2 | TYPY ÚTOKŮ: | 24 |
| 3.3 | ČASOVÁ OSA INCIDENTU..... | 25 |
| 3.4 | BEZPEČNOSTNÍ PRVKY..... | 26 |
| 3.4.1 | FYZICKÁ BEZPEČNOST..... | 26 |
| 3.4.2 | ELEKTRONICKÉ PRVKY | 26 |
| 3.4.3 | MECHANICKÉ PRVKY | 27 |
| 3.5 | MÍRA OHROŽENOSTI VIZOVICKÉHO TRNKOBRANÍ..... | 27 |
| 3.6 | POVINNOSTI POŘADATELE..... | 27 |
| 3.6.1 | BEZPEČNOSTNÍ DOPORUČENÍ PRO POŘADATELE | 28 |

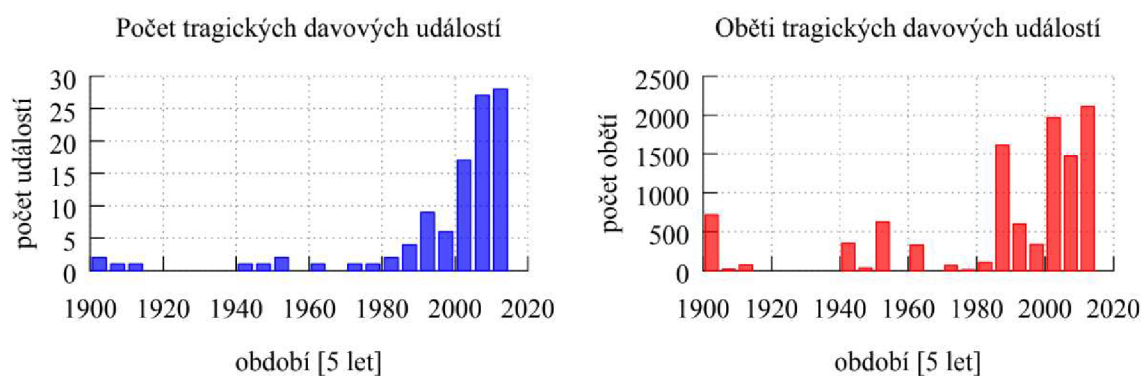
| | | |
|-------|--|----|
| 4. | NUMERICKÉ MODEL Y ZNÁZORNUJÍCÍ POHYB | 32 |
| 4.1 | MAKROSKOPICKÉ MODEL Y | 32 |
| 4.2 | MIKROSKOPICKÝ MODEL | 33 |
| 4.3 | CELULÁRNÍ AUTOMATY | 33 |
| 4.4 | AGENTNÍ TECHNOLOGIE | 34 |
| 4.5 | SOFTWARE PRO TVORBU NUMERICKÝCH MODELŮ | 35 |
| 4.5.1 | PEDESTRIAN DYNAMICS – INCONTROL Simulation Software..... | 35 |
| 4.5.2 | VISWALK – PTV Group | 35 |
| 4.5.3 | EXODUS – Fire Safety EngIneering Grops at the of Greenwich | 36 |
| 4.5.4 | PATHFINDER – Thunderhead Engeneering, inc. | 37 |
| 5. | VYUŽÍVANÝ SOFTWARE – PATHFINDER..... | 38 |
| 5.1 | TECHNOLOGIE MODELU..... | 38 |
| 5.2 | UŽIVATELSKÉ ROZHRA NÍ..... | 39 |
| 5.3 | VSTUPNÍ DATA, MOŽNOSTI A JEJICH OMEZENÍ..... | 40 |
| 5.4 | VÝSTUPY | 43 |
| 5.5 | PŘEDNOSTI A DALŠÍ MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ | 43 |
| 6. | MODELOVÁNÍ KULTURNÍ AKCE – VT..... | 45 |
| 6.1 | VÝVOJ FESTIVALU | 45 |
| 6.2 | LOKACE AREÁLU | 45 |
| 6.3 | NÁVAZNOST NA DOPRAVU | 46 |
| 6.4 | VSTUPNÍ DATA PRO MODEL | 46 |
| 6.4.1 | ZAMĚŘENÍ AREÁLU..... | 47 |
| 6.4.2 | VYMEZENÍ PLOCH AREÁLU BĚHEM VT | 47 |
| 6.4.3 | POČTY NÁVŠTĚVNÍKŮ A JEJICH VLASTNOSTI..... | 48 |
| 6.4.4 | POPIS PROVOZU PŘI KONÁNÍ FESTIVALU | 49 |
| 7. | MODEL Y | 50 |
| 7.1 | ZÁKLADNÍ MODEL | 50 |
| 7.2 | MODEL 1 | 51 |
| 7.2.1 | SCÉNÁŘ..... | 51 |
| 7.2.2 | PROBLÉMOVÁ MÍSTA A JEJICH OPTIMALIZACE..... | 52 |
| 7.3 | MODEL 2..... | 57 |

| | | |
|-------|--|----|
| 7.3.1 | SCÉNÁŘ..... | 57 |
| 7.3.2 | VÝSTUPY..... | 57 |
| 7.3.3 | SHRNUTÍ MODELU 2..... | 58 |
| 7.4 | MODEL 3..... | 58 |
| 7.4.1 | SCÉNÁŘ..... | 59 |
| 7.4.2 | VÝSTUPY..... | 59 |
| 7.4.3 | SHRNUTÍ MODELU 3..... | 60 |
| 7.5 | MODEL 4..... | 61 |
| 7.5.1 | SCÉNÁŘ..... | 61 |
| 7.5.2 | VÝSTUPY..... | 61 |
| 7.5.3 | SHRNUTÍ MODELU 4..... | 62 |
| 8. | SROVNÁNÍ VARIANT..... | 63 |
| 8.1 | MODEL 2 × MODEL 3..... | 63 |
| 8.2 | MODEL 3 × MODEL 4..... | 64 |
| 8.3 | SROVNÁNÍ VYUŽITÍ VÝCHODŮ DLE POČTU OSOB..... | 64 |
| 8.1 | SROVNÁNÍ VYUŽITÍ VÝCHODŮ V ČASE..... | 65 |
| 9. | ZÁVĚR..... | 66 |

1. ÚVOD

Taky se při hromadných akcích v uzavřených prostorech necítíte úplně bezpečně? Jestli ano, podívejme se blíže na problematiku kritických davových situací, řešení jejich prevence a bezpečnostní opatření. Práce se v první fázi věnuje teorii pohybu osob a davu, základní problematice ochrany měkkých cílů a popisu možnosti využití softwarů v rámci této disciplíny (ochraně měkkých cílů). V druhé fázi se zaměřuje na tvorbu numerických modelů a následné modelaci akce hromadné povahy, a to konkrétně festivalu Vizovického Trnkobraní (dále jen VT). Modely byly tvořeny v softwaru Pathfinder od firmy Thunderhead. Pomocí výsledků simulací definujeme optimální uspořádání areálu a přilehlých částí akce v souladu s novými bezpečnostními standardy pro ochranu měkkých cílů. Součástí analýzy bezpečnosti areálu festivalu bude vytvoření sady scénářů simulující vznik možných krizových situací dle současných metodik ochrany měkkých cílů. Konečné výstupy optimalizace vyplývající z analýzy výsledků budou aplikovány na fázi přípravy a plánování následného ročníku této kulturní akce, tak aby bylo docíleno plynulého pohybu lidí po areálu a bezpečnosti osob.

Ohrožení davu se datuje od roku 1900, kdy počet davových tragédií rapidně vzrostl. Po těchto událostech přijali organizátoři akcí a veřejné orgány nutná opatření. [1]



Obrázek 1: Statistika davových tragédií spojené se ztrátou na životech od roku 1900. [1]

Nejlepším a zároveň nejtragičtějším příkladem této problematiky je každoroční pouť do Mekky, která čítá přibližně na 2 miliony poutníků. Během této poutě přišlo o život na 1 753 osob. Dnes můžeme s jistotou konstatovat, že šlo zcela jistě o selhání ze strany organizace davových proudů, při kterém se střetli dva proudy v jednom z nejkritičtějších míst celé poutě – most Jamaraat. Tento most byl zrekonstruován, aby kapacitně vyhověl 600 000 osob za hodinu (tzn., že by přes tento most prošel celý český národ za 17,5 hodiny). Terorismus tedy není jedinou hrozbou při pořádání hromadných akcí. [1]

2. TEORIE A MODELOVÁNÍ OSOB

Jelikož dav tvoří velké množství jednotlivců, je nutností nejprve porozumět jeho primárním prostorovým nárokům. Hlavní měrnou jednotkou při modelování davu je jeho hustota [$\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$]. Prostorové nároky jednotlivce nebo skupiny se mění s jeho rychlostí v dynamickém pohybu. V této kapitole budou stanoveny základní parametry lidské entity pro tvorbu modelu. [1]

2.1 INDIVIDUÁLNÍ PROSTOR

Můžeme se zde bavit o půdorysné ploše jedince a jeho minimálním osobním prostoru, ve kterém se snaží vyhnout přímému dotyku s okolními osobami. Tento prostor je nazýván elipsou těla. [1]



Obrázek 2: Levý obrázek je koncept uvedený do praxe Johnem J. Fruinem, plocha této elipsy těla je $0,22 \text{ m}^2$. [2] Pravý obrázek je elipsa těla dle Pheasantova konceptu. Průměrná plocha této elipsy je $0,20 \text{ m}^2$. [3]

2.2 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY JEDNOTLIVCE

Jelikož je lidský druh rozmanitý, a každý máme jiné prostorové nároky vznikla snaha rozměry lidského těla zobecnit a kategorizovat.

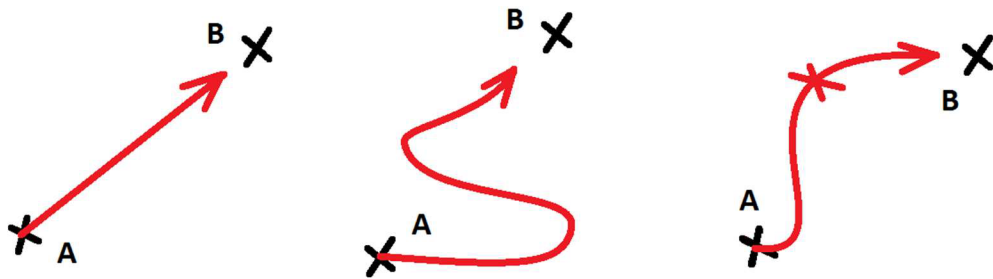
Tabulka 1: Rozměry lidského těla dle různých zemí původu a pohlaví se zaměřením na Evropu. [3]

| ROZMĚRY LIDSKÉHO TĚLA | | | |
|---------------------------|-------------|--------------|-------------------------|
| Země původu | Šířka [cm] | Hloubka [cm] | Plocha [m^2] |
| Velká Británie – muž/žena | 51,0 / 51,0 | 32,5 / 32,5 | 0,26 / 0,26 |
| Polsko – muž/žena | 47,5 / 41,0 | 27,5 / 28,5 | 0,21 / 0,18 |
| Francie – muž/žena | 51,5 / 47,0 | 28,0 / 29,5 | 0,23 / 0,22 |
| Švýcarsko – muž/žena | 51,5 / 47,0 | 28,0 / 29,5 | 0,22 / 0,23 |
| Průměr | 45,6 | 28,2 | 0,20 |
| Maximum | 51,5 | 32,5 | 0,26 |

Z tabulky vyplívá, že plocha elipsy těla se pohybuje v intervalu $0,20\text{--}0,26 \text{ m}^2$, čemuž odpovídá hustota $4\text{--}5 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$. [1]

2.3 CHOVÁNÍ JEDNOTLIVCE

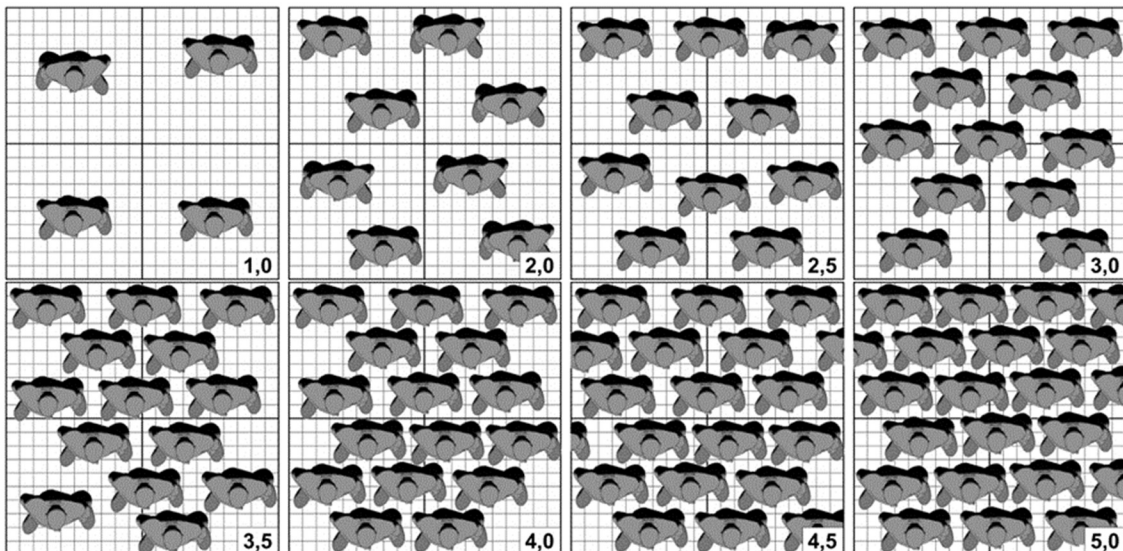
Je velké množství faktorů, které ovlivňují chování osob v rámci jejich pohybu. Mezi ně patří např. zájmy nebo cíle, neznalost terénu, smyslové vjemy, pozornost, motivace, reakce, energie, rychlost, prostor, překážky a další. Mozek při pohybu tělesného aparátu počítá trajektorie pohybujících se objektů nebo osob v závislosti na prostoru. Ve vazbě na tyto trasy poté vyhodnotí svou vlastní dráhu. Pokud hledáme trasu z bodu A do bodu B, máme teoreticky nekonečné množství možností. Tyto možnosti dále filtrujeme podle kritérií, jako jsou např. nejkratší trasa, průzkumná nebo dezorientovaná trasa, účelná trasa s přidáním zastávkami a jejich kombinace. [4]



Obrázek 3: Názorná ukázka trajektorie jednotlivce, seřazena dle výčtu nad ním.

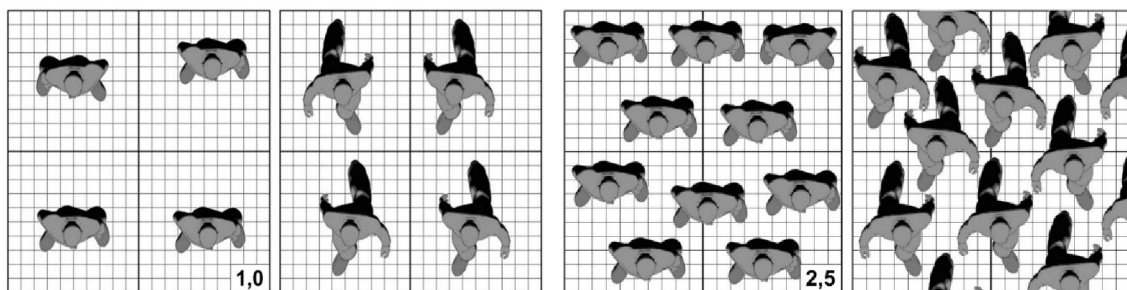
2.4 DAV A JEHO SPECIFIKACE

Definici davu berme jako seskupení většího počtu jednotlivců, které spojuje časově omezený cíl. Například v případě VT se jedná o hudební koncert. Při těchto událostech bývá počáteční hustota davu spíše statická, názorná ukázka na následujícím obrázku naznačuje postupné houštnutí davu nejzazší komfortní hustotu je $5 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$. [1]



Obrázek 4: Statická hustota osob v půdorysném pohledu [$\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$]. [5]

Dav lze přesvědčit nebo zmanipulovat snáze než jednotlivce. Může za to davový efekt zvaný „Band – wagon“ (přejímání názorů většiny, abychom nezůstali osamoceni). Řečeno jinak, ve chvíli, kdy se dav začne pohybovat, máme tendenci se k davu přidat. Může se jednat o pouhé skandování, nebo o samotné vyklizení celého areálu. V těchto případech lidé fungují v režimu „následuj toho před tebou“. Když jde jedinec s davem, neví, kam vlastně jde. Je to slepá důvěra k tomu před ním a ten věří zase tomu před sebou až k... Pohybující dav se vyznačuje dynamickou hustotou. Pokud by byl zablokovaný průchod pochodujícím davu a tento dav by byl dostatečně početný a měl počáteční dynamiku, resp. počáteční zrychlení, mohlo by docházet k davovým situacím, které by mohli vyústit až k davové tragédii. O těchto pojmech si řekneme v dalších podkapitolách. [5]

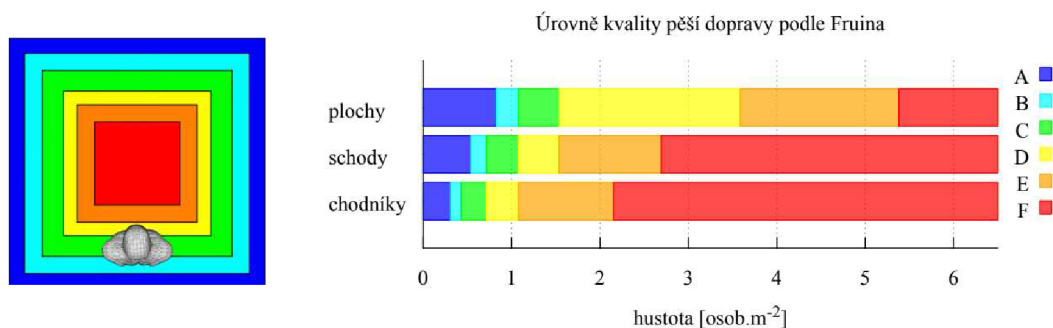


Obrázek 5: Srovnání statické a dynamické hustoty davu v půdorysném pohledu [os·m²]. [6]

2.5 KVALITA PĚŠÍ DOPRAVY

Stanovit základní metody pro hodnocení kvality pěší dopravy, byla jistě katarze, která vedla J. J. Fruina, k sepsání dnes již světově uznávaných standardů. Fruinova koncepce měří půdorysné rozměry lidského těla pomocí jeho hloubky a šířky ramen, což je také hlavní rozměr při dimenzování šířky vstupů, dveří, schodišť, ramp koridorů atd.

[1] [6]



Obrázek 6: Grafické znázornění kvalitativní stupnice k půdorysu osoby a následný výsledek hodnocení kvality pěší dopravy pro různé typy komunikací dle Fruina. Kvalita pěší dopravy klesá s rostoucí hustotou. [1]

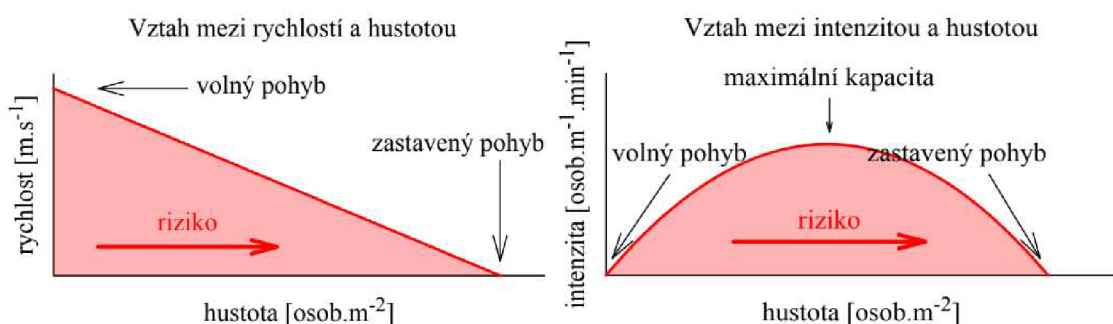
Metoda kvalitativně rozděluje prostor kolem osoby, ve kterém se může svobodně pohybovat, pomocí zjednodušené stupnice A-F. Rozdělením prostoru na jednotlivé úrovně, Fruin vytvořil základní škály pro hodnocení kvality pěší dopravy. Též známé jako Level of Service (= LoS), původem a běžně používaným termínem dopravního inženýrství. [1] [6]

Plocha pro pohyb a počet osob se v ní pohybující, přímo souvisí s rychlostí, kterou se jedinci pohybují. Rychlost pěší dopravy při hustotě $1 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$ je dle Fruina konstantní $1,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a obecně se při těchto parametrech dá tvrdit, že se jedná o individuální pěší dopravu. Fruin správně předpokládal, že rychlost pěší dopravy bude snižována s rostoucí hustotou nad $1 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$. Nicméně pro konkrétní hustoty davu a jim odpovídající rychlosti osob byly podrobeny dalšímu zkoumání z řad vědců. Dle výstupů by se dalo říci, že hodnocení pěší dopravy dle Fruina může být použito, jako hlavní hodnotící kritérium s vědomím přihlédnutím, k tomu, že Fruinovo hodnocení nezohledňuje přesně všechny parametry chování jedinců dynamického davu v reálném čase a prostředí. [6]

Potřeba lépe stanovit kritické hodnoty, vedlo k sepsání dalších metod a studií zkoumající tento specifický jev a to např. Green guide a studie japonského autora K. Togawa. [6]

2.6 VZTAH MEZI HUSTOTOU A RYCHLOSTÍ PĚŠÍ DOPRAVY

Jak jsme si vysvětlili v minulé kapitole, hustota davu má přímou návaznost na jeho rychlost. Pokud pohyb osob probíhá stejným směrem (vyklizení areálu, pochod davu koridorem do cílové destinace atd.), bavíme se o kvazilineárním vztahu. To znamená, že když je hustota osob nízká, pohybuje se dav rychlostí blízkou své maximální. Naopak s rostoucí hustotou klesá rychlost proudícího davu až do úplného zastavení. [1]



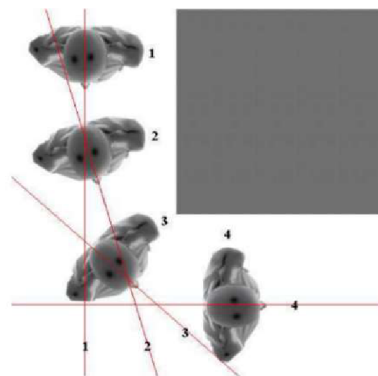
Obrázek 7: Graf vlevo představuje přibližný vztah mezi rychlostí a hustotou. Diagram vpravo přidává do vztahu intenzitu proudění osob. Tedy kolik osob projde daným průřezem za jednotku času. Je nutné si říct, že tyto grafy jsou definovány pro ideální případy. Při reálných měřeních vlivem složitosti jednotlivých událostí se od tohoto ideálního tvaru mohou lišit. [1]

Chceme-li porozumět problematice, musíme si položit základní otázku, zda je vysoká hustota nebezpečná. Vysoká hustota davu, může být hlavní příčinou krizových situací v případech, jako jsou střety dvou proudů, turnikety nebo úplné uzavření koridorů tzv. mrtvý konec atd.

