

# Nezávislá pilotní studie využití analýzy zvukového signálu pro zvýšení bezpečnosti v dálničních tunelech

Vypracoval:

Prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

Brno 2021

## ÚVOD

Dálniční tunel v dnešní době představuje komplexní organizmus, vybavený řadou bezpečnostních a kontrolních technologií. Je to dáno jeho topologií jako liniové stavby se specifickou problematikou detekce nebezpečných situací za ztížených podmínek. V případě existence těchto nebezpečných situací nastupuje další, pro dálniční tunel specifická problematika odvodu tepla, kouře a evakuace lidí v případě havárie a následného požáru. S nastupující elektromobilitou a současným stavem z pohledu požární bezpečnosti, kdy není vypracovaná jasná metodika hašení elektromobilů uvnitř tunelů, a nejsou ani definovány standardizované technické prostředky pro hašení těchto vozidel, je tato problematika o to více aktuální. Nasazování stále více senzorů a detekčních systémů na druhé straně klade zvýšené požadavky na obsluhu tunelových velínů, a to z toho důvodu, že žádný z těchto systémů nedosahuje 100% spolehlivosti, a ani nulového počtu planých poplachů. Proti těmto zvýšeným požadavkům na obsluhu velínů jde celkem logická snaha tyto velíny do určité míry centralizovat, a optimalizovat tak provozní náklady. Zdá se, že řešení tohoto problému je spíše otázkou budoucnosti.

Rešerší dostupné literatury bylo zjištěno, že takové řešení již existuje, je provozováno v reálné praxi poměrně dlouhou dobu, a jsou k dispozici relevantní data pro statistickou analýzu důležitých parametrů z pohledu provozovatele. Tato analýza vychází z dat, poskytnutých společností ASFINAG, která k této problematice přistoupila z pohledu použité technologie zcela novým způsobem. Tato data byla získána na základě reálného provozu rakouských dálničních tunelů z období let 2014 až 2019. Analýza posuzuje instalaci progresivní technologie, založené na prvcích umělé inteligence, a sice Akustického Detekčního Systému. Analýza posuzuje nasazení tohoto Akustického Detekčního Systému v těchto tunelech z pohledu bezpečnosti, reakční rychlosti, schopnosti detekovat dopravní nehody, počtu planých poplachů a nákladů na údržbu a provoz.

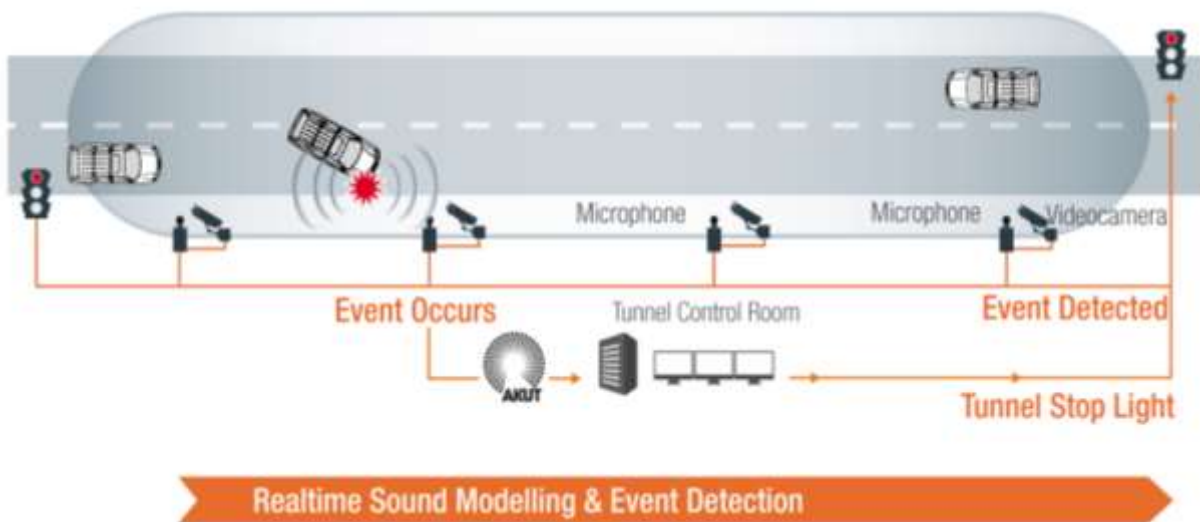
Dálniční, popřípadě městské magistralní tunely představují kritické body v rámci dálniční, popř. silniční a městské infrastruktury. V případě dopravní nehody uvnitř tunelu může dojít k požáru vozidel s katastrofálními důsledky. V případě velkého požáru jsou ohroženy posádky všech vozidel, které do tunelu v mezičase vjely. Čas reakce automatických detekčních systémů zde hraje klíčovou roli.