Toto jsou případy, při kterých by měl být velmi početný dav okamžitě informován o situaci, aby mohl přizpůsobit svou rychlost, případně vyčkat na další pokyny organizátora. Obecně se s kritickými hustotami davu setkáváme při sportovních akcích, zúžených koridorech, hudebních festivalech... a ne vždy dojde ke krizové situaci, která by vedla ke ztrátě na životech. Dav sám sebe neohrožuje, když ví o zúžených koridorech a má dostatek času na průchod kritickým místem. Z následujících faktů plyne jedno ponaučení: „*Vysoká informovanost jednotlivce zajišťuje efektivní prevenci před davovou tragédií*“. [6]

2.7 PŘEKÁŽKY A OMEZENÍ PĚŠÍ DOPRAVY

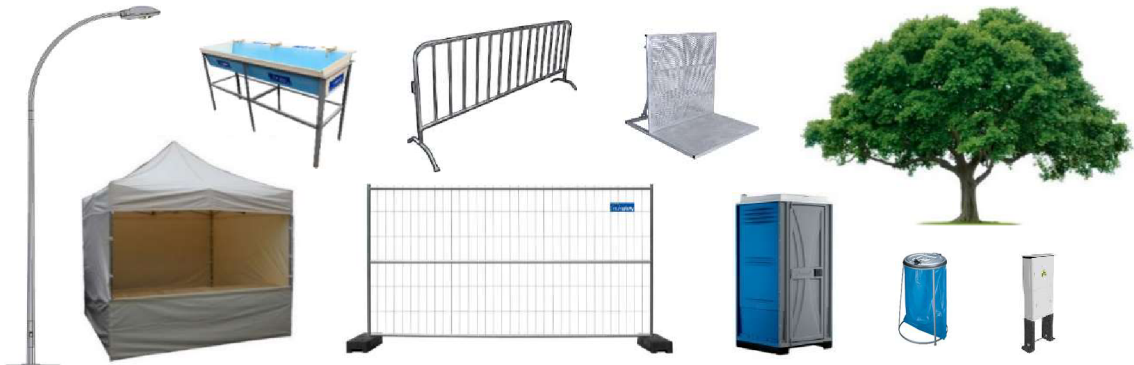
Překážky jsou dvojího typu, zaprvé statické tzn. geometrické omezení prostoru (sloup, letní zahrádka, schody, rampy, ...). A zadruhé dynamické tzn. objekty a osoby pohybující se po vlastní trajektorii (nepředvídatelné reakce chodců, dopravní prostředky atd.). Překážky zužují nebo omezují prostor, ve kterém se můžou lidé svobodně pohybovat. Pokud není pohyb jednotlivých osob dostatečně koordinovaný, dochází ke střetům elips těla. V těchto případech klesá rychlost pohybu a stoupá hustota. Když trasa chodce míří kolem rohu, vybíráme si podle předpokládaných trajektorií ostatních osob vlastní zakřivenou dráhu. To, co je za rohem, člověk nevidí, až do třetí pozice viz Obrázek 7. Na tomto základě, můžeme předpokládat, že v nepřehledných místech bude docházet ke kolizím chodců s větší pravděpodobností než v jiných. [6]



Obrázek 8: Pohyb osoby kolem rohu, rozdělený na 4 sekvence (osy zorného pole jsou vyznačeny červeně). [6]

2.7.1 PŘEKÁŽKY V NAŠEM MODELU

Výčet překážek, které nám vstupují do modelu této bakalářské práce (= BP) a ovlivňují tak geometrii prostoru. Těmito překážkami jsou: typizované stánky a stany, mechanické bezpečnostní prvky, celková vybavenost areálu, stavby a doprovodné objekty, flóra, ...



Obrázek 9: Názorná ukázka zmíněných prvků, které omezují geometrii areálu. [7] [8] [9] [10]

2.8 VLIV JEDNOTLIVCE A SKUPINU NA DAV

Běžně pozorovatelným jevem davu je rozdělení velkého počtu lidí do menších skupinek. Obecně platí, že s rostoucí hustotou je tento jev méně zřetelný. V našem případě je to např. dáno podmínkou: „Čím blíže pódiu, tím větší hustota osob pod ním“. Tento fakt je dán lidskou tendencí, být hlavnímu dění co nejbližší.

Makroskopicky se dynamický dav do jisté míry chová jako kapalina a osoby se vzájemně mísí v jednu entitu. Ve statickém davu se před pódiem tvoří skupinky osob, které mívají zjednodušený tvar podobný destičkám s klouby v ose osoby. Tyto destičky mohou nabývat různorodých tvarů a každý článek řetězce může samostatně interagovat se svým okolím. Nezávisle na ostatních člancích, se každý člověk může do shluku destiček a jednotlivců samostatně vmístit, shlukovat se s nimi a následně trousit velké celky.

Statický dav pod pódiem tedy není úplně statický. Spíše se bavíme o lidské substanci, která se ze vzdálenějšího bodu sledování může jevit nečinně.



Obrázek 10: Čistě pomyslné rozdělení do skupinek. Trnkobraní 2015. [11]

2.9 VLIV VŮDCE NA SKUPINU

Při přesunu skupiny, vůdce vybírá cestu, kudy se celek bude ubírat. Zde se znovu setkáváme s chováním kapaliny, ovšem v jiném smyslu. Dav musíme brát jako jeden celek, ve kterém se nachází množství trhlin, které při průchodu davem kladou menší odpor. Proto při pohybu skupiny, vůdce vybírá cestu nejmenšího odporu a má velký vliv na rychlost přemístění celé skupiny (analogie s vodním proudem). Výsledkem tohoto dynamického jevu může být až samovolná davová organizace. [6]



Obrázek 11: Ukázka vytvoření prosperujícího vzorce skupinového pohybu. [6]

2.10 DAVOVÉ SITUACE A JEJICH BEZPEČNOST

K davovým tragédiím způsobené samotným davem dochází již od 14. století až do dnes. Každé 4 měsíce dojde na světě k davové tragédii. Tento trend je způsobený většinou slabým řízením organizátora a podceněním dynamické energie davu už v prvotních fázích projektování akce.

*„Sedmdesát devět lidí zemřelo při útěku na stadion v Manillaon
Saturday, když se pokoušeli získat lístky na populární televizní show.
Většina obětí byly ženy pokročilého věku, které umačkal dav
o zavřenou železnou bránu.*

*Svědci říkají, že po tom, co někdo zakřičel „bomba“ vyvstala
neskutečná tlačenička a dav se začal cpát všemi směry, přitom nejspíš
šlo pouze o špatný žert někoho, kdo chtěl získat lístky.“*

John O'Callaghan o incidentu na filipínském stadionu v roce 2009

Ve chvíli, kdy hustota davu přesáhne $5 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$, jednotlivec ztrácí kontrolu nad svým svobodným pohybem. Může být davem nedobrovolně přirážen, tažen, či mačkán. Při velkých hustotách vymizí chování jednotlivce a dav znovu začíná připomínat kapalinu. V davu vznikají rázy, které se šíří. Tyto vlny mají ve zvyku zesilovat a vrcholit. Vlnění můžeme brát jako indikátor kritických hustot v uzavřených prostranstvích. Pokud je napětí v davu dostatečně veliké, mačkaný člověk doslova přestane dýchat. Jeho hrudník je zmáčknutý tak velikou silou, že se nemůžeme nadechnout a dochází k udušení. Riziko tragédií roste při zvětšující se hustotě davu, v úzkých nebo uzavřených koridorech, na rampách nebo schodech a při větší pravděpodobnosti páchání násilných činů. [1]

2.10.1 VYKLIZENÍ

Vyklizení nebo také opuštění prostoru (nekrizová situace). Při této davové situaci osoby spořádaně, bez větších známek strachu z hrozícího nebezpečí, opouštějí danou oblast. Může se zdát, že tento naprosto běžný jev (děti a dospělí opouštějí školské instituty ve stejnou chvíli, vyklizení budovy po konci pracovní doby, dokonce i obyčejný podchod je v neustálém stavu vyklizení...) je zcela bezpečný a není potřeba ho posuzovat jako rizikový davový stav. Pokud se na událost zaměříme kritičtěji, při tomto procesu se velký počet osob vystavuje riziku násilného útoku z důvodu jeho koncentrace na vyklízecí ploše či smluvených místech (např. vyhlášení požárního poplachu pro nalákání osob do úzkých koridorů). Proto i při tvoření vyklízecích plánů je dobré zvážit všechny scénáře.

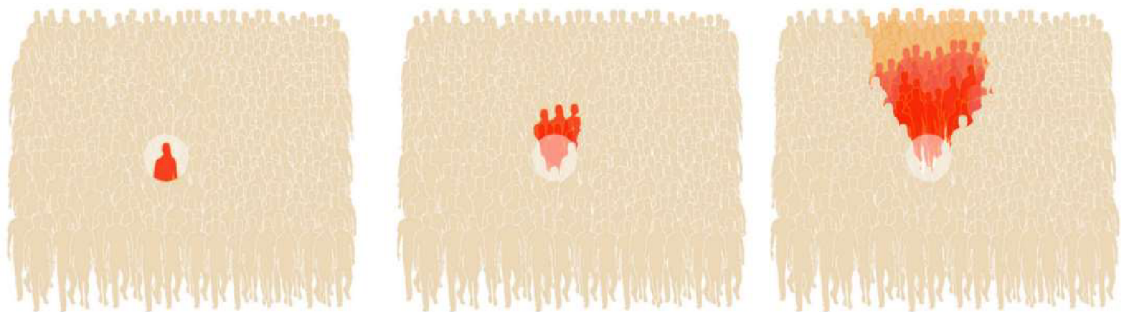
2.10.2 EVAKUACE

Jedná se o nouzové vylidnění prostoru při hrozícím nebo již probíhajícím nebezpečí. Evakuace je souhrn nástrojů pro efektivní přemístění osob. Hlavní nástroje evakuace jsou organizační přípravy a technická opatření (označení východů, směrové šipky, davová organizace aj. signály či značení). Právní náležitosti evakuace najdeme v zákonných a podzákonných normách.

2.10.3 DAVOVÝ KOLAPS

Jak předchozí kapitola naznačila, když dav přesáhne svou kritickou hodnotu hustoty, je vystaven zvýšenému riziku tzv. postupujícího davového kolapsu. Osoby v davu se chovají na principech newtonovské mechaniky. Každý člověk, na kterého silou působí jeho okolí akcí, vyvolává stejně velkou reakci. [1]

Riziko postupného davového kolapsu nastává ve chvíli, kdy se poruší rovnováha působením akcí a reakcí. Když někdo v davu strčí do jiné osoby, vzniká ráz a ten se následně šíří rovnoměrně davem, dokud nedojde k poklesu vnitřních tlaků a uvolnění vzniklého napětí (např. pád osob). [1]



Obrázek 12: Šíření vzniklého rázu davem. [5]

2.10.4 TLAČENICE

Tlačénice je dalším z typů davové tragédie. Nejčastější způsoby usmrcení účastníků při tlačénici je utlačení pohybujícím se davem nebo dokonce až rozdrčením o pevné překážky (ploty, stěny, brány, ...). Tlačénice je přesným označením popisu události v kapitole 2.9 Davová tragédie. Stejně jako v předchozích případech je pro bezpečnost akce zcela nezbytné, aby se předcházelo vzniku takových událostí a návštěvníci byly informováni o přítomné situaci (např. hromadně informovat o mylné informaci útoku, informovat dav o uzavřeném koridoru, ...). [1]

2.10.5 BEZPEČNOST DAVOVÝCH SITUACÍ

Z etických důvodů je jasné, že nelze provést experiment, ve kterém by došlo ke ztrátám na životech, a tak stanovit přesnou definici bezpečného davu. V praxi se proto využívá hlavně v uzavřených prostorech a prostranstvích tzv. pozorování vlnění davu (např. při rozsvícení vánočního stromu na Staroměstském náměstí v Praze). Když dav dosahuje jeho maximální a bezpečné hustoty, začne se vlnit jako hladina moře. Toto jsou příznaky jediné věci, a to absence volného prostoru, do kterého by se uvolnil přebytek energie. Takto na základě Newtonových zákonů, lze analogicky posuzovat osoby jako hmotné těleso a hodnotit tak celý jev z pohledu mechaniky. To znamená, že vlny způsobuje přebytek energie, který se nemůže uvolnit jinak než řetězovou reakcí (působením síly na okolní osoby, které působí na ty další okolo sebe až do vyprcháání přebytekové energie).

Dle metodik lze konstatovat, že statický dav může být bezpečný až do $5 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$. Ovšem při velké panice i bezpečný statický dav může vyústit v davovou tragédii. Dynamický dav je poté stabilní, např. dle Green guide, do $4 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$. Opravdu bezpečným se stává ve chvíli, kdy je možné dav průběžně upozorňovat na nebezpečné situace, a tak korigovat rychlost osob. Tím pádem se ovlivní i hustota davu v kritických místech (úzké koridory, ...).

Pro stanovení, zda je dav bezpečný a není zde žádné riziko davové tragédie, musíme znát vlivy, které mohou být jejich příčinou. Těchto vlivů může být celá řada a jejich posuzování je velmi autonomní činností. Uveďme si tedy ty nejdůležitější z nich: početnost samotného davu, geometrie prostoru, pravděpodobnost omezení pohybu (zátarasy, uzavření koridoru, ...), šikmé plochy, schody, šířky koridorů a mnoho dalších. Tento výčet je většinou předem daný a data pro model máme naprosto přesné z reálných měření. Proto je potřeba se zmínit, že dav může být ohrožen i neznámými faktory v podobě násilných činů nebo terorismu. Tuto problematiku popisuje následující kapitola, která dav řadí mezi měkké cíle.

3. PROBLEMATIKA MĚKKÝCH CÍLŮ

Již od pradávna se lidstvo setkává s akty hromadného násilí. Po světových válkách v naší zemi pozvolna došlo k uvolnění atmosféry a masové útoky s cílem zabít či způsobit újmu na zdraví se České republice relativně vyhýbají. Důvodem jsou fakta, že zde nefungují žádné teroristické organizace schopné naplánovat teroristický útok nebo jsou stále skryty. Komunity a společenské skupiny, které mají možnost radikalizovat a páchat násilné činy jsou také relativně málo aktivní. Prakticky se v naší zemi s těmito organizacemi nesetkáme, není tedy zapotřebí tyto skupiny odhalovat a následně je předvést před spravedlnost. To ovšem neznamená, že by se nad tímto malým rizikem mělo zanevřít. I když se České republice teroristické útoky vyhýbají více než ostatním státům Evropy, máme zde své vlastní rizika např. projevy extrémismu a rasismu. [12] [13]

Fakt, že potencionálních cílů v naší republice je obrovské množství, nezabývá se prevencí před útokem pouze stát, ale i samotné měkké cíle. Fráze „měkké cíle“ jsou souhrnným ozn. místa, s vysokou hustotou obyvatel a nízkou úrovní zabezpečení. Toto jsou dva hlavní faktory, které činí tyto cíle z pohledu útočníka atraktivními. [12] [13]

Atraktivitu měkkého cíle mohou zvyšovat tato kritéria:

- veřejná dostupnost;
- přítomnost a kvalita bezpečnostního personálu;
- množství a hustota osob;
- přítomnost Policie České republiky nebo obecní (městské) policie;
- přítomnost médií;
- symboličnost cíle a další. [12]

Usnesení vlády č. 711 ze dne 27. července 2016 zadalo úkol zpracovat Koncepti ochrany měkkých cílů pro období 2017–2020. Tato koncepce kompaktně sumarizuje problematiku měkkých cílů. Účel této Koncepce je nastavit republikový systém ochrany měkkých cílů tak, že při hrozícím útoku budeme schopni elasticky, přesně a rychle zareagovat. [12] [13]

3.1 MĚKKÉ CÍLE

Za měkký cíl se považují objekty, prostory nebo akce, které jsou doprovázeny větším počtem obyvatel a současně mají nízkou úroveň zabezpečení proti násilným útokům, tak jak jsme si uvedli v předchozí kapitole. Pokud se tedy na problematiku měkkých cílů díváme z humánního hlediska, je pro nás prioritou ochrana osob, které mohou být potencionálním cílem agrese. [12]

Měkké cíle dle metodiky:

- bary, kluby, diskotéky, restaurace a hotely;
- kina, divadla, koncertní sály, zábavní centra;
- komunitní centra;
- kulturní, sportovní, náboženské akce;
- náboženské památky a místa určená k uctívání;
- nákupní centra, tržiště a obchodní komplexy;
- nemocnice;
- parky a náměstí;
- politická shromáždění, průvody a demonstrace;
- sportovní haly a stadióny;
- školy, koleje, menzy, knihovny a veřejné instituce;
- turistické památky a zajímavosti, muzea a galerie;
- významné dopravní uzly všeho druhu;
- a další. [12] [13]

Měkké cíle dělíme na:

a) Trvalé:

- venkovní prostory (stadiony, trhy, náměstí atd.);
- vnitřní prostory (divadla, nemocnice, nákupní centra atd.).

b) Dočasné:

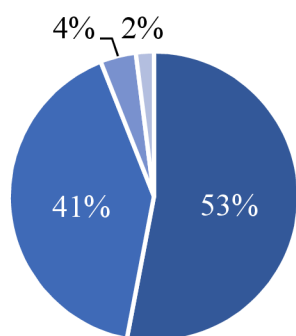
- akce s volným vstupem (demonstrace, sportovní akce atd.)
- akce s placeným vstupem (festivaly, koncerty atd.) [12]

Dále můžeme měkké cíle posuzovat dle počtu osob v danou dobu či roční období. Doba největší hustoty osob se nazývá „*peak time*“ (dopravní špičky, úřední hodiny, doba oběda v restauracích, hlavní čas koncertu, letní a zimní sezóna...). [12]

3.2 TYPY ÚTOKŮ:

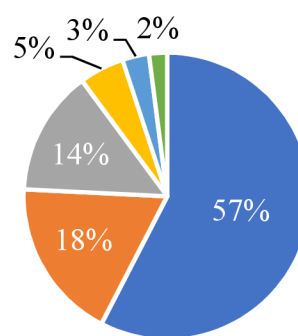
V této době je trendem útočit na veřejná místa se slabým zabezpečením, kde náboženské ani národnostní vazby nehrají velkou prioritu. Proto je problematika měkkých cílů tak obsáhlá, nikdy totiž dopředu přesně nevíme jak, kdy, kde a s jakou intenzitou bude útok realizován. [13]

CÍLE TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ



- Měkké cíle
- Vládní objekty, armáda a policie
- Ostatní
- Kritická infrastruktura

TYPY TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ



- Bombový útok
- Ozbrojený útok
- Infrastruktura
- Atentát
- Rukojmí při únosu
- Neozbrojený útok
- Neznámý

Graf 1: Zacilení a způsob provedení teroristických útoků v Evropě za období 1998–2014. [14]

Z těchto statistik vyplývá, že nejčastějším cílem útoků je měkký cíl a jako způsob násilného činu volí radikálové ve většině případů bombové útoky. [14]

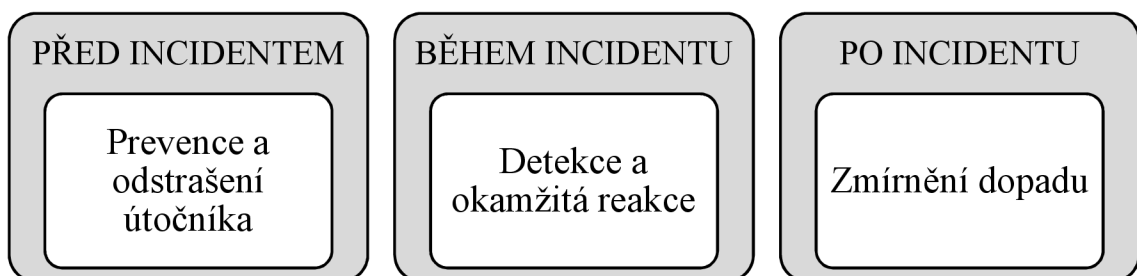
Měkké cíle jsou nejčastěji napadeny střelnou zbraní, tento způsob se z pohledu útočnicka ukazuje být nejefektivnějším. Dále pak chladnou zbraní (např. nožem, sekerou atd.) nebo nastraženou výbušninou jakéhokoliv typu. V poslední době se objevují případy útoku typu „car-ram“, tedy nájezd automobilového prostředku do početného davu osob. Ukazuje se, že efektivita útoku „car-ram“ je co do počtu obětí vyšší než u střelných zbraní. V druhé řadě je útok hůře odhalitelný a jeho provedení rychlejší než u ostatních typů. Tyto způsoby pak mohou tvořit celek kombinací simultánních útoků. [13]

Zásadní poznatky z minulých útoků

- 1) Lidem není hned jasné, že se jedná o násilný akt. Záměna zvuku střelné zbraně s pyrotechnikou.
- 2) Většinou nemáme během probíhajícího útoku dostatek informací. Bez ohledu na tento fakt musí bezpečnostní složka okamžitě jednat!
- 3) Ataky probíhají na několik cílů současně a během krátkého časového úseku.
- 4) Teroristické organizace nejčastěji volí bombové zbraně, a proto je dobré školit personál na rozpoznávání pochybných věcí.
- 5) Agresoři postupují cestou nejmenšího odporu. Je potřeba lidi informovat a naučit je řídit se touto logikou: „Pokud víš, že se jedná o nebezpečnou situaci, schovej se!“
- 6) Útočník nevnímá realitu střízlivě, většina z nich je na drogách, psychicky nemocných nebo na sebevražedné misi. [13]

3.3 ČASOVÁ OSA INCIDENTU

Kvalita a rychlost komunikace veškerých složek, které se v danou chvíli podílejí na ochraně měkkých cílů, je zásadním faktorem k minimalizování veškerých ztrát. K tomuto se používá metodický nástroj OORZ (Odstrašit – Odhalit – Reagovat – Zmírnit dopad). Tímto nástrojem ověřujeme, zda jsou navržena bezpečnostní opatření dostatečně účinná k riziku, jehož dopad má být snižován. [13]



Obrázek 13: Útok na měkký cíl z časového hlediska. [13]

Z pohledu oběti incidentu se v tomto časovém sledu doporučuje postupovat podle amerického výrazu „run-hide-fight“ neboli „uteč-schovej se-braň se“. Na tento výraz vznikají instruktážní videa, která školí možné oběti, jak se při takových incidentech zachovat. Pokud totiž k útoku dojde, dá se ještě čas dělit na dvě půlky, než přijede ochranná složka a doba dopadení pachatele. Časové úseky bývají rozděleny 60:40. [13]

3.4 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY

Nejdůležitějším při tvorbě zabezpečení není jeho kvalita, ale jeho praktičnost a správná vazba na ostatní součásti. Další neméně důležitou úlohou je správná selekce personálu a správné určení, jak bude zaměstnanec vyškolen a kontrolován. [13]

3.4.1 FYZICKÁ BEZPEČNOST

Bezpečnostní pracovníci

Bezpečnostní pracovníci mají na starost kontrolu vstupů, pochůzky a obsluhu velínu, ve kterém se nachází bezpečnostní technologie. Fyzická síla je nejlepším bezpečnostním opatřením. Má totiž dopad na všechny čtyři základní pilíře metodiky ochrany měkkých cílů v čase. Tito vysoce vyškolení zaměstnanci nebo externisti ohrožené instituce, pracují dle standardizovaných protokolů, stručných instrukcí a taktických nácviků. [13]

Ostatní personál

Ostatní personál, který udržuje aktivity v chodu, nespadá primárně pod bezpečnost, ale může se na bezpečnosti podílet (vrátní, školníci, pořadatelé akce, učitelé atd.). Management organizace je velmi důležitý při koordinaci kroků, které je třeba provést po bezpečnostním zásahu. [13]

3.4.2 ELEKTRONICKÉ PRVKY

Kamerový systém

Kamerový systém slouží k monitorování všech prostor a osob se v nich pohybujících. Může být obsluhován bezpečnostním personálem nebo sloužit pro zpětné přehrávání. Pokud z jakýchkoliv důvodů není možné kamery instalovat tak, aby monitorovali veškeré prostory, upřednostňují se kamery monitorující vstupy. Množství kamer závisí na počtu obsluhy kamer. Na 17“ monitor se doporučují maximálně 4 kamerové pohledy. Kamery můžeme přepnout do režimu sepnutí, tzn. v případě zaznamenaného pohybu, dojde k rozsvícení monitoru a ten upoutá pozornost obsluhy. Tyto systémy mohou být doplněny o analytické funkce jako je rozpoznání obličejů, podezřelých aktivit apod. [13]

Rozhlas

Velmi účinný prvek pro komunikaci s měkkým cílem. Přímým hlášením, dokážeme poskytnout informace o dané situaci téměř okamžitě.

Dalšími elektronickými prvky jsou rentgen, detektor kovů, výbušnin, osvětlení a další.

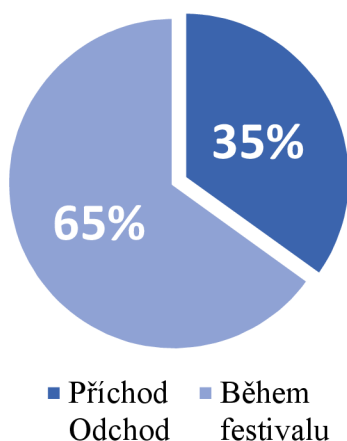
3.4.3 MECHANICKÉ PRVKY

Bezpečnostní prvky, které po instalaci nepotřebují žádnou stálou obsluhu. Jsou to elementy, které omezují nebo úplně blokují neautorizovaným osobám přístup na zabezpečovaná místa (ploty, turnikety, bezpečnostní okna a dveře, sloupky, betonové bloky, mobilní barikády atd.). [13]

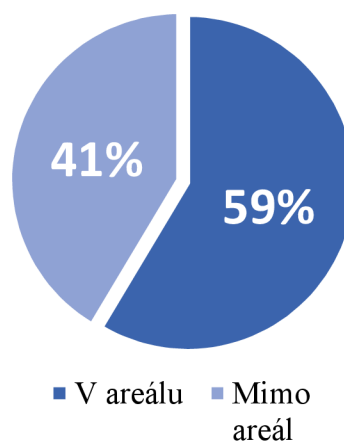
3.5 MÍRA OHROŽENOSTI VIZOVICKÉHO TRNKOBRANÍ

Na měkký cíl BP, byl aplikován postup z metodiky Vyhodnocení ohroženosti měkkého cíle zpracovanou Ministerstvem vnitra. Dokument se zaměřuje na snadné sestavení tabulek, podle kterých se lze lehce orientovat v tom, jaké bezpečnostní prvky se budou zřizovat prioritně a jaká místa budou mít větší úroveň zabezpečení. Při stanovování hodnot metodika využívá kvantitativních stupnic, které jsou doplněny o slovní komentář pro snadné hodnocení. [15]

POMĚR OHROŽENOSTI V
ZÁVISLOSTI NA
NAČASOVÁNÍ ÚTOKU



POMĚR OHROŽENOSTI V
ZÁVYSLOSTI NA
LOKALIZACI HROZBY



Graf 2: Grafické vyhodnocení celkové míry ohroženosti Vizovického Trnkobraní v závislosti na načasování a místa útoku, vypracované dle metodiky [15]

3.6 POVINNOSTI POŘADATELE

Jako další z nástrojů poskytované Ministerstvem vnitra pro lepší ochranu měkkého cíle je brožura s názvem Bezpečnostní standardy pro pořadatele sportovních, kulturních a společenských akcí. Tento dokument souhrnně informuje o:

- zákonných úpravách (na co pořadatel má právo a jaké jsou jeho povinnosti),
- náležitostech obecně závazných vyhlášek obcí (regulace hromadných akcí),
- základních bezpečnostních doporučení pro pořadatele. [16]

3.6.1 BEZPEČNOSTNÍ DOPORUČENÍ PRO POŘADATELE

Nástroj představuje 12 bodový seznam, který stanovuje, komu se mají hromadné události hlásit, kdo při tvorbě bezpečnostních opatření bude oporou a také poskytuje základní kostru pro sestavení komplexního systému zabezpečení. [16]

1. Nahlášení akce

Nahlášení termínu pořádání akce v dostatečném předstihu všem dotčeným orgánům (obec, Hasičský záchranný sbor ČR = HZS, Policie ČR = PČR, Záchranou zdravotnickou službu = ZZS). [16]

2. Určení odpovědné osoby a kontrolní centrum

Tato osoba bude odpovědná za veškeré akty spojené s bezpečnostním opatřením akce a zároveň je uvedena jako kontakt ke komunikaci s PČR a veřejnými médii. Hlavními podmínkami pro určení odpovědné osoby je její dostatečná kvalifikace a neustálá dostupnost. Při větší akcích je doporučeno zřídit kontrolní centrum, které řídí vedoucí bezpečnosti a bude sloužit pro efektivní koordinaci bezpečnostních opatření. [16]

3. Kooperace s integrovanou záchrannou službou

Prosba integrované záchranné službě (= IZS) o součinnost při zajištění bezpečnosti pořádané akce. IZS provede prohlídku areálu a nácvik standartních postupů. Dále se zve IZS k první koordinační poradě a před samotným zahájením se vyžádá finální koordinační porada. Po ukončení akce následuje debriefing (sdělení poznatků pro možné zlepšení bezpečnosti dalších ročníků). [16]

4. Analýza hrozeb a vyhodnocení rizik

Na základě zkušeností z minulých let, předpovědi počasí, známých nebezpečí (pyrotechnika, hořlaviny...) a vyhodnocení míry ohroženosti měkkého cíle se účelně nastaví bezpečnostní opatření. Vhodná konzultace s PČR. [16]

5. Pořadatelská služba

Na bezpečnost akce nemají vliv pouze bezpečnostní složky, ale i ostatní personál. Proto je nutností za tímto účelem proškolenovat i ostatní zaměstnance. [16]

6. Bezpečnostní dokumentace

Bezpečnostní dokumentace obsahuje kartu areálu, komunikační plán, bezpečnostní plán, koordinační plán a evakuační plán (případně i invakuační plán).

Dle těchto dokumentů se školí všichni zaměstnanci a zřizují se koordinační štáby, které za pomoci těchto plánů řídí koordinaci bezpečnostních složek během krizové situace. Obsah lze konzultovat s IZS a zpracovaná dokumentace je předána PČR. [16]

7. Školení

Školení, případně bezpečnostní briefing nebo cvičení mohou být velmi intenzivní (např. každý den před zahájením a na konci akce). Bezpečnostní standard doporučuje účast IZS při těchto bezpečnostních aktivitách. [16]

8. Návštěvní řád

Řád podobný například tomu školnímu, stanovuje práva a povinnosti všech osob, které se akce účastní nebo se podílí na jejím provozu. Správnou efektivitu návštěvního řádu zajistíme zveřejněním na veřejně dostupném místě a pravidelnou kontrolou jeho dodržování (důležité části je vhodné umístit na vstupenku, přístupovou kartu...). [16]

9. Komunikace

Komunikace se řídí dle vypracovaného plánu, který zahrnuje komunikační rutiny i postupy v případě nouze. Pro zlepšení funkce celého procesu je možné využít kontrolního centra jako hlavní spojovatelny. Všechny důležité kontakty se zpracovávají do tabulky dále poskytují složkám IZS a veškerému personálu. Dalším vhodným způsobem zajištění komunikace účastníků s bezpečnostními složkami, na které se mohou obrátit pomocí telefonu, je vystavením kontaktních údajů na viditelném místě.

Nepřetržité komunikace s PČR docílíme zapůjčením používané radiostanice [16]

10. Varování návštěvníků

Varování návštěvníků může být součástí bezpečnostní dokumentace. Stanovuje, jakým způsobem a z jakých míst bude varovná zpráva vysílána. Tyto zprávy mohou být předpřipravené a mít více variant. O jejich znění se můžeme radit s PČR. [16]

11. Bezpečnostní incidenty

Veškeré bezpečnostní události, nehledě na jejich zdánlivou bezvýznamnost, se po celou dobu akce evidují a informace o podezřelých situacích hlásí vedoucímu bezpečnosti případně PČR (dle podezření a potřeby). [16]

12. Bezpečnostní kontroly

První bezpečnostní kontrola areálu proběhne ještě před zahájením akce. Během vstupní kontroly se personál zaměří zejména na nedovolené předměty a podezřelé chování (kontrolujeme i v areálu během hromadné akce). Dále kontrole podléhají všechna přijíždějící vozidla a odložená zavazadla. [16]

4. NUMERICKÉ MODELY ZNÁZORNUJÍCÍ POHYB

Kapitola shrnující různé typy modelů a postupů, jak přistupovat ke komplexnímu modelování osob a jejich pohybu. Stanovit základní požadavky pro realistické ztvárnění modelované situace s návazností na efektivní vyhodnocení je základním kritériem při výběru nejvhodnějšího typu modelu.

4.1 MAKROSKOPICKÉ MODELY

„*MAKRO = VELKÝ*“

Tento přístup nahlíží na osoby jako na nepřetržitě uspořádaný děj událostí, který je omezen pouze obecnými pravidly. Tyto pravidla v zásadě lze stanovit pomocí okrajových podmínek, naměřených hodnot. Model je zakládán také na odvozených fyzikálních jevech proudění kapalin či plynů. [1]



Obrázek 14: Typické pro makroskopický model je práce s celkem, a ne s jednotlivými osobami. Tento obrázek vyznačuje nejpoužívanější trasy v prostoru britského kampusu. [17]

Hlavní charakteristikou makroskopického modelu je práce s již akumulovanými hodnotami, které graficky vyznačují měřitelnou vlastnost skupiny osob jako celku. Například střední rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], hustotu [$\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$] či rychlosti vyklizení [$\text{os} \cdot \text{s}^{-1}$] v daném místě modelu. Obecně jsou makroskopické modely náročné hlavně z matematického hlediska, neboť obsahují množství těžkých diferenciálních rovnic. Díky vyvinutým softwarům je tato náročná matematická disciplína automatizována, a tak stačí do modelu přidat pouze jednotlivá data (geometrii, osoby, chování...). Následně software spočítá diferenciální rovnice a výstupy jsou statisticky zpracovány pomocnými nástroji. Pokud tedy chceme modelovat pohyb osob v menším měřítku je pro nás tato možnost nevhodná. [1]

4.2 MIKROSKOPICKÝ MODEL

„MIKRO = MALÝ“

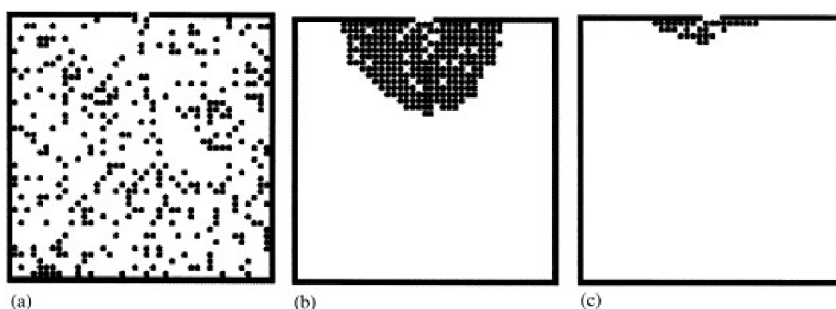
Patrné z latinského překladu, tyto dva modely se liší pouze velikostí děje nebo dějů, které zkoumají. Mikroskopický model má menší měřítka a většinou nepočítá s osobami jako celkem, nýbrž s každou osobou zvlášť.



Obrázek 15: Mikroskopický model s jednotlivými osobami a jejich trajektoriemi. [18]

4.3 CELULÁRNÍ AUTOMATY

Možností modelovat na základě tzv. celulárních automatů získáváme prostor rozdělený na diskrétní identické buňky, jejichž velikost vychází z požadavků na individuální prostor osob. Každá z těchto buněk může být prázdná nebo obsazená právě jedním jedincem. Časové hledisko můžeme chápat jako rozdělení samotné simulace na stejně vzdálené kroky. Správným poměrem mezi velikostí buněk a délkou jednotlivých kroků získáváme realistickou hustotu osob v našem modelu. [1]

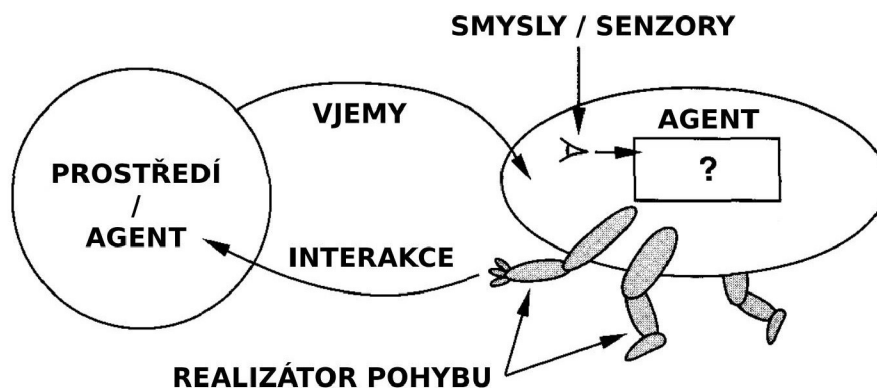


Obrázek 16: Příklad simulace vyklizení místnosti s jedním východem pomocí celulárního automatu. [19]

Asi nejznámějším celulárním automatem je světová hra šach. Přímá analogie k této hře pomůže pochopit celou problematiku. Hra je založena na jistých definicích tzv. přechodových pravidlech a podmínkách kdo, kdy a kam se za jakých okolností může pohybovat. Celulární automat tyto pohyby zaznamená a poté vytváří iluzi pohybu. Výhodou této metody je rychlost a jednoduchost. [1]

4.4 AGENTNÍ TECHNOLOGIE

Nejmodernější způsob modelování, který rozdělí model na tzv. agenty a prostředí. Agent v tomto prostředí představuje právě jednu osobu. Stejně jako my, má své jedinečné vlastnosti, může interagovat s dalšími agenty a také se svým prostředím. [1]



Obrázek 17: Na tomto schématu je založena celá agentní technologie. Získávání vjemů za účelem odpovědi, dat a výsledků. [20]

Každý agent má jistou úroveň samostatnosti a není zcela ovládán lidmi tzv. **autonomní agent**. Jednotlivé vjemy a interakce jsou zprostředkovány pomocí agentních programů, tzn. funkce agentů, která mapuje prostředí a na základě vjemu přechází k interakci. Tento program se zcela jistě spouští na počítačovém zařízení, kterému se říká architektura. [20]

„AGENT = ARCHITEKTURA + PROGRAM“ [20]

Přidáváním dalších vzorců chování do agentních programů, učíme agenty jak se uvnitř prostředí „správně“ chovat. Vkládání provádíme pomocí stavových proměnných, diferenciálních rovnic a přechodových tabulek. Jsou to matematicky popsání příkazy, způsoby a možnosti, agenta interagovat se svým okolím. [1]

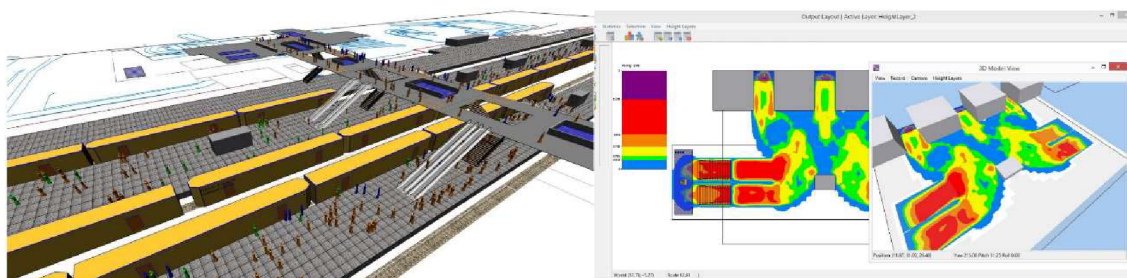
Typické příklady jako hledět nejbližší cestu k cíli, vyhnout se srážce s okolními agenty, jít zaplatit ke kase a odejít z restaurace nejbližšími dveřmi a další podobné vzorce jednání. Zohlednění chování jednotlivých osob pomocí agentů dává agentním technologiím značnou výhodu v realistickém zobrazení modelu. Snadná, přesná a rychlá vizualizace výsledků dělá z této technologie jednu z nejvyužívanějších po celém světě. [1]

4.5 SOFTWARE PRO TVORBU NUMERICKÝCH MODELŮ

Nástroje, které poskytují uživatelská rozhraní pro jednoduchou tvorbu modelů a scénářů chování davu či jednotlivých osob. Následně provedou simulaci a poskytnou všechny dostupné formy výsledků z nashromážděných dat. V další kapitole se podíváme přímo na jeden z těchto softwarů a probereme ho více do hloubky.

4.5.1 PEDESTRIAN DYNAMICS – INCONTROL Simulation Software

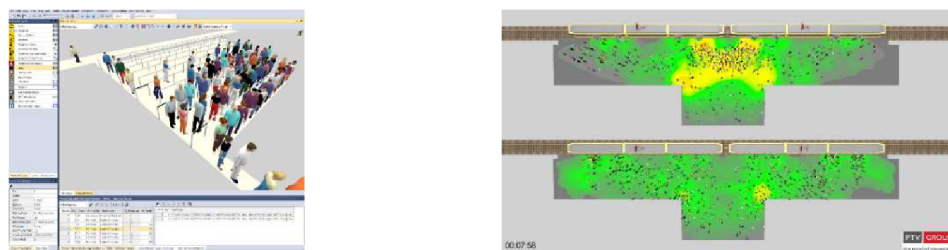
Nizozemský software využívající agentní technologie. Import či případné úpravy geometrie modelu jsou naprostou samozřejmostí a jednoduchost uživatelského rozhraní je výhodou. Hlavní předností tohoto softwaru je možnost vytvořit dopravní prostředky jako např. vlaky, autobusy a tramvaje. Pedestrian Dynamics zvládá spouštět simulace i při sto tisíci osob. [21]



Obrázek 18: Vlevo 3D model vlakové stanice i se zmíněnými dopravními prostředky a vpravo výsledek simulace (2D a 3D) na kterém jsou barevně odlišeny průměrné hustoty osob v čase. [21]

4.5.2 VISWALK – PTV Group

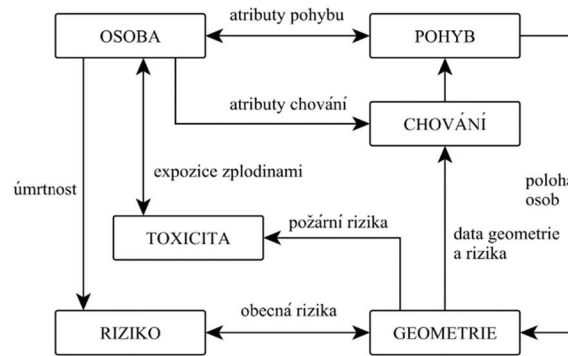
Je modul samostatného nástroje VISSIM. Dříve se tento německý nástroj zaměřoval na obecné dopravní plánování. Pokud se budeme zajímat například o dopravní infrastrukturu města, skoro veškeré komunikace jsou v přímém spojení s chodci. Proto byl tento nástroj rozšířen o model pohybu osob a interakcí s dopravními proudy. [1]



Obrázek 19: Uživatelské rozhraní VISWALKU a zobrazení výsledků simulace 2D. [22]

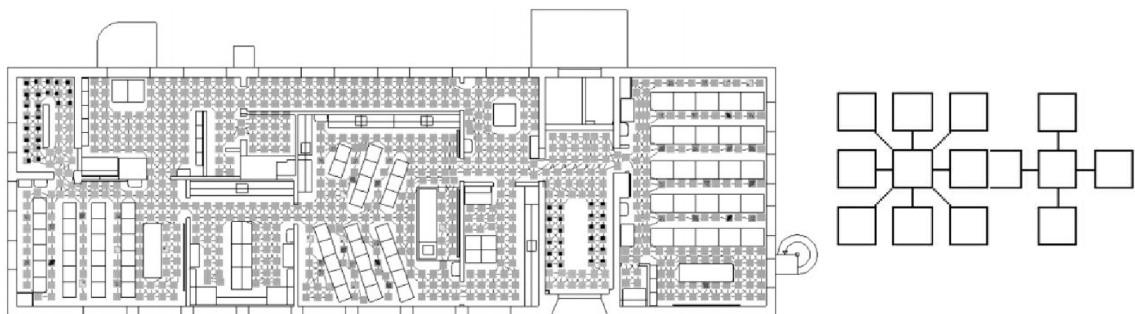
4.5.3 EXODUS – Fire Safety Engineering Grops at the of Greenwich

Britský software využívaný jak pro simulaci vyklizení, tak pro simulaci samotné dynamiky chodců. Program obsahuje množství modulů přizpůsobených pro budovy, námořní, železniční a letecká prostředí. Nástroj sklídl řadu významných ocenění a byl uznán britským ministerstvem obrany jako certifikovaný únikový nástroj, splňující nejprísnejší kritéria pro vývoj a hodnocení válečných lodí. [23]



Obrázek 20: [1] Exodus obsahuje pět submodelů, které komunikují s jádrem nástroje (osoba, pohyb, chování, toxicita, riziko). Submodely jsou napsány pomocí programovacího jazyka C++. Obsah jasně stanoví sadu pravidel a funkci každého submodelu. Exodus následně sleduje a zaznamenává trajektorie všech osob na rozhraní geometrie dle napsaných kritérií. [23]

Geometrie konstrukce je pokryta prostorovou mřížkou, tyto mřížky se na rozdílných výškových úrovních můžou spojovat a vytvářet tak navzájem propojená samostatná okna modelu (tzn. 1 podlaží = 1 okno). Podkladem rozvržení geometrie mohou být soubory vytvořeny pomocí nástrojů CAD, BIM, SMARTFIRE a geometrie FDS CFD, obecně to jsou výkresy ve formátu DXF. [23] Mřížka je tvořena pevnými uzly, které mohou být obsazeny pouze jednou osobou. Osobám je také umožněno vykonávat různé pohyby a manévry (úkok, natočení...). Každý uzel je vzájemně propojen s dalšími uzly pomocí tzv. oblouků. Ty jsou standartně vzdáleny v intervalu 0,5 m. [1]



Obrázek 21: Může se zdát, že model funguje na základě celulárních automatů. Proto se nenechme zmást vizuálním konceptem a budme si jisti, že nástroj funguje na principu agentních technologií. [1]

4.5.4 PATHFINDER – Thunderhead Engeneering, inc.

Americký software, který je využit pro modelování této BP. Detailní rozbor tohoto nástroje je popsán v následující kapitole.