Zabezpečení tunelu je dnes tvořeno komplexem technologických systémů a podsystémů, které se vzájemně doplňují. Mezi tyto celky patří především kamerový systém vybavený automatickými detekčními algoritmy, mechanické větrání, systém měření oxidů dusíku, CO a opacity, detekce kouře, indukční smyčky, protipožární systém, systém osvětlení tunelu a další. Tyto systémy se vzájemně doplňují, a některé jsou závislé na jiných (např. kamerový systém na osvětlení tunelu). V podstatě a s jistou nadsázkou se zde do určité míry technologicky replikují lidské smysly, jako je např. zrak (kamerový systém) nebo čich (detektory škodlivých plynů). Do nedávna se v tomto oboru opomíjel důležitý smyslový orgán, který hraje v biologickém světě z hlediska detekce nebezpečí v mnoha případech klíčovou roli. Tím je sluch.

## STRUČNÝ POPIS AKUSTICKÉHO DETEKČNÍHO SYSTÉMU

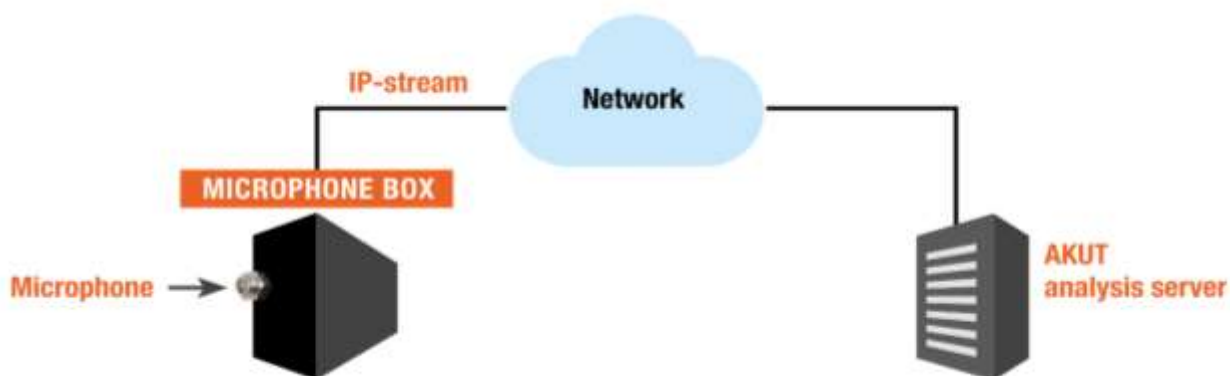
Akustický Detekční Systém (dále jen ADS) instalovaný v rakouských dálničních tunelech replikuje právě tento důležitý smyslový orgán - sluch. Je tvořen sítí mikrofonů, umístěných po zhruba 100 metrech v podélném profilu tunelu. Pokud je v tunelu nainstalovaný kamerový systém, umísťují se mikrofony do stejných míst, jako kamery. Mikrofony jsou umístěny spolu s procesními elektronickými obvody v samostatných boxech s vysokým krytím. Membrána mikrofonu je chráněna speciálním krytem, který umožňuje použití běžného strojového mytí tunelu. Každý takový box snímá zvukové prostředí tunelu, převádí je do digitální oblasti a posílá tato data do vyhodnocovacího serveru. Zde se data vyhodnocují pokročilými algoritmy s použitím prvků umělé neuronové sítě a umělé inteligence. V případě reálné nehody je výstupem tohoto systému ultra rychlý alarmový signál s přesnou kategorizací nehody a lokalizací místa nehody. Tyto informace jsou předány do řídicího systému tunelu, kamerový systém je

automaticky přepnut na místo nehody, a operátor má možnost v případě dopravní nehody vjezd do tunelu okamžitě uzavřít. ADS je díky své koncepci extrémně rychlý s reakcí alarmového výstupu do jedné sekundy od vzniku dopravní nehody až po předání informace do řídicího systému tunelu, a to včetně kategorizace detekované nebezpečné situace a přesné lokalizace tohoto incidentu uvnitř tunelu. Základní blokové schéma celého systému ukazuje obr. 1.



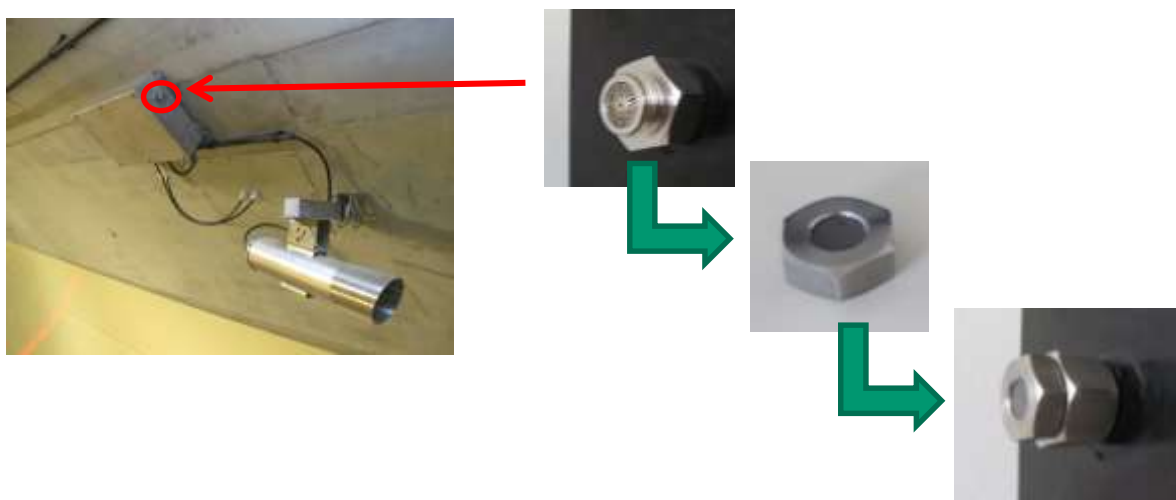
Obr. 1 Přehledové schéma Akustického Detekčního Systému