5. VYUŽÍVANÝ SOFTWARE – PATHFINDER

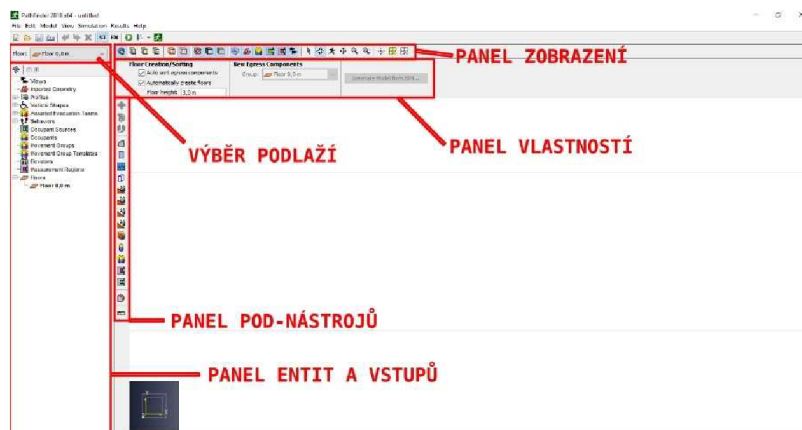
Pro tvoření modelu této BP, byl vybrán analytický nástroj Pathfinder od produkční společnosti Thunderhead Engeneering, Inc. Pro tvoření modelů využívá agentů, kteří se pomocí přiděleného chování pohybují. Umožňuje, jak simulaci volného pohybu, tak i vyklizení. Konstrukce nástroje se skládá ze tří modulů: uživatelského rozhraní pro tvorbu modelu, simulátoru pro výpočet dat a 3D prohlížeče výsledků. [1] [24]

5.1 TECHNOLOGIE MODELU

Pathfinder poskytuje dvě primární možnosti modelování pohybu osob: *režim SFPE a režim inverzního řízení (steering)*. Režim SFPE využívá koncept z příručky SFPE Protipožární ochrana, kterou napsali Nelson a Mower roku 2002. Tento režim je velmi blízký makroskopickým modelům, jelikož je založen na principech proudění. Hlavními faktory rychlosti proudu nebo proudů jsou především hustoty osob v každém místě modelu a průchodné šířky jednotlivých dveří. Režim inverzního řízení zakládá na autonomním chování každého agenta. Základní myšlenka byla poprvé popsána v článku od Craiga Reynoldse roku 1999 a poté byla předefinována do dnešní podoby inverzního řízení v článku Heni Ben Amor roku 2006. Tento režim se tedy zase o značný kus přiblížil realitě. Proč? Protože, podněcuje u agentů jejich samostatnost, která do modelu vnáší psychologický profil osobnosti (každý agent na základě událostí, přehodnocuje svou vlastní trajektorii v reálném čase). Nehledě na to, že se výsledky režimů nepatrně liší, jsme si pro BP zvolili režim inverzního řízení, jelikož je v ohledu modelování jednotlivých osob komplexnější a mnohem pokročilejší než první zmíněný režim SFPE. [1] [24]

5.2 UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ

Toto grafické prostředí lze rozdělit na 5 hlavních částí viz následující obrázek.



Obrázek 22: Popis a grafické zobrazení uživatelského rozhraní nástroje Pathfinder.



Panel zobrazení

Panel umožňuje natáčet model nebo se přímo přepínat mezi základními pohledy. Zobrazovat námi povolené entity, jakými jsou např. osoby, objekty, materiály, importovaná i vnitřní geometrie a další. V poslední řadě zajišťuje výběr, přibližování, oddalování natáčení a možnost se modelem „projít“.

Panel pod-nástrojů

Tato nabídka nástrojů umožňuje do modelu přidávat jednotlivá vstupní data. Od tvorby samotných příček a dveří, přes tvorbu místností, schodišť a výtahů až k přidávání jednotlivých agentů jako samostatného jedince či skupinu. Příprava, důkladnost a pečlivost při komplexní tvorbě modelu je jednou z nejdůležitějších činností uživatele, od které se odvíjí správný výsledek modelování.

Panel entit a vstupů



Hlavní úlohou tohoto panelu je uživateli zprostředkovat jakýsi katalog vytvořených entit. Sloužit především ke správě prvků a po označení požadované položky, ve spolupráci s panelem vlastností umožnit rychlé nastavení zvolených součástí, které právě tvoříme nebo měníme vlastnosti již vytvořených entit. Panel disponuje ještě jednou neméně důležitou funkcí. A tou je přidávání vzorců chování agentů ( Behaviors) a nastavování jejich samotných vlastností ( Profiles).



Přímo nad tímto panelem je lišta správce podlaží, a základní předvytvořená výšková úroveň 0,0 m. Po rozkliknutí panelu můžeme vytvořit další patra a následně volit, ve kterém podlaží budeme modelovat.

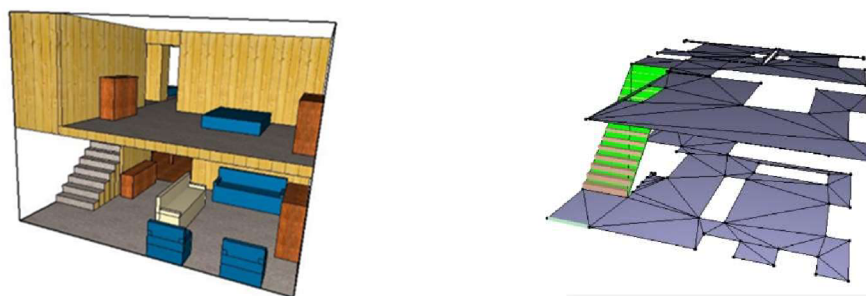
5.3 VSTUPNÍ DATA, MOŽNOSTI A JEJICH OMEZENÍ

Tvorba geometrie

Nástroj využívá 3D geometrického modelu, který je doplněn tzv. navigační mřížkou (meshi). Obdobně jako u metody konečných prvků je zde plocha geometrie rozdělena pomocí triangulační sítě. Jednotlivé meshe mají nastavené konkrétní velikosti a vlastnosti. Osoby se v modelu mohou pohybovat pouze po této předem definované síti. Import geometrie je podporován ve formátech DXF nebo DWG. Po importu geometrie je nutné vytvořit navigační mřížku, schodiště, rampy a výtahy. [24] [1]


Tvorba sítě je tvořena pomocí pravidelných nebo polygonálních ploch tzv. místností ( *Rooms*). Pokud jsme geometrii drátového modelu importovali, můžeme využít možnosti vylít plochy nahrané geometrie ( *Extract room from imported geometry*). Každé místnosti můžeme následně změnit její kapacitu a rychlost jakou se osoby na této ploše pohybují.

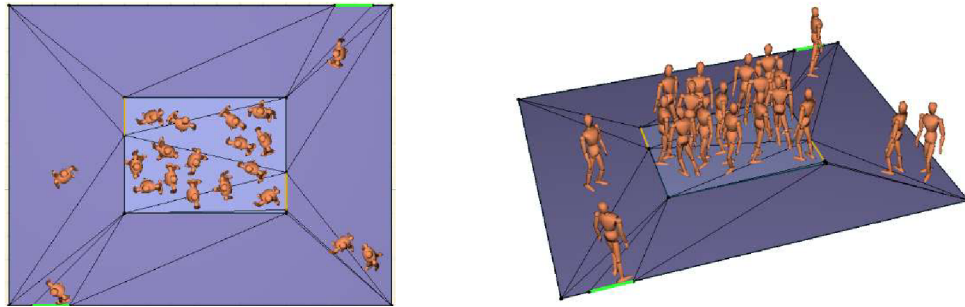
V rámci geometrie pak tvoříme schody a rampy. Jejich vytváření je podobné tvorbě místností a možnost úpravy jejich vlastností skoro totožná. Dále je pak možné vytvořit tenké stěny ( *Thin wall*), které nemají na dodržování bezpečných vzdáleností vliv, ale osoby jimi neprojdou (tvorba front, koridory, zábradlí atd.). Druhá možnost je tlustá stěna ( *Thick wall*), která je plnohodnotnou stěnou a lidé si od ní budou držet nastavené odstupy.






Obrázek 23: Názorná ukázka 3D geometrie a vytvořené triangulační sítě s jednotlivými meshi. [24]




Přidávání dveří

Když je vytvořena navigační mřížka, můžeme přidat nejdůležitější překážku všech modelů a tou jsou dveře ( *New door*). Dveřím pak jde nastavit nebo změnit tyto vlastnosti: průchodnou šířku, status zamčených nebo otevřených dveří, či v jakých intervalech se dveře budou otevírat, kterou stranou se dá dveřmi projít a také nastavit, které profily osob mohou dveře používat a které zase ne.



Obrázek 24: Půdorysný a 3D pohled na vytvořené místnosti s triangulační sítí. Na obrázku jsou dva typy dveří, bledě oranžové a zelené. Oranžovými dveřmi osoby v modelu přechází pouze z jedné místnosti do druhé ( *Door*). Zato zelené dveře však mají na model výrazně vyšší vliv. Tvoří se na hranici místnosti s modelovacím prostorem a jsou východem ( *Exit*), ale i možným zdrojem lidí ( *Occupant source*).

Vytváření osob

V zásadě jsou dva způsoby, jak tvořit osoby. První z možností je přidávat jedince pomocí panelu pod-nástrojů, který nám umožní přidávat jednu ( *Add an occupant*) nebo více osob najednou ( *Add occupant to a rectangle*). Takto vytvoření agenti se instantně objeví v našem modelu a jediný způsob, jak mohou model opustit je odejít zelenými dveřmi. Druhým postupem vytváříme jejich zdroj, tzn. dveře nebo místnost, ze kterých budou přicházet noví lidé ( *Occupant source*).

Těmto zdrojům pak lze nastavit rychlost vytváření agentů konstantní hodnotou ($os \cdot s^{-1}$) nebo hodnotami z tabulky. Dále pak je možnost vyžádat, aby zdroj přidával další a další jedince bez ohledu na přeplněnost nebo neprůchodnost prostoru.

Při tvorbě agentů se přiřazují profily a vzorce chování. Pokud se tak nestane na začátku, dá se jim tyto vlastnosti přiřadit později. Pathfinder také umožňuje při větším množství profilů a chování, přiřadit vlastnosti osob procentuálními hodnotami.

Charaktery osob – Profil

Jak je zmíněno v minulých kapitolách, každý jsme trochu jiní, a proto profilů agentů může být nespočet. Pro snadné pochopení jejich funkce následuje popis profilů z této BP.

Při modelování pohybu osob, BP rozlišuje tři druhy lidí = tři profily (muži, ženy a děti). Každá skupina je něčím specifická např. prostorovými nároky, rychlostí, reakční dobou, výběrem dlouhé cesty na místo čekání ve frontě atd. Do modelu tak vstupují jak data z metodik (rozměry, rychlosti...), tak i jistý psychologický podtext jedinců.

Chování a jeho zacyklení – 🚦 Behaviours

Hlavní motor celého nástroje Pathfinder je možnost tvorby chování. Spíš, než o chování se bavíme o příkazech s matematicky přesně stanovenými pravidly pro jejich splnění. Každý agent má své chování a taky se s ním musí sám vypořádat. Pokud se naši agenti chovají tak jak chceme, vytvořili jsme autonomní agenty a můžeme spouštět simulace.



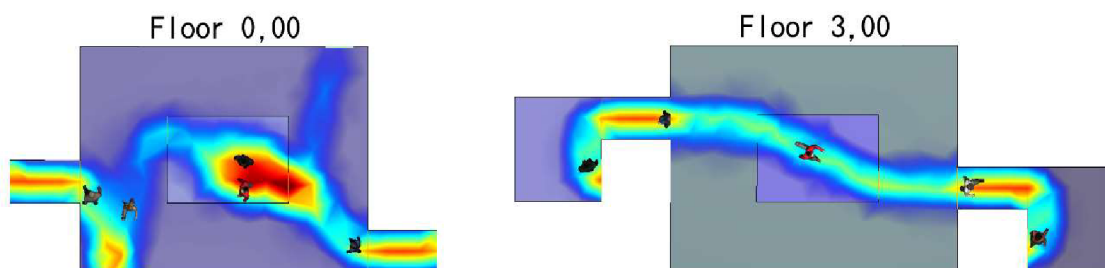
***Obrázek 25:** Perspektivní pohled na předchozí model, doplněný o dvě dvouramenná schodiště a druhé patro s místností.*

Popis vytváření chování proběhne na tomto ilustračním modelu. Jako první tvorba nového chování (pravým tlačítkem myši klikneme na 🚦 Behaviour). Po označení vytvořeného chování se v panelu vlastností zobrazí možnost tvorby příkazů. V ukázkovém příkladu se postupovalo následovně: „Jako první se vytvořil bod na trase, červený kruh v druhém patře, kterým agenti musí projít (➡ Goto Waypoint). Aby osoby v modelu místností v druhém patře jenom prošly, nastavila se dveřím průchodnost pouze na jednu stranu (+X). Dalším příkazem je požadavek, aby agenti šli do specifické místnosti (Goto Rooms). Následně bylo vytvořeno časové zdržení (⌚ Wait), které jsme nastavili na interval 4 s až 6 s. Což znamená, že se v místnosti jednotlivé osoby zdrží minimálně 4 s a maximálně 6 s. Celý vzorec chování byl ukončen požadavkem: odejdi jakýmkoliv východem (Goto any exit).“

Vývojáři do nejnovější verze Pathfinderu přidali možnost vytvořit změnu chování (🚦 Change behaviour), která procentuálně přerozdělí jednotlivé vzorce chování každému agentovi. Tímto způsobem lze zacyklit chování při jakéhokoliv provozu.

5.4 VÝSTUPY

Modelovací software po dokončení simulace nabízí hned několik výstupních dat v jeho pomocném nástroji Pathfinder Results. Základními výstupy simulace jsou: časové informace (s), hustoty ($\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$), rychlosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), kvalita pěší dopravy (A-F), využívání plochy – akumulované, viz následující obrázek.



Obrázek 26: Výstup ze simulace, která zobrazuje využívání plochy – akumulované, s výše popsaným vzorcem chování. Model má jeden zdroj agentů. Podle využitelnosti východů se dá přesně určit, který z nich to je (dveře v prvním patře dole vlevo).

Pro provedení statistiky výstupů, se musí simulace spustit minimálně desetkrát. Z těchto dat se následně vyhotoví grafy a tabulky. Výstupy slouží k plnému porozumění modelované situace. Díky grafickým výstupům nástroj lokalizuje kritické děje s rizikovou hustotou davu, dle kterých lze vytipovat přesná místa útoku na měkký cíl. Pathfinder je také využíván pro návrh evakuačních plánů a vypracování statistiky časů vyklizení. Je vhodný pro hodnocení kvality pěší dopravy na veřejných i soukromých prostranstvích. Dále může hodnotit kvalitu pěší dopravy v jakémkoliv provozu (festivally, obchodní centra...).

Pathfinder Results pro grafický výstup nabízí vytvoření videa nebo pořízení snímku obrazovky.

5.5 PŘEDNOSTI A DALŠÍ MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ

Pathfinder je mladý software a je v neustálém vývoji. Své nedostatky opravuje novějšími aktualizacemi, které opravují nefunkční nebo špatně fungující části a zároveň přidávají nové možnosti a vylepšení nástroje. Pokud se uživatel stane, že objeví chybu, může využít technické podpory softwaru a o chybě neprodleně informovat. Technický pracovník následně chybu zaeviduje a zahrne do plánu nové aktualizace.

PŘEDNOSTI

- Snadná práce se softwarem.
- Velké možnosti nastavení různých parametrů osob.
- Graficky přehledné prostředí.
- Možnost pracovat s modelem a sledovat výsledky simulace během výpočtu.
- Import extérní 2D a 3D geometrie.
- Široká škála vyhodnocených dat.

DALŠÍ MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ

- Jestli nedisponujeme 3D myší kamera v Pathfinder Results nám nepůjde efektivně ovládat.
- Pokud máme vytvořené Thin walls, a budeme se snažit některou již vytvořenou entitu editovat, zmizí nám okamžitě všechny Thin walls a musíme je vytvořit nanovo. Toto však je správná funkce tohoto podnástroje, avšak v praxi je spíše nežádoucí mizení vytvořených entit.
- Při velkém počtu lidí a chování v modelu se při práci v modelovacím prostředí vytváří velké odezvy programu a s nástrojem nelze efektivně pracovat.
- Nemožnost pohybovat s geometrickými entity během simulace (např. posunutí mobilních plotů pro korigování průchodnosti koridorů apod.).
- Chybí podpora českého jazyka.
- Při procentuální distribuci změny chování, program akceptuje všechny hodnoty za desetinnou čárkou, ale zobrazuje pouze desetinné hodnoty. Při malém počtu osob se pod desetinu procenta samozřejmě nedostaneme, ale pokud bychom chtěli modelovat provozy o velkých počtech osob i setiny procenta mohou být pro model klíčovými.
- Absence úhybných a jiných manévrů chodce. Nástroj počítá pouze se šířkou ramen, pomocí které vytvoří pevný kruhový profil osoby. Ten jde zmenšit změnou redukčního faktoru a tím docílit prolnutí osob (přimáčknutí na sebe), ale už nezohlední dynamiku manévru. Tento problém by řešilo spojení nástroje se softwaru v herního průmyslu, který obsahuje veškeré know-how modelování těchto pohybů.

6. MODELOVÁNÍ KULTURNÍ AKCE – VT

Na východ od města Zlín se nachází rodiště tohoto festivalu, městys Vizovice. Na úbočí Hostýnsko – vsetínských hornatin a Vizovické vrchoviny se již od 13. století datuje první zmínka o tomto městu. Festivalu poskytuje areál známá firma Jelínek a.s., jejíž působnost sahá až do 16. století. V dnešní době je trendem hudební festivaly pořádat v industriálním prostředí, což výrobní areál firmy Jelínek a.s. splňuje na výbornou. Přičtíme k tomuto kladu pravé moravské prostředí a dostáváme hudební festival VT.

6.1 VÝVOJ FESTIVALU

Když si obyvatelé města uvědomili, že nemá cenu vymýšlet nové typy podnikání, ale podpořit a zlepšit kvalitu těch stávajících, povedlo se zachránit ohrožené palírenské výroby Rudolfa Jelínka. Na zasedání vedoucích představitelů roku 1967 se město rozhodlo, že Vizovice budou rekreační oblastí Zlínského kraje. Také tehdy vzniklo nové slovo – trnkobraní. Tohoto roku též došlo ke spojení názvu festivalu s významným jménem vizovického výrobce slivovice, Rudolfa Jelínka. Od tohoto roku se městský festival Vizovické Trnkobraní koná každý rok a letos proběhne 52. ročník této akce. [25]

6.2 LOKACE AREÁLU

Na východu České republiky asi 20 kilometrů od slovenských hranic se v městě pod Vizovickou vrchovinou rozléhá výrobní areál Rudolfa Jelínka. Firma se nachází na konci železniční tratě vedoucí ze Zlína, kterou vystavěl známý podnikatel J. A. Baťa.

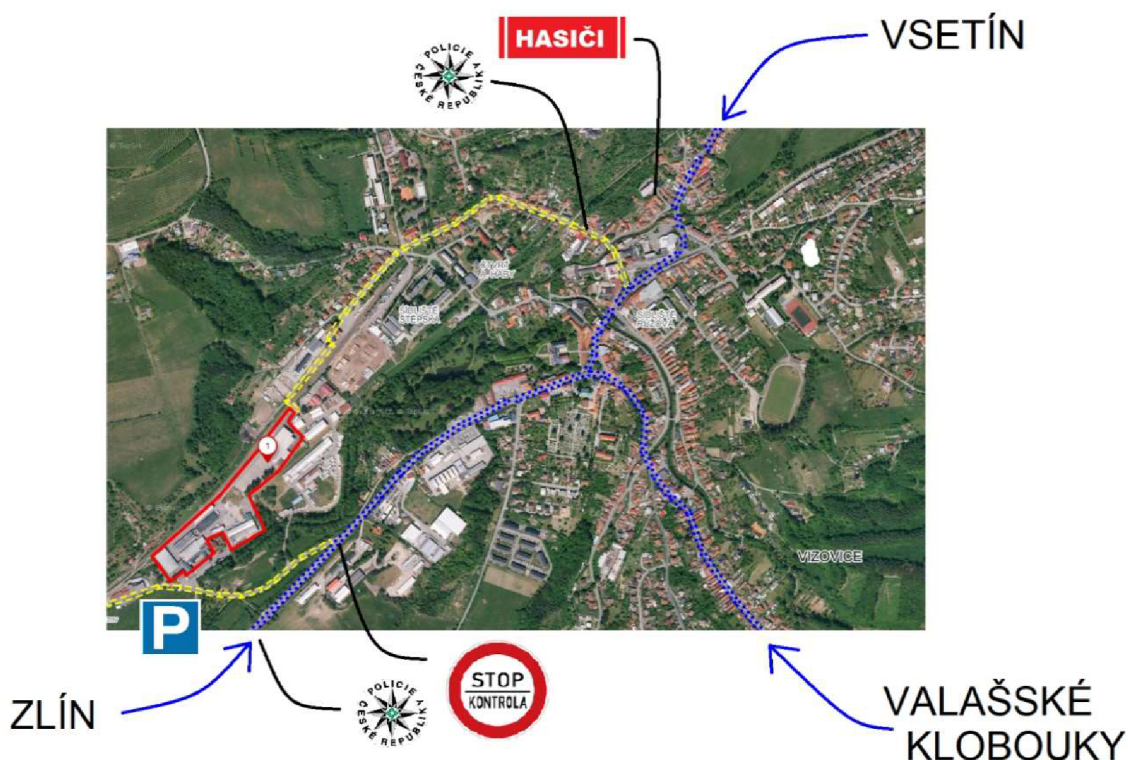


Obrázek 27: Přesná lokalizace areálu na ortofoto mapě ČR z webového portálu Mapy.cz. [26]

6.3 NÁVAZNOST NA DOPRAVU

Dopravní návaznost na areál má dva hlavní přístupové body. Na jednom z bodů směrem ze Zlína probíhá nepřetržitá kontrola silničních vozidel a silnice je zabezpečena posunutelnou barikádou. Fyzická bezpečnost tohoto vstupního bodu je, 250 m směrem na Zlín, doplněna o hlídky PČR. Druhá cesta, kterou se na VT můžeme dostat je více na severu, na straně blíže Vsetínu. Na této trase mají služebnu místní složky policejního sboru, které zajišťují bezpečnost této přístupové komunikace.

Pro příjezd IZS se vždy využívá přístupový bod na jihozápadu obce. Tato cesta je zvolena, nejen z důvodu nejbližšího přístupového bodu záchranné ambulance v krajském městě Zlín, ale také proto, že nabízí lepší přístupnost do celého areálu – hlavní bránu.



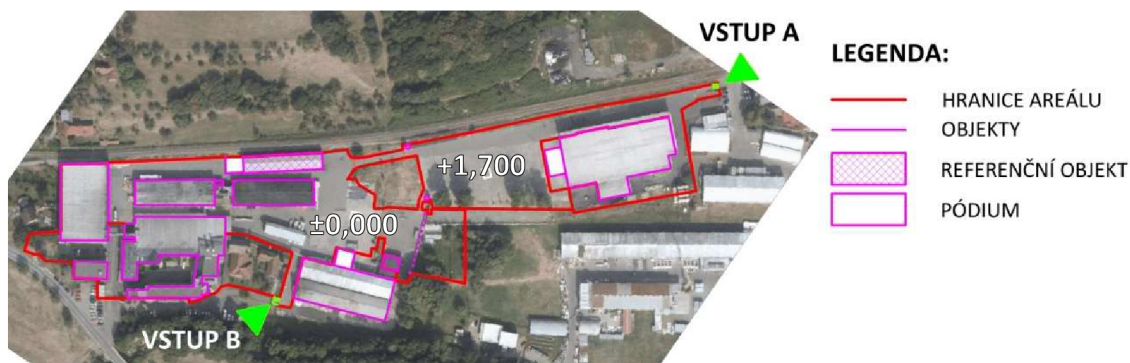
Obrázek 28: Bližší vztahy hranice areálu (červená), přístupových cest (žlutá), hlavních komunikací (modrá), státní správy a bezpečnostních pracovníků festivalu. Výkres je podložen leteckou mapou z internetového zdroje *Mapy.cz*. [26]

6.4 VSTUPNÍ DATA PRO MODEL

Pro model byly využity tři typy podkladů, skutečné zaměření areálu, schéma areálu s plánem provozu a vlastní zkušenosti.

6.4.1 ZAMĚŘENÍ AREÁLU

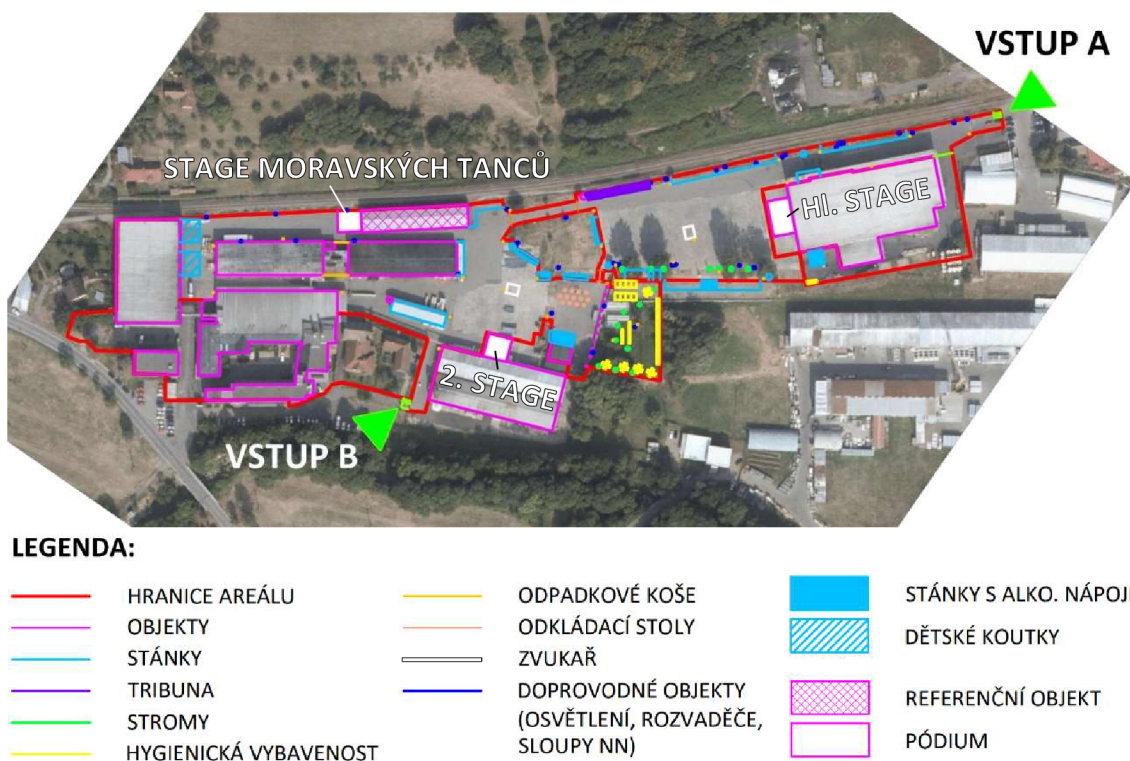
V pálenici jsme na nový rok 2019 zaměřili skutečné rozměry jednoho ze skladů areálu. Tento sklad jsme použili jako referenční objekt při tvorbě výkresu geometrie. Schéma, které jsme získali od pracovníka VT, jsme si podložili leteckými snímky poskytované Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním (= ČUZK) a podle skutečného stavu opravili zbylé nedostatky schématu. Zároveň proběhlo i výškové měření. Areál dělí na dvě výškové úrovně rampa a schodiště. Výškový rozdíl těchto ploch činí 1,7 m.



Obrázek 29: Osazení vypracovaného výkresu areálu na ortofotomapu poskytované ČUZK.

6.4.2 VYMEZENÍ PLOCH AREÁLU BĚHEM VT

Celková plocha, na které se mohou návštěvníci pohybovat má 11 050 m²



Obrázek 30: Výkres areálu doplněný o překážky pěší dopravy během konání festivalu.

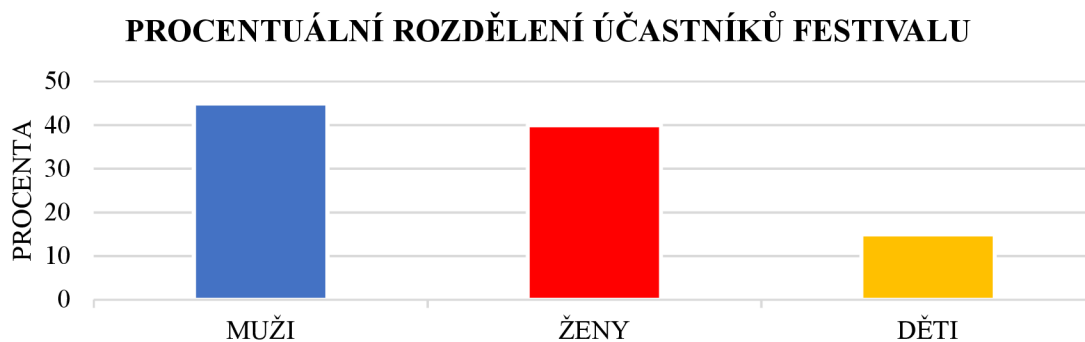
6.4.3 POČTY NÁVŠTĚVNÍKŮ A JEJICH VLASTNOSTI

Festival Trnkobraní, za posledních 6 let zdvojnásobil svoji kapacitu a za jeho dva dny konání ho navštíví cca 22 000 lidí. Hodnota byla poskytnuta jedním z hlavních organizátorů festivalu, M. Červenky. Zlínský deník u 48. ročníku Vizovického Trnkobraní počet 15 000 účastníků. Tyto dvě hodnoty jsou jediné, známé počty osob na Vizovickém Trnkobraní.

Tabulka 2: Hodnoty, které byly použity pro nastavení profilu osob. Rychlosti byly stanoveny za pomoci Weidmana, který zohledňuje rychlost chodce v závislosti na jeho věku. Maximální hodnota rychlosti byla stanovena procentuálním rozdělením účastníků dle věku a následným zprůměrováním hodnot. Šířku modelovaného agenta jsme nastavili dle Tabulky 1. Rychlosti pro děti byly stanoveny pomocí Ronchiho.

| ROZDĚLENÍ OSOB PODLE ROZMĚRŮ A RYCHLOSTÍ DLE TYPU POHYBU | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Profil | MUŽ | ŽENA | DÍTĚ |
| Šířka (průměrná hodnota) | 45,60 | 45,60 | 30,60 |
| Pohyb po rovině [cm] | 0,60 – 1,55 | 0,50 – 1,45 | 0,30 – 1,30 |
| Pohyb po schodech nahoru [$m \cdot s^{-1}$] | 0,65 | 0,60 | 0,50 |
| Pohyb po schodech dolů [$m \cdot s^{-1}$] | 0,85 | 0,70 | 0,60 |
| Pohyb po rampách nahoru [$m \cdot s^{-1}$] | 1,25 | 1,25 | 1,10 |
| Pohyb po rampách dolů [$m \cdot s^{-1}$] | 1,60 | 1,50 | 1,30 |

Při zohlednění třech různých profilů je potřebné stanovit i jejich procentuální rozdělení. Toto rozdělení čerpá z údajů Českého statistického úřadu a autorova předpokladu, že při hudebních akcích je většinou účast převážně mužského charakteru.



Graf 3: Rozdělení účastníků na VT, užitém při tvorbě modelů.

6.4.4 POPIS PROVOZU PŘI KONÁNÍ FESTIVALU

Samotné VT je organizované produkční společností NEDOMYSLENO s.r.o. Realizace dalšího ročníku, začíná hned den po skončení toho právě proběhlého. Na přípravě celého festivalu se během roku podílí něco kolem 4 pracovníků, kteří řeší podklady pro nadcházející rok. Příprava podkladů se sestává z 6 hlavních bodů:

- 1) Pozemkové náležitosti, tj. parkoviště hlavní a vedlejší, parkoviště pro personál, parkoviště pro firmu, která zajišťuje stavbu pódia, pozemek pro bezplatné stanování, pozemek pro VIP kemp a pozemek festivalu v dny konání akce.
- 2) Řešení bezpečnosti s dotčenými státními orgány (policie, hasiči, zdravotníci).
- 3) Bezpečnostní plán (rozmístění pracovníků a náplň jejich práce)
- 4) Zajištění prodeje a kontroly vstupenek (TicketStrem)
- 5) Sociální služby (dle kapacity festivalu se určí počet sociálních zařízení).
- 6) Zajištění soukromý pro každé pódium (buňky s hygienickým zázemím).

Stavba celého festivalu začíná podepsáním nájemních smluv s pověřenou osobou firmy Rudolfa Jelínka, která předá klíče pověřené osobě VT. Následně je provedena pochůzka po areálu a kontrola správnosti vypracovaných plánů. Následující den přijíždí 25–30 osob, které se podílí na stavbě Vizovického Trnkobraní. V den zahájení festivalu je uskutečněna poslední kontrola areálu, vzhledem k jeho připravenosti. A nakonec asi 15 minut před zahájením je celá festivalová aréna vyklizena a připravena pro konání akce.

Během konání akce se podařilo vyzorovat zásadní problémy a případná rizika, která vycházejí z geometrie areálu a velké koncentrace návštěvníků při konání hlavních koncertů. První krizová situace nastává ve chvíli, kdy skončí vystupující na hlavním pódium a osoby se snaží přes úzké koridory dostat na vedlejší stage, kde právě začíná další vystoupení. Druhá krizová situace nastává při konání koncertu hlavních hudebních protagonistů VT. Na tyto dvě krizové situace byla zaměřena pozornost BP.

7. MODELÝ

Modely byly tvořili pomocí software Pathfinder, který je popsáný v 5. kapitole. V této části došlo ke spojení načerpané teorie a všech získaných dat, které se následně zanesli do modelu (teorie pohybu osob a davu, geometrie areálu, informace o provozu akce a vlastní zkušenosti získané během sledování předešlých ročníků...).

7.1 ZÁKLADNÍ MODEL

Jako první byl vytvořen základní model celé akce, který následně bude sloužit jako šablona pro všechny ostatní modely. Při modelování primárního podkladu byly zjednodušeny následující entity. Geometrie arény byla zjednodušena tak, aby byl urychlen proces její tvorby. Toto způsobí, že model bude nepatrně zkreslený oproti realitě. Fatální dopad na celkový model ovšem mít nebude. Celkový provoz byl namodelován co nejvěrohodněji, což zahrnuje vytvoření přibližně 190 vzorců chování, které byly následně zacykleny, aby vytvořili iluzi skutečného provozu VT. Co se tedy chování osob týče, byl využit maximální potenciál modelovacího nástroje.



Obrázek 31: Pprintscreen základního modelu Vizovického Trnkobraní.

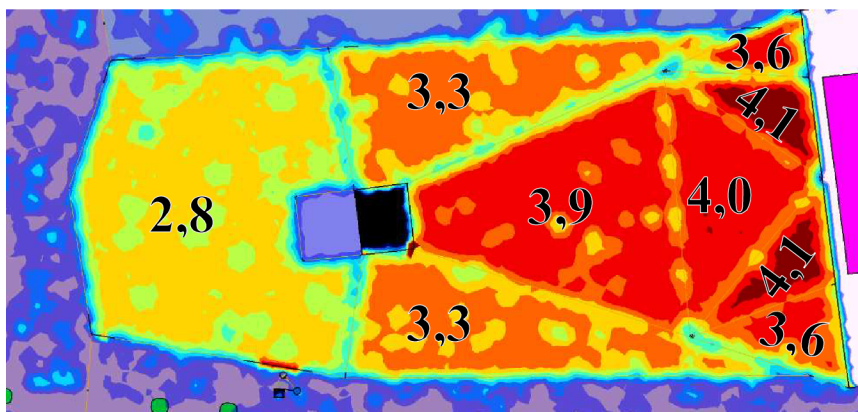
Nastavení profilů

Pro všechny modely byli vytvořeny tři profily agentů, které byly zmíněny v předchozích kapitolách. Těmto profilům byly nastaveny zmíněné rozměry a rychlosti dle příslušných typů pohybu. V rozšířeném nastavení byla změněna preference dveří, které si osoba vybere pro přemístění z 35 % na hodnotu 40 %, což znamená, že osoby budou o pět procent méně měnit své rozhodnutí při již zvolených dveřích. Zbylé parametry byly ponechány na výchozím nastavení programu.

7.2 MODEL 1

Model 1 se zabývá situací během provozu, která nastává při přesunu davu po skončení koncertu na hlavní stage. V modelu se nachází 7 500 osob a jejich rozmístění bylo náhodně generováno (kromě prostorů před stage).

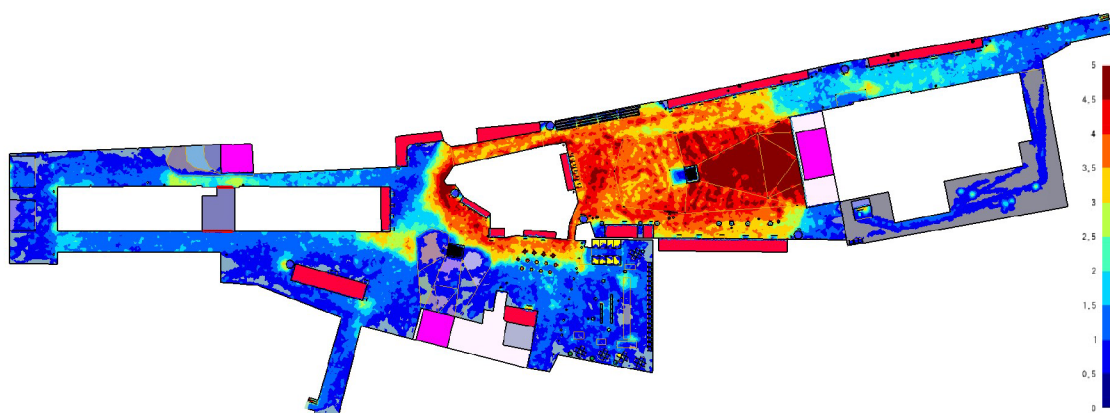
Dav před pódiem byl modelován dle zkušeností získaných při pozorování davu během koncertu – se vzdáleností od pódia, klesá hustota davu.



Obrázek 32: Rozdělení hustot davu [$os \cdot m^{-2}$] pod hlavní stage. Obdobně jsou řešeny i ostatní stage.

7.2.1 SCÉNÁŘ

Pro tento model bylo využito všech vytvořených chování (tj. jít na toalety a následně si umýt ruce, nakupování jídla a nápojů, sezení na tribuně, průzkum areálu, návštěva dětského koutku, VIP sektor, odchod a příchod nových osob). Scénář modelu se zabývá přirozeným provozem při konání koncertu na hlavní stage a následného přesunu davu na vedlejší stage do spodní části areálu. Pro účely zkoumání bezpečného provozu byl model nastaven tak, aby ztvárnil situaci při přesunu davu, kde dochází ke kolizím jednotlivců a protisměrných proudů, a to zejména v úzkých koridorech areálu.



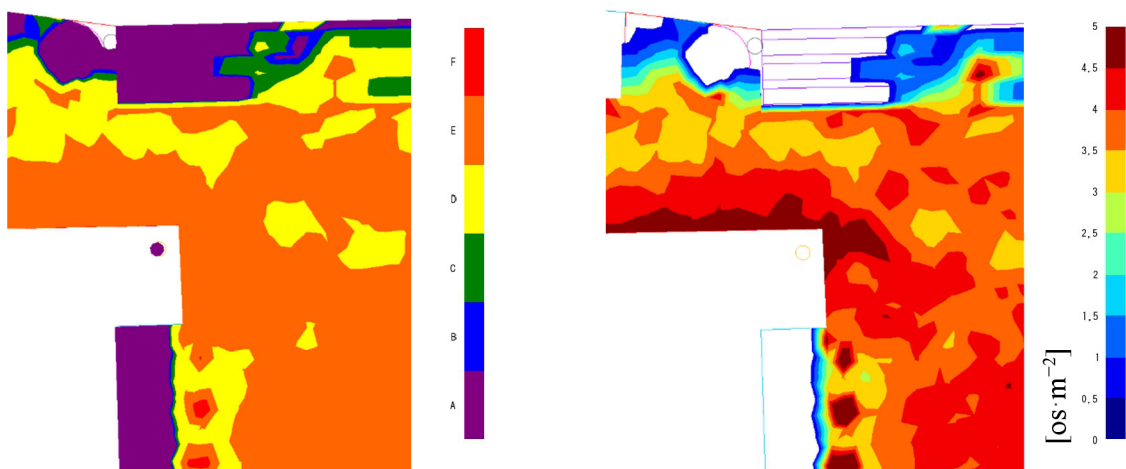
Obrázek 33: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu dle skutečného provozu. [$os \cdot m^{-2}$]

7.2.2 PROBLÉMOVÁ MÍSTA A JEJICH OPTIMALIZACE

Cílem této podkapitoly je rozklíčování kritických míst areálu během běžného provozu a následného návržení řešení pro jejich optimalizaci.

Kritické místo 1

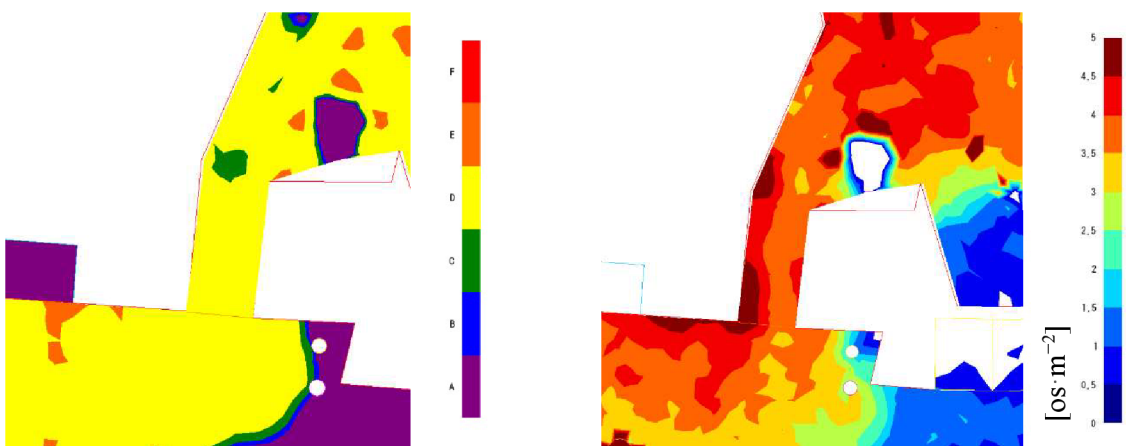
Toto místo se nachází v místě spojení rampy s vrchní částí areálu. Pod tímto kritickým místem se nachází stan s pivním výčepem, u kterého se tvoří dlouhé fronty. Ty mají svůj podíl na zhoršení kvality pěší dopravy z důvodu zmenšení rozptylové plochy za kritickým místem. Nejužší místo koridoru měří 4 metry.



Obrázek 34: Screenshot prvního kritického místa během provozu VT se zobrazením LoS (v levo) a maximálních hustot davu (v pravo).

Kritické místo 2

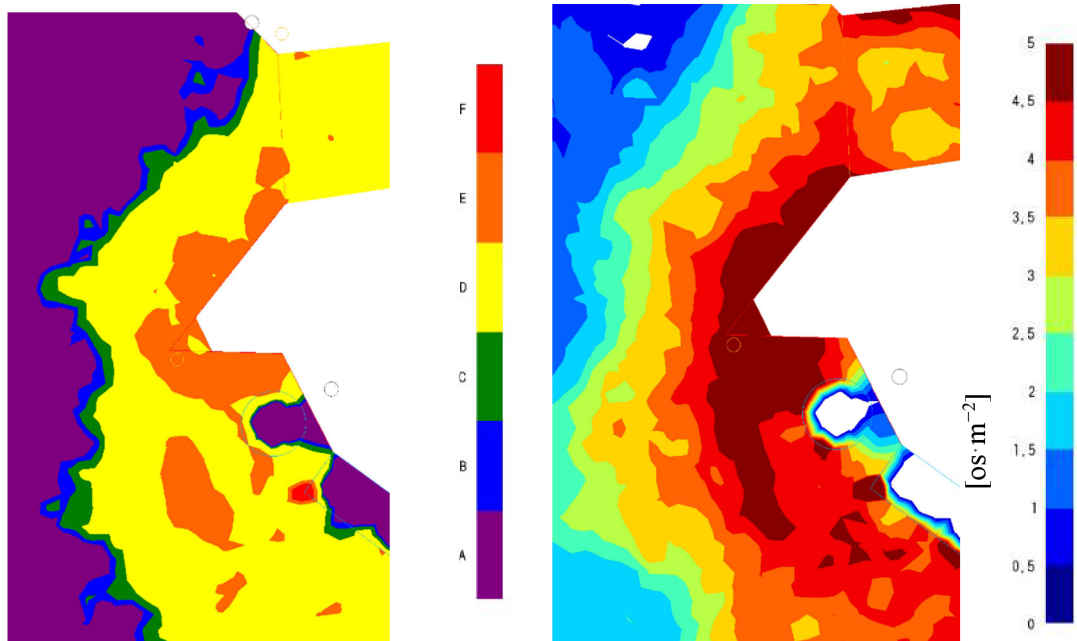
Lokalizace tohoto místa je v nejužším koridoru celého areálu. Schody o šířce 2,25 metrů jsou nejužším bodem tohoto kritického místa. Dalším z důvodů tvorby kongesce při pěší dopravě je sud (bar), umístěný v blízkosti výstupního ramena schodiště.



Obrázek 35: Snímek druhého kritického místa během provozu VT se zobrazením LoS (v levo) a maximální dosažené hustoty davu (v pravo).

Kritické místo 3

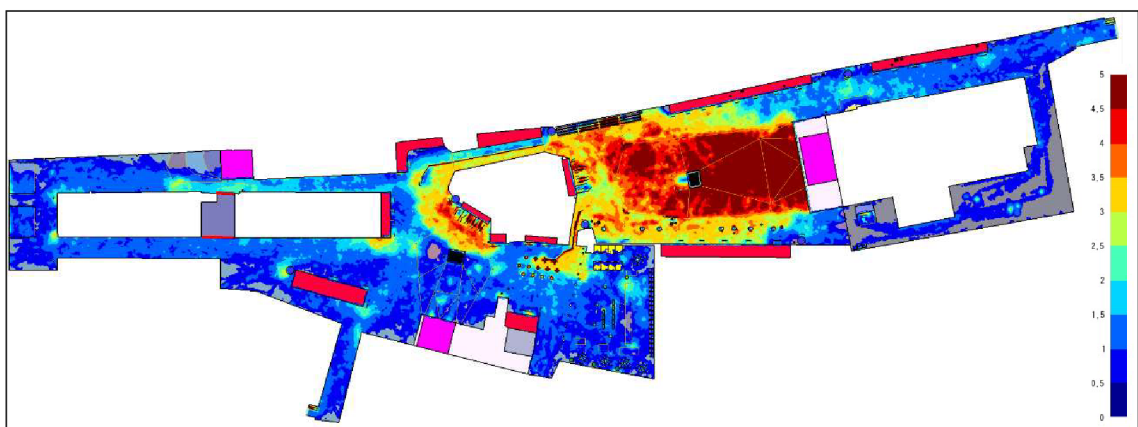
Poslední a nejméně kritické místo se nachází ve spodní části areálu s blízkou návazností na rampu vedoucí k hlavní stage. Tento kritický jev je způsoben tupým rohem geometrie areálu, u kterého se tvoří shluky osob. Ty si sobě navzájem snižují rychlost pohybu a tím pádem podporují i kontinuální tvorbu kongesce v tomto kritickém místě.



Obrázek 36: Obrázek zachycující LoS (v levo) a maximální hustoty osob v třetím kritickém místě během provozu VT.

Optimalizace neinvazivním způsobem

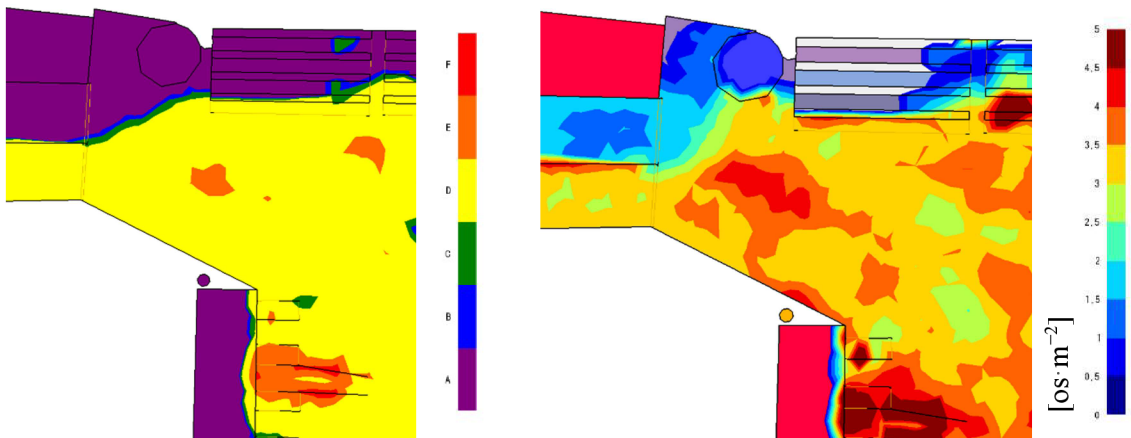
Tato optimalizace je řešením, které by nestálo skoro žádné peníze a nezasáhne do celkové geometrie areálu. Dělí úzké koridory kritických míst na dva dopravní proudy. Díky tomu se vyhneme střetům protichůdných proudů.



Obrázek 37: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu při neinvazivní optimalizaci. [$os \cdot m^{-2}$]

Optimalizace kritického místa 1 – Neinvazivním způsobem

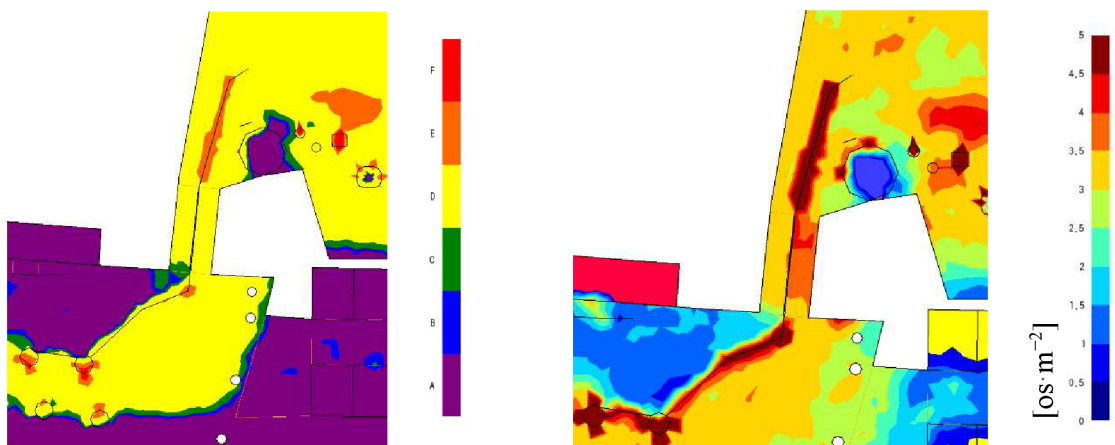
Pro omezení srážek protisměrných proudů byla rampa rozdělena na dvě poloviny (dva dopravní pruhy). Tyto pruhy by mohly být odděleny pohyblivými zátarasy, které by se hýbali na základě využití plochy jednotlivých proudů na rampě. Pro rozšíření rozptylové plochy při výstupu z rampy byla, upravena geometrie modelu. Nová plocha zabírá kus zatravněné plochy areálu. Nejužší šířka koridoru byla zvětšena o 0,65 m.



Obrázek 38: Snímek kritického místa 1 po jeho optimalizaci neinvazivním způsobem. (LoS, max. hustota)

Optimalizace kritického místa 2 – Neinvazivním způsobem

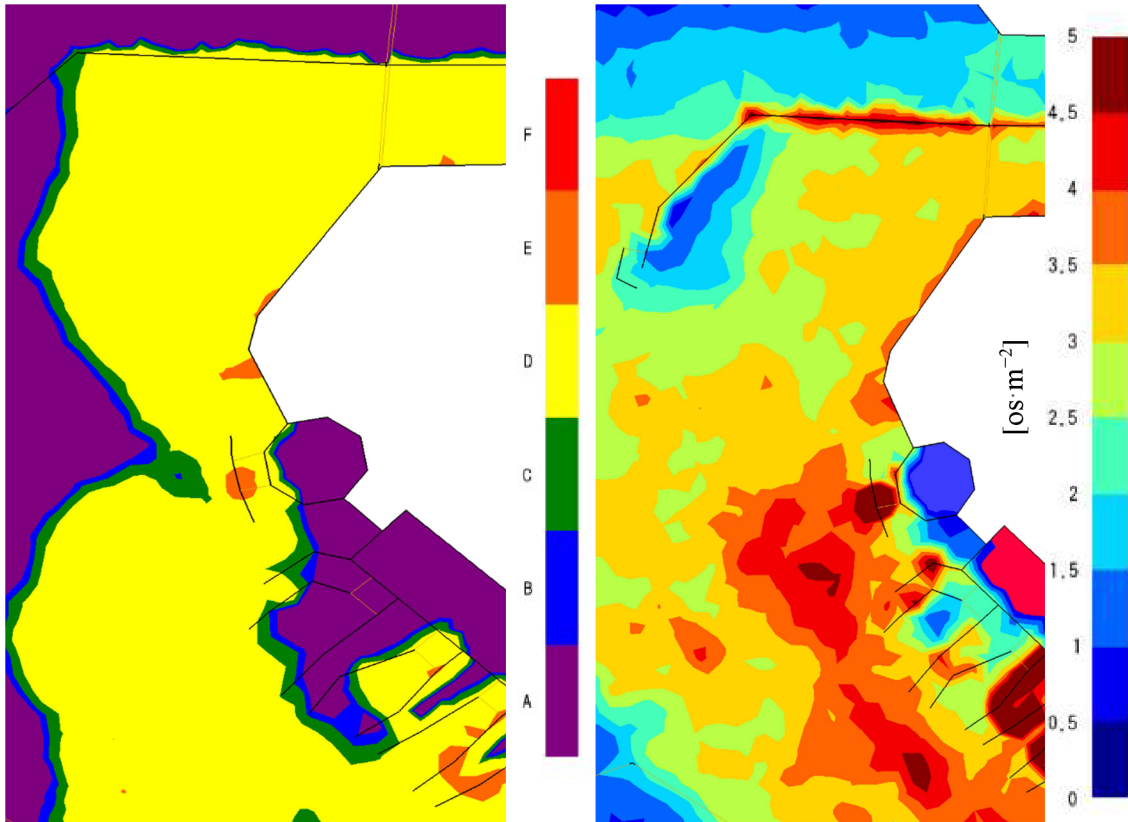
Optimalizace tohoto místa bylo dosaženo obdobným řešením jako v prvním optimalizaci. Schodiště jsme rozdělili na dvě poloviny a dělení na dopravní pruhy protáhli kousek za schod za výstupní i nástupní směry, abychom vytvořili dostatečně velké rozptylové plochy. Pro rozšíření plochy při výstupu ze schodiště, byla upravena geometrie modelu. Nová plocha zabírá kus nevyužívané zatravněné plochy areálu. Nejužší šířka koridoru (schodiště), zůstala nezměněná.



Obrázek 39: Rozdělení schodiště a přilehlých ploch po optimalizaci modelu. (LoS, max. hustota)

Optimalizace kritického místa 3 – Neinvazivním způsobem

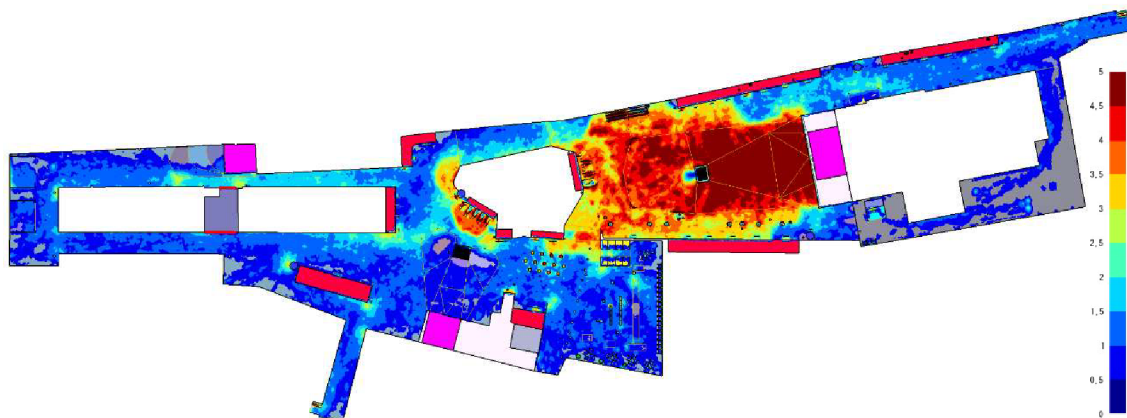
Při této optimalizaci proběhlo především k úpravě geometrie areálu. Rozšířením plochy pro pohyb před úzkým koridorem. Tato změna snížila maximální hustotu skoro o 2 $\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$. Touto optimalizací bychom vyřešili tvorbu kongescí v tomto místě.



Obrázek 40: Úprava geometrie třetího kritického místa provozu. (LoS, max. hustota)

OPTIMALIZACE INVAZIVNÍM ZPŮSOBEM

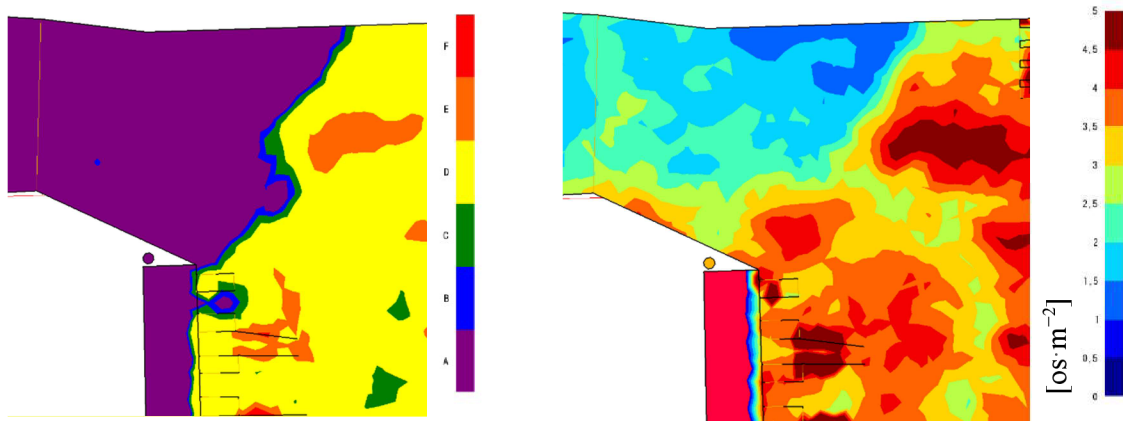
Tato optimalizace je řešením, které by stálo více peněz, ale zato by bylo účinným způsobem pro odstranění veškerých problémů spojených s kvalitou pěší dopravy.



Obrázek 41: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu při invazivní optimalizaci. [$\text{os} \cdot \text{m}^{-2}$]

Optimalizace kritického místa 1 – Invazivním způsobem

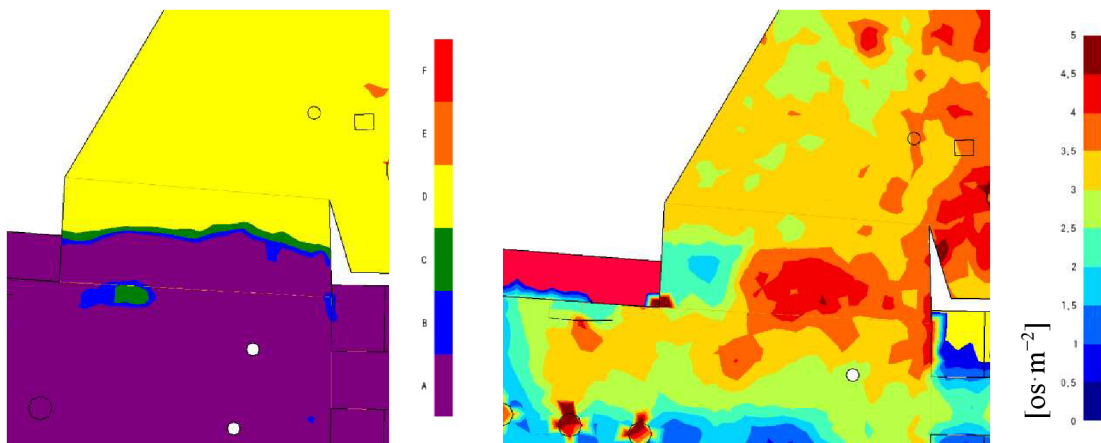
Pro ještě kvalitnější omezení srážek protisměrných proudů byla rampa rozšířena, sud vedle tribun strhnut, stánek ve svahu odstraněn a dvě části tribuny demontovány. Tímto jsme koridor rozšířili na celkovou šířku 7,6 m.



Obrázek 42: Screenshot prvního kritického místa s navrženou invazivní úpravou. (LoS, max. hustota)

Optimalizace kritického místa 2 – Invazivním způsobem

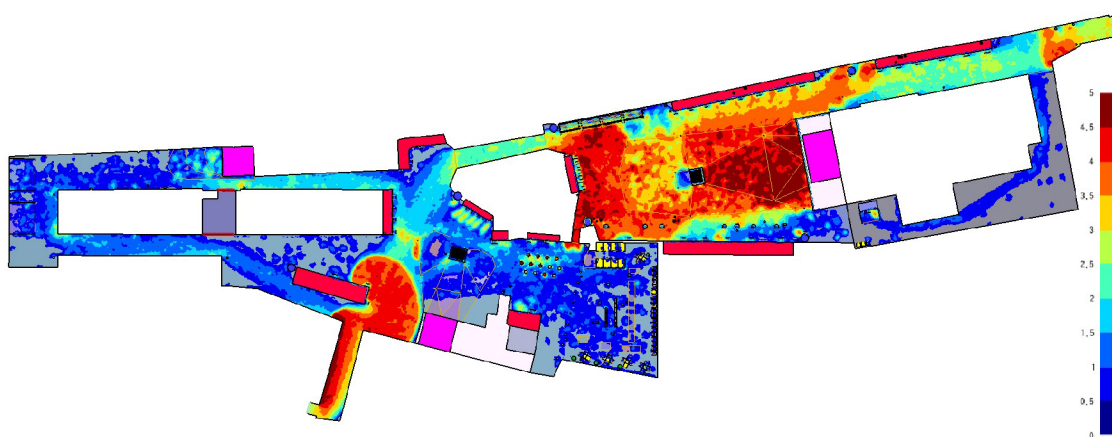
Optimalizace invazivním způsobem tohoto místa proběhla odstraněním sudu (bar) ve vrchní části areálu a následné rozšíření koridoru na 11,5 m. Nově navržené plochy zabírají kus nevyužívané zatravněné plochy areálu, která sloužila primárně pro skladování věcí stánků. Schodiště by mohlo být spojeno se zemí pevnými základy nebo pouze ve variantě mobilní, které by se po dvou dnech demontovalo.



Obrázek 43: Vyhodnocení kvality pěší dopravy a maximální hustoty při invazivní úpravě areálu. (LoS, max. hustota)

7.3 MODEL 2

Model 2 průběhem událostí navazuje na svého předchůdce. V modelu se nachází 7 500 osob a jejich rozmístění bylo vytvořeno lidskou rukou. Poznatků ze simulací Modelu 1 bylo využito při umístování agentů po areálu. Jelikož se jedná o model znázorňující vylidnění, brány používané pro východ byly zvětšeny o šířku vstupů díky mobilním plotům, ze kterých jsou vytvořeny (Exit A = 6,4 m, Exit B = 3,5 m). Tyto východy při reálném provozu areálu slouží i jako evakuační, proto je velmi důležité zajistit dostatečnou bezpečnost přístupových komunikací areálu a účinně tak chránit měkký cíl i zvenčí.



Obrázek 44: Maximální hustota v Modelu 2, znázorňující vyklizení při návštěvnosti 7 500 osob. [$\text{os}\cdot\text{m}^{-2}$]

7.3.1 SCÉNÁŘ

Model znázorňuje vylidnění areálu. Informace o probíhající vyklizení je návštěvníkům předána prostřednictvím reproduktorů na hlavním pódiu v době konání koncertu. Osoby stojící pod pódiem mají reakční dobu v uzavřeném intervalu 0 až 30 sekund, jelikož jejich pozornost je upoutána na hlavní stage. Pro účastníky rozprostřené po areálu je tento interval nastaven na 0 až 120 sekund z důvodu opožděné reakce.

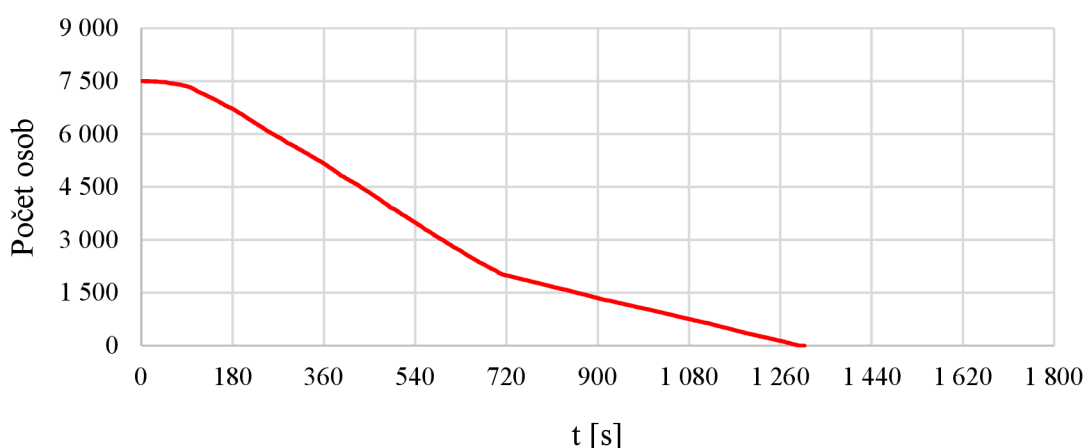
7.3.2 VÝSTUPY

Za účelem kvalitní statistiky bylo spuštěno 10 simulací. Výsledky byly přehledně seřazeny do tabulek a pro lepší vizuální představu o nacházejících se osobách v areálu byl vytvořen graf.

Tabulka 3: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 2.

| SIMULACE | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|---------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
| SPUŠTĚNÍ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ČAS [s] | 1318 | 1307 | 1242 | 1332 | 1321 | 1309 | 1277 | 1309 | 1304 | 1297 |
| STATISTIKA | | | | | | | | | | |
| STŘEDNÍ HODNOTA | | SMĚRODATNÁ ODCHYLKA | | | | | Q _{95/100} | | | |
| 1302 | | 25 | | | | | 1327 | | | |

MODEL 2 - ČAS VYKLIZENÍ



Graf 4: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhajícím vyklizení v závislosti na čase (Model 2).

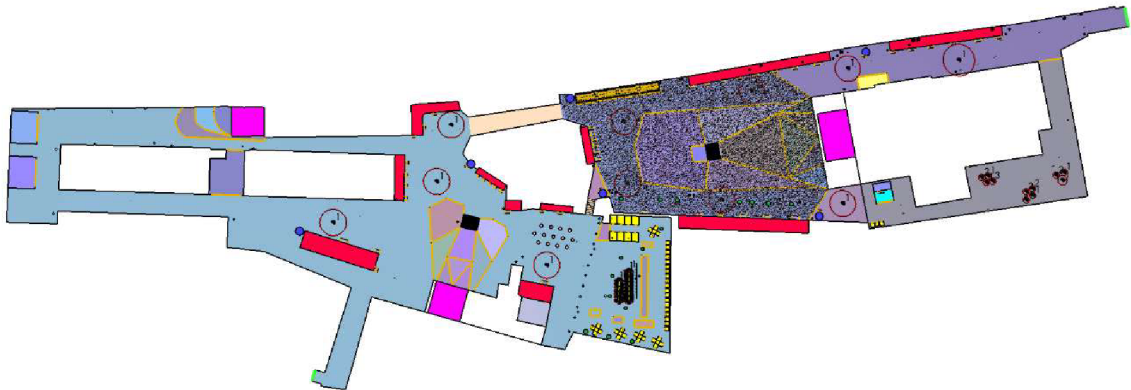
7.3.3 SHRNU TÍ MODELU 2

Předpokládaný čas vyklizení, při tomto scénáři, byl statisticky stanoven na 22 minut ($\pm 25-50$ s). V koridorech vedoucích k východům, vznikají kolem 2 minuty patrné kongesce a v dynamickém davu dochází k snížení LoS a tím pádem i k zvyšování potřebného času pro vyklizení areálu. Z grafu je dále patrné, že kolem 12 minuty, klesá rychlost vyklizení. Toto je způsobené preferováním jednoho východu větším počtem návštěvníků.

7.4 MODEL 3

V Modelu 3 se nachází 10 500 osob. Model simuluje „peak-time“ VT (největší koncentrace lidí pod hlavním pódiem, během vystoupení neočekávanější kapely). Jelikož se také jedná o model znázorňující vylidnění, brány používané pro východ byly zvětšeny o šířku vstupů díky mobilním plotům, ze kterých jsou vytvořeny (Exit A = 6,4 m,

Exit B = 3,5 m). Různě po areálu je rozmístěno pár desítek návštěvníků, kteří si jdou na toaletu, si kupují občerstvení, jsou ve VIP zóně nebo se jen procházejí.



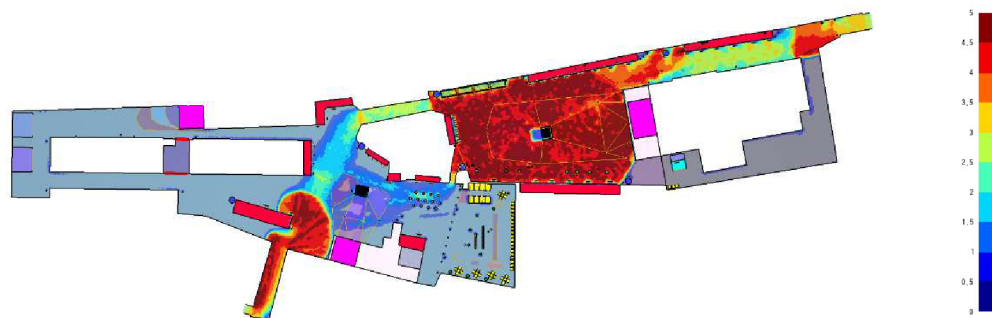
Obrázek 45: Rozmístění agentů v Modelu 3, znázorňující „peak-time“ při návštěvnosti 10 500 osob.

7.4.1 SCÉNÁŘ

Tato varianta modeluje část festivalu, kdy na hlavním pódiu právě pobíhá neočekávanější koncert VT. Při této události bývá celá vrchní plocha areálu zaplněna na maximum a hustota davu se před pódiem blíží kritickým hodnotám. Model znázorňuje vylidnění areálu při maximální účasti na hlavním koncertě, dle počtu prodaných lístků. Informace o probíhající vyklizení je návštěvníkům předána prostřednictvím reproduktorů na hlavním pódiu v době konání koncertu. Osoby stojící pod pódiem mají reakční dobu v uzavřeném intervalu 0 až 30 sekund, jelikož jejich pozornost je upoutána na hlavní stage. Pro účastníky rozprostřené po areálu je tento interval nastaven na 0 až 120 sekund z důvodu opožděné reakce.

7.4.2 VÝSTUPY

Za účelem kvalitní statistiky bylo spuštěno 10 simulací. Výsledky byly přehledně seřazeny do tabulek a pro lepší vizuální představu o nacházejících se osobách v areálu byl vytvořen graf.

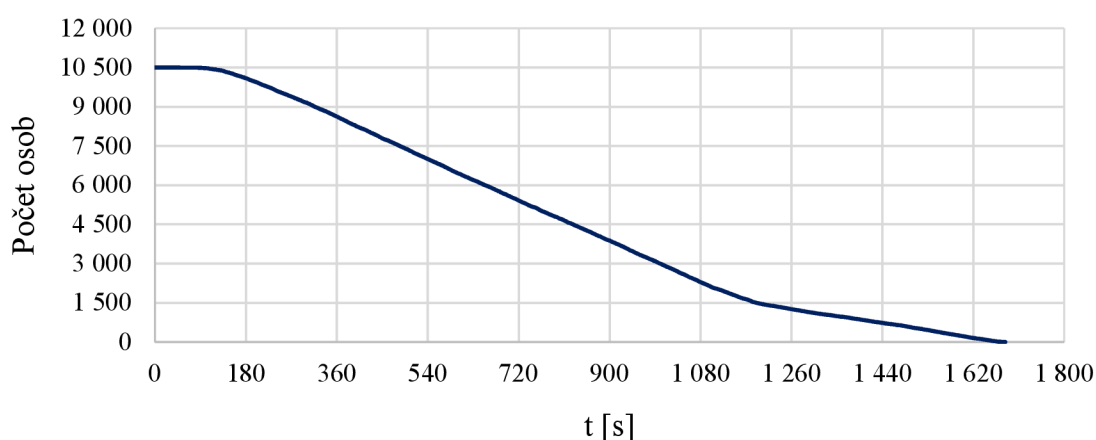


Obrázek 46: Maximální hustota v Modelu 3, znázorňující vyklizení při návštěvnosti 10 500 osob. [$os \cdot m^{-2}$]

Tabulka 4: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 3.

| SIMULACE | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|---------------------|------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
| SPUŠTĚNÍ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ČAS (s) | 1694 | 1674 | 1694 | 1666 | 1667 | 1675 | 1657 | 1683 | 1672 | 1667 |
| STATISTIKA | | | | | | | | | | |
| STŘEDNÍ HODNOTA | | SMĚRODATNÁ ODCHYLKA | | | | | Q _{95/100} | | | |
| 1675 | | 12 | | | | | 1694 | | | |

MODEL 3 - ČAS VYKLIZENÍ



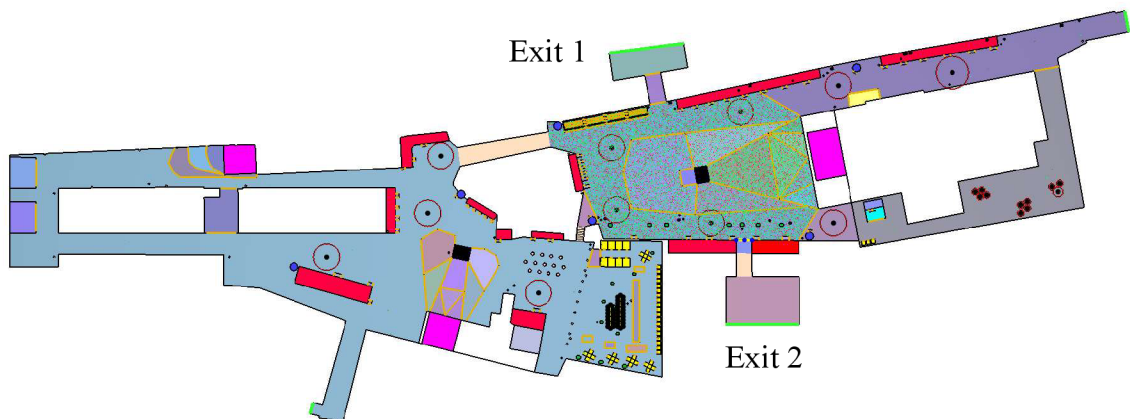
Graf 5: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhající vyklizení v závislosti na čase (Model 3).

7.4.3 SHRNU TÍ MODELU 3

Předpokládaný čas vyklizení při tomto scénáři je statisticky stanoven na 28 minut \pm 12 sekund. V koridorech vedoucích k východům, vznikají kolem 3 minuty patrné kongesce a v dynamickém davu dochází k snížení LoS a tím pádem i k zvyšování potřebného času pro vyklizení areálu. Z grafu je patrné, že kolem 19 minuty, klesá rychlost vyklizení prostoru festivalu. Toto je způsobené preferováním jednoho východu větším počtem návštěvníků.

7.5 MODEL 4

Model 4 doplňuje třetí model o dva nouzové východy (Exit 1 = 5 m, Exit 2 = 5 m). Exit 1 vede přes koleje na volné prostranství, které je v podílovém vlastnictví. Exit 2 vede přes 5 metrů široký koridor, rampu o stejné šířce na soukromý pozemek (rozptylovou plochu).



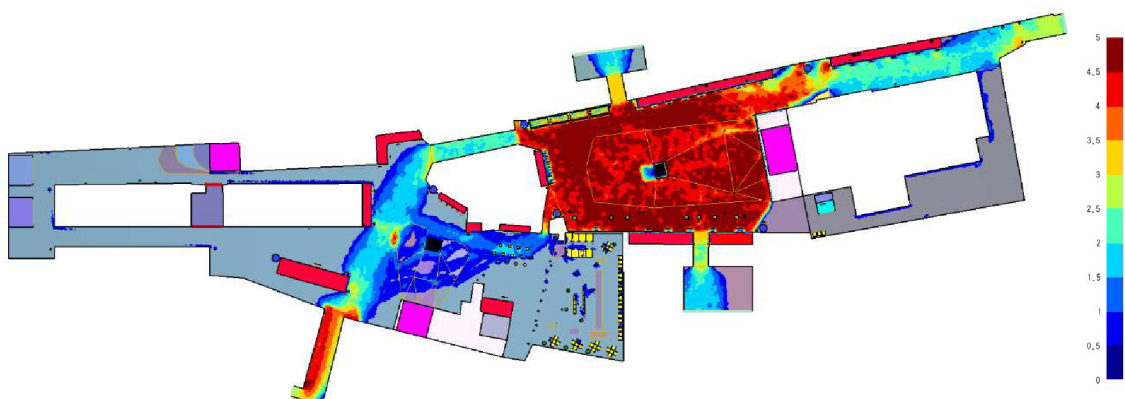
Obrázek 47: Situování přidanych nouzových východů (Model 4).

7.5.1 SCÉNÁŘ

Tato varianta dějovou linkou a reakční dobou osob zakládá na předchozím modelu. Jedinou změnou je možnost v krizové situaci opustit areál dalšími východy.

7.5.2 VÝSTUPY

Za účelem kvalitní statistiky bylo spuštěno 10 simulací. Výsledky byly přehledně seřazeny do tabulek a pro lepší vizuální představu o nacházejících se osobách v areálu byl vytvořen graf.

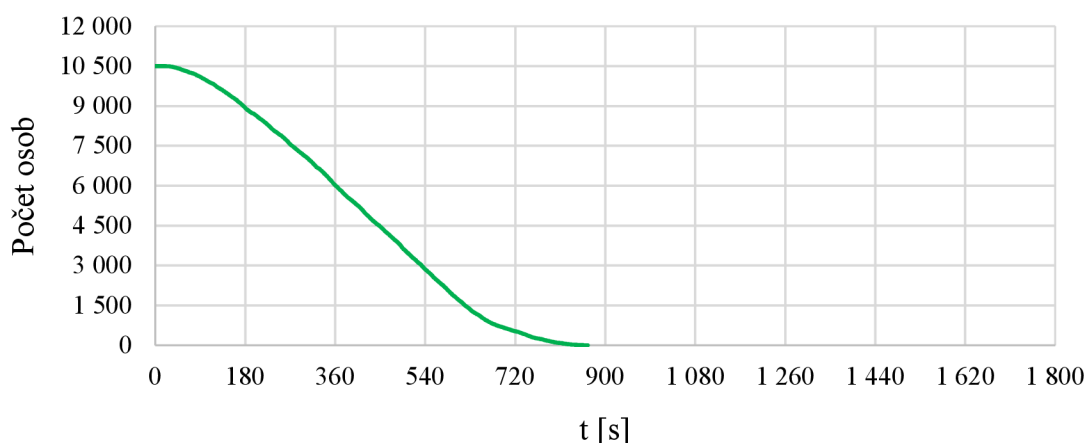


Obrázek 48: Maximální hustota při vyklizení areálu pomocí přidanych dvou evakuačních východů při počtu 10 500 osob. [$os \cdot m^{-2}$]

Tabulka 5: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 4.

| SIMULACE | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|
| SPUŠTĚNÍ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ČAS (s) | 843 | 865 | 863 | 823 | 832 | 852 | 878 | 832 | 842 | 844 |
| STATISTIKA | | | | | | | | | | |
| STŘEDNÍ HODNOTA | | SMĚRODATNÁ ODCHYLKA | | | | | Q _{95/100} | | | |
| 847 | | 17 | | | | | 872 | | | |

MODEL 4 - ČAS VYKLIZENÍ



Graf 6: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhajícím vyklizení v závislosti na čase (Model 4).

7.5.3 SHRNU TÍ MODELU 4

Předpokládaný čas vyklizení při tomto scénáři je statisticky stanoven na 14,5 minut (± 17 -34 s) (polovina času jakou potřebuje k vyklizení Model 3). Můžeme si všimnout hladkého průběhu dvou exponenciálních křivek bez viditelných zlomů. První křivka je způsobena přidáním nouzových východů, které zajišťují zvýšení kvality LoS a počáteční rychlost vylidňování při nouzové situaci. Druhá z křivek má přesně opačný význam pro LoS a rychlost vyklizení. Z důvodů úzkých koridorů a rozdílným preferováním jednotlivých východů.

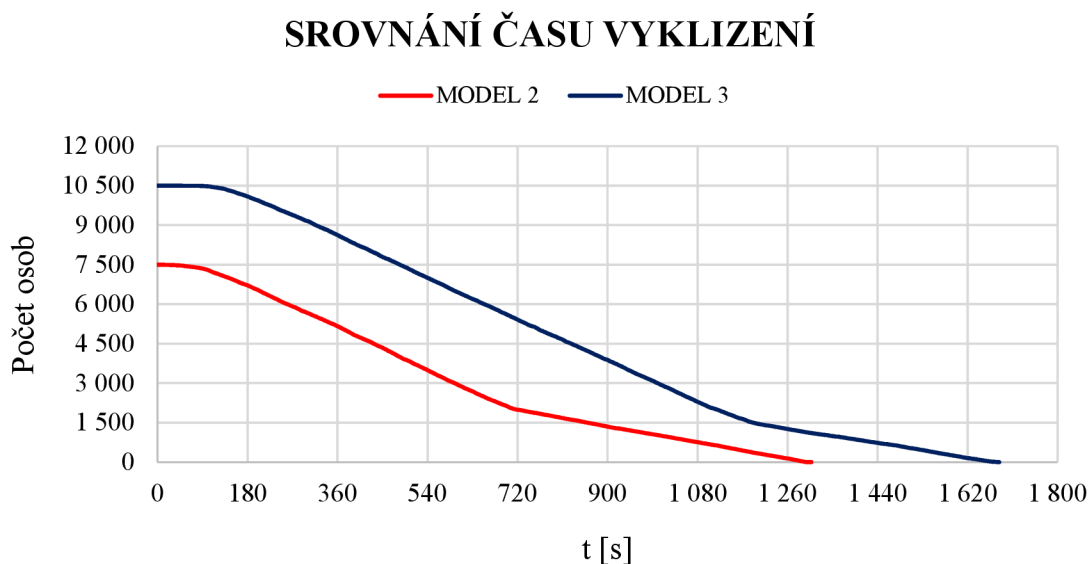
Tento model byl vytvořen za účelem snížení času vylidnění na minimum.

8. SROVNÁNÍ VARIANT

V rámci vyhodnocení jednotlivých modelů, máme možnost porovnat výsledky variant vůči sobě.

8.1 MODEL 2 × MODEL 3

Toto srovnání porovnává dva modely se stejnou geometrií a různým počtem osob a rozprostřením po areálu. Hlavním poznatkem při této komparaci modelů je fakt, že rozprostření osob po areálu má velký vliv na celkový čas vyklizení, hlavně v konečné fázi (červená křivka, 12 minuta). Účastníci festivalu, kteří nejsou zrovna v blízkosti pódia nebo východů, mají mnohem větší reakční dobu, a proto se k východům agenti v Modelu 2 dostávají s větší časovou prodlevou. Efektivním nástrojem pro snížení reakční doby účastníků, může být například instalace informačního rozhlasu po celém areálu.



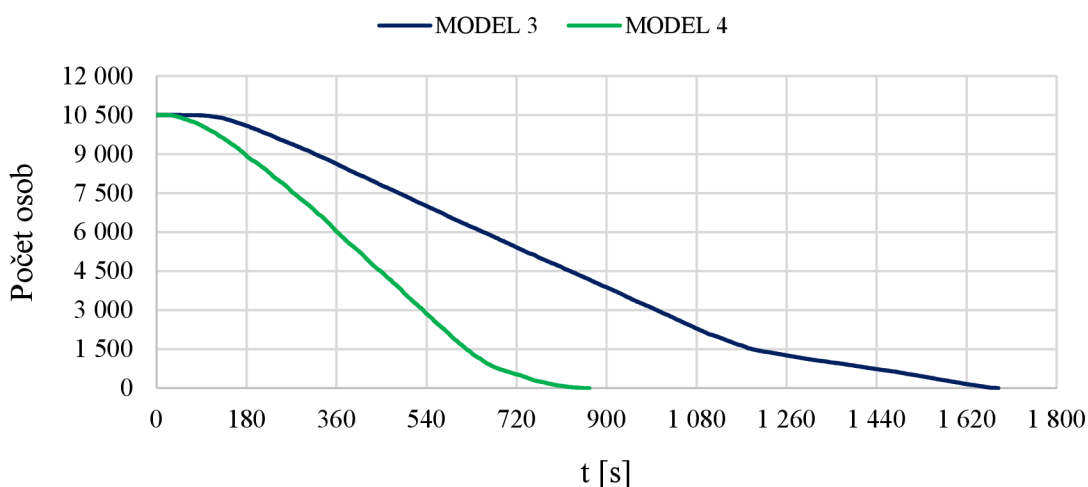
Graf 7: Srovná času vyklizení rozprostřených 7 500 osob po areálu s koncentrovanými 10 500 osobami pod hlavním pódiem.

Další srovnání by mohlo být založeno na tomto poznatku a blíže tak stanovit vliv rozprostření účastníku po areálu na celkový čas vyklizení.

8.2 MODEL 3 × MODEL 4

V této kapitole byl porovnán Model 3 s Modelem 4, který má přidané dva nouzové východy. V Modelu 4 byla navržena optimalizace evakuačních východů s cílem zefektivnění vyklizení „vrchní“ plochy areálu (plocha pod hl stage), kde dochází k největší kumulaci lidí. Při prvním pohledu na toto srovnání se potvrzuje tvrzení, že v počáteční fázi mají dva nouzové východy na celkový výsledek vyklizení markantní vliv. Přidáním dvou východů jsme čas vyklizení snížili na celou polovinu!

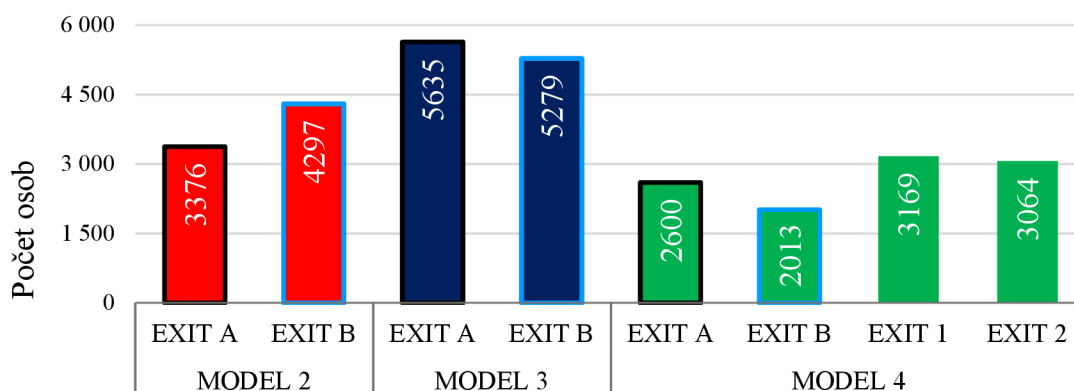
SROVNÁNÍ ČASU VYKLIZENÍ



Obrázek 49: Srovnání času vyklizení scénáře bez přidaných nouzových východů a s přidanými východy.

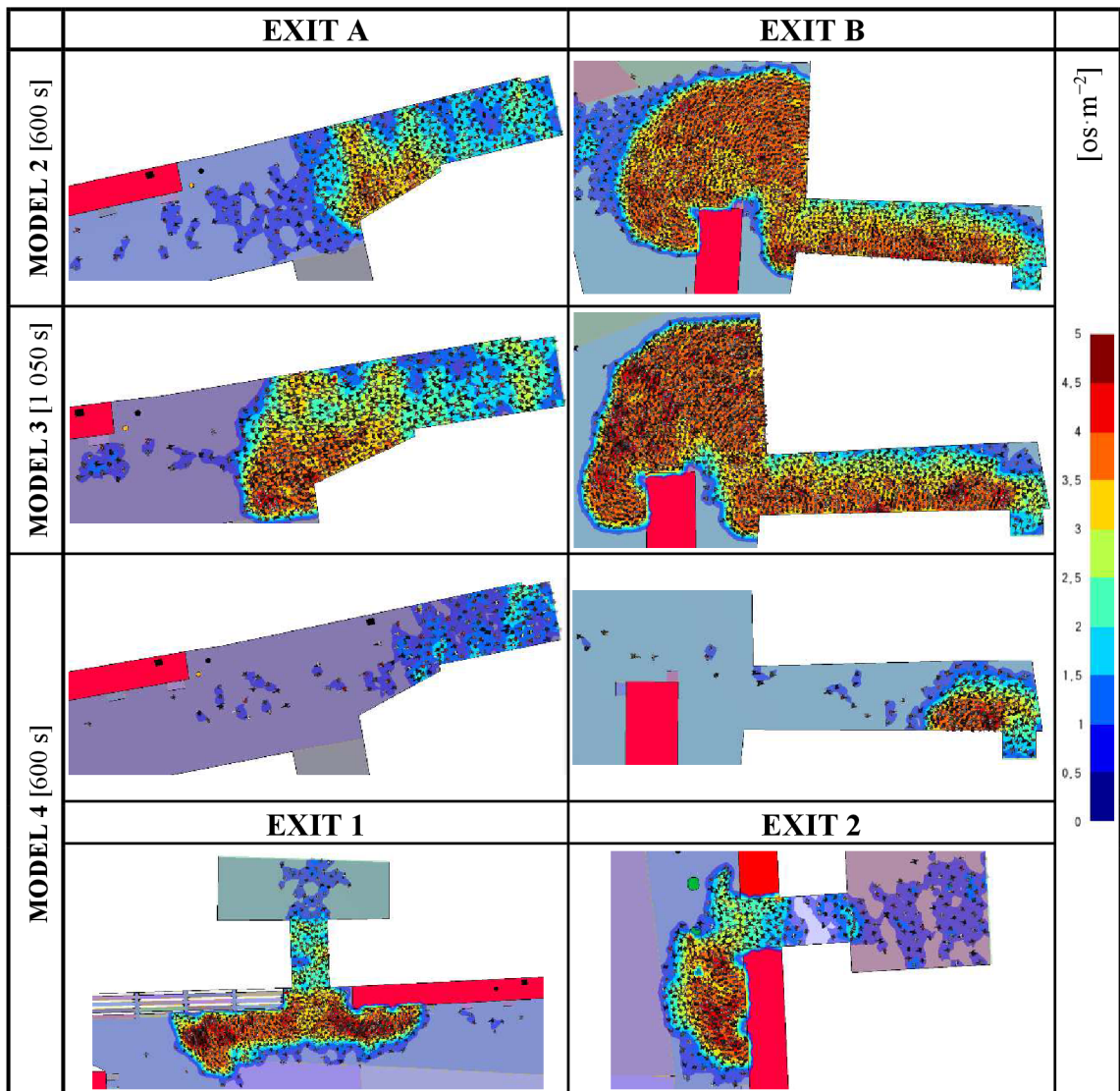
Na tomto základě bychom mohli pro větší spektrum časů vyklizení, vymodelovat další scénáře (např. zabarikádování východu/dů...). Tyto srovnání by mohli sloužit pro stanovení časových plánů vyklizení při různých situacích, a tak vylepšit efektivnost bezpečnostních plánů pro ochranu měkkého cíle.

8.3 SROVNÁNÍ VYUŽITÍ VÝCHODŮ DLE POČTU OSOB



Graf 8: Srovnání využití východů pro všechny vyklidující scénáře.

8.1 SROVNÁNÍ VYUŽITÍ VÝCHODŮ V ČASE



Obrázek 50: Srovnání zbývajících osob v areálu potvrdilo předpoklad využívanějšího z východu viditelného již z předešlého srovnání využití východů (EXIT B). Tento jev je pozorovatelný i v grafech vyklizení. Srovnání se zaměřilo právě na zlomy v grafech před vyklizením areálu.

9. ZÁVĚR

Krizová místa provozu

Z výsledků je patrné, že v současné úpravě areál nevyhovuje z hlediska kvality pěší dopravy. Z toho plyne, že je třeba optimalizovat geometrii VT nebo snížit počet účastníků. Obě varianty budou provozovatele stát peníze a je tedy na socioekonomickém posouzení, zdali vynaložené finance na zlepšení bezpečného provozu VT (možnost zvětšení kapacity festivalu, z důvodu kvalitní ochrany účastníků), budou vykazovat zisky a docílit závěru „win-win“ (= spokojenosti obou stran).

Vyklizení

Celkové zhodnocení všech výsledků, odhalilo hlavní problémy při vyklizení areálu. Jedním z důvodů je nízká kapacita spojovacích koridorů a malá šířka stávajících evakuačních východů. Modely odhalily velké kongesce hlavně u vstupu B, ke kterému vede nejužší z koridorů. Tyto a další scénáře vyklizení by se mohli vyřešit navržením dvou nových nouzových východů (Exit 1, Exit 2 o šířce 5 metrů).

Exit 1 vede přes železniční koleje, které rovnoběžně opisují severní stranu areálu. Jelikož jsou Vizovice konečnou zastávkou této trati, mohlo by se uvažovat o odsunutí vlakové dopravy do nejbližší obce Lípa n. Dřevnicí a výluku doplnit o náhradní autobusovou dopravu po dobu konání festivalu. Jako druhé řešení by mohla být úprava jízdních řádů z důvodu kyvadlové dopravy, aby vlaková zastávka mohla být přesunuta cca 250 metrů za areál. Rozptylová plocha je situována na mírném svahu soukromého pozemku, který je trvale zatravněn.

Exit 2 je situovaný na jižní straně před hlavní stage. Zrušením jednoho ze stánků jsme vytvořili pětimetrový koridor pro nový nouzový východ. Cesta je opatřena mobilní rampou, kvůli převýšení ploch. Rozptylová plocha se nachází na soukromém pozemku, a proto je východ opatřen právě mobilní rampou (dočasný objekt).

Právní ošetření těchto navrhovaných úprav bude zdlouhavé a je velmi pravděpodobné, že pronájem těchto ploch bude něco stát. V této věci by mohlo pomoci město a za využití např. barterového obchodu nebo regulací, vyjednat lepší podmínky pro zlepšení zabezpečení akce, která historicky utváří část vizovické kultury.

Dalším z navržených opatření je rozhlas, který by včasně informoval všechny účastníky VT, nehledě na tom, kde se v danou chvíli nacházejí – snížení reakční doby.

Závěrem bych chtěl zdůraznit, že tyto modely by měli být standardem při organizování všech početnějších kulturních událostí především pak těch pořádaných v uzavřených prostorech. V dnešní době si vyspělé zahraniční státy osvojili tuto problematiku a je naprostým standardem mít zpracovaný model pohybu osob při hromadné události, pro správné nastavení zabezpečení a potřebných opatření pro zvýšení LoS.

Práce by měla sloužit, jako souhrnný podklad pro optimalizaci areálu VT, která by zvýšila bezpečnost díky navrženým úpravám a také došlo k zvýšení uživatelského komfortu v rámci areálu VT.

CITACE A ZDROJE

- [1] P. B. a. L. V. Tomáš Apeltauer, Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik, Certifikovaná metodika CERO, VUT Brno, 1/2016.
- [2] J. J. Fruin, Pedestrian Planning and Design, Elevator World, Inc., 1971.
- [3] S. Pheasant, Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of the Work. CRC Press, 1996.
- [4] J. Š. a. M. Horký, „Kvantová psychologie,“ Creative Commons 3.0 Česko, [Online]. Available: <http://www.kvantovapsychologie.cz>.
- [5] G. K. Still, Introduction to Crowd Science, CRC Press, 2014.
- [6] B. P. S. G. Keith Still, Crowd Dynamics, Warwick, Anglie: University of Warwick, Department of Mathematics, 2000.
- [7] „PIXABAY,“ [Online]. Available: <https://pixabay.com/sk/vectors/hlinik-arena-barikada-bariera-1293139/>.
- [8] „EUROPLOTY,“ [Online]. Available: <https://www.europloty.cz/ostatni-vybaveni>.
- [9] „pngRIVER,“ [Online]. Available: <https://pngriver.com/download-tree-png-photos-62657/>.
- [10] „ELPLAST-KPZ,“ [Online]. Available: <https://www.elplast-kpz.cz/system-rozvadecumodul>.
- [11] „Vizovické Trnkobraní,“ © nedomyslno s.r.o., [Online]. Available: <http://www.vizovicketrnkobrani.cz>.
- [12] M. v. ČR, Koncepce ochrany měkkých cílů pro roky 2017–2020, Praha, 2017.
- [13] Soft Targets Protection Institute, Základy ochrany měkkých cílů - metodika, Praha, 2016.
- [14] „Global Terrorism Database,“ Marylandská univerzita, [Online]. Available: <https://www.start.umd.edu>.
- [15] S. T. P. I. z. J. B. V. Ing. Zdeněk Kalvach, Vyhodnocení ohroženosti měkkého cíle, Praha: Ministerstvo vnitra, 2018.
- [16] BEZPEČNOSTNÍ STANDARDY PRO POŘADATELE SPORTOVNÍCH, KULTURNÍCH A SPOLEČENSKÝCH AKCÍ, Ministerstvo vnitra, 2017.
- [17] L. Dorland, „Pinterest,“ [Online]. Available: <https://cz.pinterest.com/ldinstl/>.
- [18] „Pathfinder,“ Thunderhead engineering Consultants, Inc., [Online]. Available: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder>.
- [19] A. K. a. A. Schadschneider, „SIenceDirect,“ [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437102008579>.
- [20] J. M. M. D. D. E. John F. Canny, Artificial Intelligence A Modern Approach, New Jersey: Alan Apt, 1995.

- [21] I. S. SOLUTION, „INCONTROL SIMULATION SOFTWARE,“ [Online]. Available:file:///C:/Users/danie/Downloads/Pedestrian%20Dynamics%20long%20ENG%20HQ.pdf.
- [22] P. Group, „PTV Group,“ PTV Group, [Online]. Available: <https://www.ptvgroup.com>.
- [23] U. o. GREENWICH, „FIRE SAFETY ENGINEERING GROUP,“ 2003-2019. [Online]. Available: <https://fseg.gre.ac.uk>.
- [24] I. Thunderhead Engeneering, „Pathfinder,“ [Online]. Available: https://www.thunderheadeng.com/files/com/pathfinder/tech_ref.pdf.
- [25] M. Sladkowski, Trnkobraní v proměnách času 1967-2017, Vizovice: RUDOLF JELÍNEK, a.s., 2017.
- [26] Anonymní, „SOLE OMNIBUS LUCET,“ [Online]. Available: <http://elos.wz.cz>.
- [27] Y.-S. W. P.-K. T. a. T.-Y. T. Sai-Keung Wong, „Optimized evacuation route based on crowd simulation,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.springerlink.com>.
- [28] Základy ochrany měkkých cílů - metodika, Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2016.

PŘEHLED ZKRATEK

| | |
|--------------------------------|--|
| BP | Bakalářská práce |
| HZS | Hasičský záchranný sbor |
| IZS | Integrovaný záchranný systém |
| LoS | Level of Service (= kvalita pěší dopravy) |
| m | metry |
| $m \cdot s^{-1}$ | metry za sekundu (rychlost pohybu) |
| m^2 | metry čtvereční |
| OORZ | Odstrašit – Odhalit – Reagovat – Zmírnit dopad |
| $os \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ | osoba na metr za sekundu (intenzita) |
| $os \cdot m^{-2}$ | osoba na metr čtvereční (hustota osob) |
| $os \cdot s^{-1}$ | osoba za sekundu (rychlost vyklizení) |
| PČR | Policie České republiky |
| s | sekunda |
| VT | Vizovické Trnkobraní |
| ZZS | Zdravotní záchranný systém |

PŘEHLED TABULEK A OBRÁZKŮ

| | | |
|--------------------|--|----|
| Obrázek 1: | Statistika davových tragédií spojené se ztrátou na životech od roku 1900. [1].... | 11 |
| Obrázek 2: | Levý obrázek je koncept uvedený do praxe Johnem J. Fruinem, plocha této elipsy těla je $0,22 \text{ m}^2$. [2] Pravý obrázek je elipsa těla dle Pheasantova konceptu. Průměrná plocha této elipsy je $0,20 \text{ m}^2$. [3]..... | 12 |
| Tabulka 1: | Rozměry lidského těla dle různých zemí původu a pohlaví se zaměřením na Evropu. [3]..... | 12 |
| Obrázek 3: | Názorná ukázka trajektorie jednotlivce, seřazena dle výčtu nad ním. | 13 |
| Obrázek 6: | Grafické znázornění kvalitativní stupnice k půdorysu osoby a následný výsledek hodnocení kvality pěší dopravy pro různé typy komunikací dle Fruina. Kvalita pěší dopravy klesá s rostoucí hustotou. [1] | 14 |
| Obrázek 7: | Graf vlevo představuje přibližný vztah mezi rychlostí a hustotou. Diagram vpravo přidává do vztahu intenzitu proudění osob. Tedy kolik osob projde daným průřezem za jednotku času. Je nutné si říct, že tyto grafy jsou definovány pro ideální případy. Při reálných měřeních vlivem složitosti jednotlivých událostí se od tohoto ideálního tvaru mohou lišit. [1] | 15 |
| Obrázek 8: | Pohyb osoby kolem rohu, rozdělený na 4 sekvence (osy zorného pole jsou vyznačeny červeně). [6]..... | 16 |
| Obrázek 9: | Názorná ukázka zmíněných prvků, které omezují geometrii areálu. [7] [8] [9] [10] | 17 |
| Obrázek 10: | Čistě pomyslné rozdělení do skupinek. Trnkobraní 2015. [11]..... | 17 |
| Obrázek 11: | Ukázka vytvoření prosperujícího vzorce skupinového pohybu. [6]..... | 18 |
| Obrázek 12: | Šíření vzniklého rázu davem. [5]..... | 20 |
| Graf 1: | Zacílení a způsob provedení teroristických útoků v Evropě za období 1998–2014. [14] | 24 |
| Obrázek 13: | Útok na měkký cíl z časového hlediska. [13]..... | 25 |
| Graf 2: | Grafické vyhodnocení celkové míry ohroženosti Vizovického Trnkobraní v závislosti na načasování a místa útoku, vypracované dle metodiky [15] | 27 |
| Obrázek 14: | Typické pro makroskopický model je práce s celkem, a ne s jednotlivými osobami. Tento obrázek vyznačuje nejpoužívanější trasy v prostoru britského kampusu. [17] | 32 |
| Obrázek 15: | Mikroskopický model s jednotlivými osobami a jejich trajektoriemi. [18] | 33 |
| Obrázek 16: | Příklad simulace vyklizení místnosti s jedním východem pomocí celulárního automatu. [19] | 33 |
| Obrázek 17: | Na tomto schématu je založena celá agentní technologie. Získávání vjemů za účelem odpovědí, dat a výsledků. [20]..... | 34 |
| Obrázek 18: | Vlevo 3D model vlakové stanice i se zmíněnými dopravními prostředky a vpravo výsledek simulace (2D a 3D) na kterém jsou barevně odlišeny průměrné hustoty osob v čase. [21]..... | 35 |
| Obrázek 19: | Uživatelské rozhraní VISWALKU a zobrazení výsledků simulace 2D. [22] | 35 |
| Obrázek 20: | Exodus obsahuje pět submodelů, které komunikují s jádrem nástroje (osoba, pohyb, chování, toxicita, riziko). Submodely jsou napsány pomocí programovacího jazyka C ++. Obsah jasně stanoví sadu pravidel a funkci každého submodelu. Exodus následně sleduje a zaznamenává trajektorie všech osob na rozhraní geometrie dle napsaných kritérií. [23]..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 21: Může se zdát, že model funguje na základě celulárních automatů. Proto se nenechme zmást vizuálním konceptem a budme si jisti, že nástroj funguje na principu agentních technologií. [1]..... | 36 |
| Obrázek 22: Popis a grafické zobrazení uživatelského rozhraní nástroje Pathfinder. | 39 |
| Obrázek 23: Názorná ukázka 3D geometrie a vytvořené triangulační sítě s jednotlivými meshi. [24] | 40 |
| Obrázek 24: Půdorysný a 3D pohled na vytvořené místnosti s triangulační sítí. Na obrázku jsou dva typy dveří, bledě oranžové a zelené. Oranžovými dveřmi osoby v modelu přechází pouze z jedné místnosti do druhé (Door). Zato zelené dveře však mají na model výrazně vyšší vliv. Tvoří se na hranici místnosti s modelovacím prostorem a jsou východem (Exit), ale i možným zdrojem lidí (Occupant source). | 41 |
| Obrázek 25: Perspektivní pohled na předchozí model, doplněný o dvě dvouramenná schodiště a druhé patro s místnostmi..... | 42 |
| Obrázek 26: Výstup ze simulace, která zobrazuje využívání plochy – akumulované, s výše popsáním vzorcem chování. Model má jeden zdroj agentů. Podle využívání východů se dá přesně určit, který z nich to je (dveře v prvním patře dole vlevo).43 | 43 |
| Obrázek 27: Přesná lokalizace areálu na ortofoto mapě ČR z webového portálu Mapy.cz. [26] | 45 |
| Obrázek 28: Bližší vztahy hranice areálu (červená), přístupových cest (žlutá), hlavních komunikací (modrá), státní správy a bezpečnostních pracovníků festivalu. Výkres je podložen leteckou mapou z internetového zdroje Mapy.cz. [26] | 46 |
| Obrázek 29: Osazení vypracovaného výkresu areálu na ortofotomapsu poskytované ČUZK. ... | 47 |
| Obrázek 30: Výkres areálu doplněný o překážky pěší dopravy během konání festivalu..... | 47 |
| Tabulka 2: Hodnoty, které byly použity pro nastavení profilu osob. Rychlosti byly stanoveny za pomoci Weidmana, který zohledňuje rychlost chodce v závislosti na jeho věku. Maximální hodnota rychlosti byla stanovena procentuálním rozdělením účastníků dle věku a následným zprůměrováním hodnot. Šířku modelovaného agenta jsme nastavili dle Tabulky 1. Rychlosti pro děti byly stanoveny pomocí Ronchiho. ... | 48 |
| Graf 3: Rozdělení účastníků na VT, užitím při tvorbě modelů. | 48 |
| Obrázek 31: Printscreen základního modelu Vizovického Trnkobraní. | 50 |
| Obrázek 32: Rozdělení hustot davu [$os \cdot m^{-2}$] pod hlavní stage. Obdobně jsou řešeny i ostatní stage..... | 51 |
| Obrázek 33: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu dle skutečného provozu. [$os \cdot m^{-2}$]..... | 51 |
| Obrázek 34: Screenshot prvního kritického místa během provozu VT se zobrazením LoS (vlevo) a maximálních hustot davu (vpravo). | 52 |
| Obrázek 35: Snímek druhého kritického místa během provozu VT se zobrazením LoS (vlevo) a maximální dosažené hustoty davu (vpravo). | 52 |
| Obrázek 36: Obrázek zachycující LoS (vlevo) a maximální hustoty osob v třetím kritickém místě během provozu VT. | 53 |
| Obrázek 37: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu při neinvazivní optimalizaci. [$os \cdot m^{-2}$]..... | 53 |
| Obrázek 38: Snímek kritického místa 1 po jeho optimalizaci neinvazivním způsobem. (LoS, max. hustota) | 54 |
| Obrázek 39: Rozdělení schodiště a přilehlých ploch po optimalizaci modelu. (LoS, max. hustota) | 54 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 40: Úprava geometrie třetího kritického místa provozu. (LoS, max. hustota) | 55 |
| Obrázek 41: Maximální dosažená hustota osob na plochách areálu při invazivní optimalizaci. [os·m ⁻²]..... | 55 |
| Obrázek 42: Screenshot prvního kritického místa s navrženou invazivní úpravou. (LoS, max. hustota) | 56 |
| Obrázek 43: Vyhodnocení kvality pěší dopravy a maximální hustoty při invazivní úpravě areálu. (LoS, max. hustota) | 56 |
| Obrázek 44: Maximální hustota v Modelu 2, znázorňující vyklizení při návštěvnosti 7 500 osob. [os·m ⁻²]..... | 57 |
| Tabulka 3: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 2. | 58 |
| Graf 4: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhajícím vyklizení v závislosti na čase (Model 2). | 58 |
| Obrázek 46: Rozmístění agentů v Modelu 3, znázorňující „peak-time“ při návštěvnosti 10 500 osob. | 59 |
| Obrázek 47: Maximální hustota v Modelu 3, znázorňující vyklizení při návštěvnosti 10 500 osob. [os·m ⁻²] | 59 |
| Tabulka 4: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 3. | 60 |
| Graf 5: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhajícím vyklizení v závislosti na čase (Model 3). | 60 |
| Obrázek 48: Situování přidanych nouzových východů (Model 4). | 61 |
| Obrázek 49: Maximální hustota při vyklizení areálu pomocí přidanych dvou evakuačních východů při počtu 10 500 osob. [os·m ⁻²] | 61 |
| Tabulka 5: Časy, při kterých model opustil poslední agent pro jednotlivé simulace a statistika časových výsledků Modelu 4. | 62 |
| Graf 6: Vynesení hodnot počtu osob nacházejících se v areálu při probíhajícím vyklizení v závislosti na čase (Model 4). | 62 |
| Graf 7: Srovnání času vyklizení rozprostřených 7 500 osob po areálu s koncentrovanými 10 500 osobami pod hlavním pódiem..... Další srovnání by mohlo být založeno na tomto poznatku a blíže tak stanovit vliv rozprostření účastníku po areálu na celkový čas vyklizení. | 63 |
| Obrázek 52: Srovnání času vyklizení scénáře bez přidanych nouzových východů a s přidany východy. | 64 |
| Graf 8: Srovnání využití východů pro všechny vyklidující scénáře..... | 64 |
| Obrázek 53: Srovnání zbývajících osob v areálu potvrdilo předpoklad využívanějšího z východu viditelného již z předešlého srovnání využití východů (EXIT B). Tento jev je pozorovatelný i v grafech vyklizení. Srovnání se zaměřilo právě na zlomy v grafech před vyklizením areálu. | 65 |