Jak již bylo řečeno výše, snímání zvukového pozadí tunelové trouby speciálním mikrofonom, a základní zpracování tohoto signálu v digitální oblasti je realizováno v mikrofonním boxu, umístěném většinou v místě instalace kamery. Toto umístění je výhodné z důvodu existence napájecího přívodu a optického kabelu v tomto bodě. Přenos signálu od mikrofonního boxu k vyhodnocovacímu serveru probíhá opět v digitální podobě, a sice za použití specializovaného systémového přenosového protokolu, který byl vyvinut společně s detekčními algoritmy speciálně pro tento ADS. Náročnost těchto přenosových technologií vyplývá ze skutečnosti, že ADS vyhodnocuje jak separátně jednotlivé individuální mikrofony, tak i jejich vzájemné korelace, a to v celé délce tunelu, která může dosáhnout i několik desítek km. Obrázek 2 ukazuje blokové schéma přenosu signálu.



Obr. 2 Blokové schéma přenosu signálu Akustického Detekčního Systému v digitální oblasti při přenosu dat z mikrofonního boxu do vyhodnocovacího serveru

Mikrofony samotné jsou chráněné speciální membránou, která umožňuje v tunelu provádět běžné strojové mytí bez ovlivnění funkčnosti celého systému (obr. 3).



Obr. 3 Reálné provedení mikrofonního boxu a detail ochrany mikrofonu speciální membránou. Pod mikrofonním boxem je umístěna běžná kamera

#### KATEGORIE ALARMOVÝCH VÝSTUPŮ

V případě identifikace nebezpečné situace provádí ADS automaticky kategorizaci konkrétního nebezpečí a vypočítává místo incidentu na základě časové analýzy signálů z více mikrofonních kanálů. Následně také posílá relevantní informaci do řídicího systému tunelu, který řídí kamerový systém a zobrazuje místo incidentu na monitorech v místnosti velínu. ADS automaticky identifikuje a následně zařazuje nebezpečnou situaci do jedné z následujících kategorií:

- náraz vozidla / prasknutí pneumatiky
- náhlé brzdění
- zavření / bouchnutí dveří vozidla
- troubení vozidla
- hlasy v tunelu

Tato identifikace a kategorizace nebezpečných situací je díky použitým algoritmům a celkové SW architektuře systému extrémně rychlá s reakčním časem pod 1 sekundu. ADS detekuje mimo výše uvedené situace také uvolnění krytů od kanalizace ve vozovce díky jejich typickému zvukovému projevu vznikajícímu při průjezdu vozidla nad nebo vedle uvolněného krytu.

#### FUNKCE VOICE SCAN

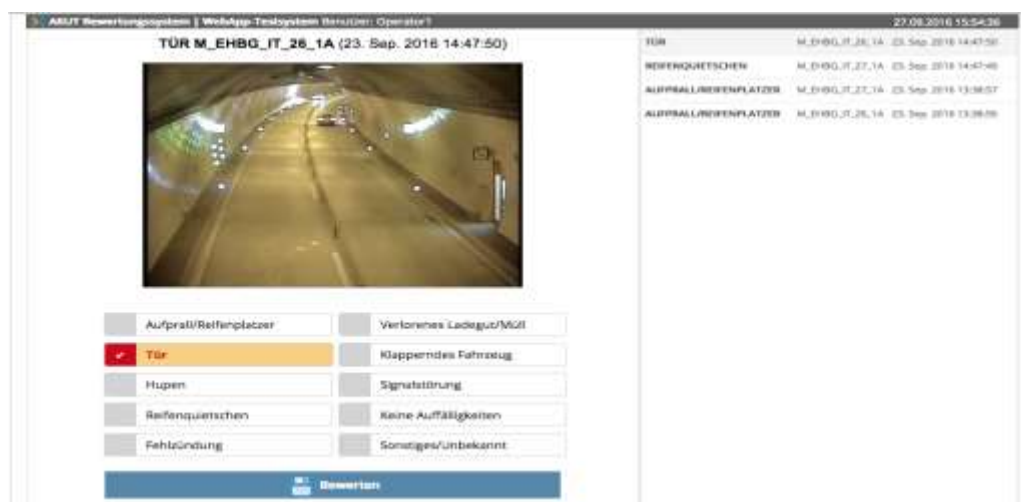
V případě incidentu je možné aktivovat funkci Voice Scan. Signál z mikrofonů lokalizuje v reálném čase pohybující se osoby v tunelu na základě jejich akustických projevů - řeči, křiku, volání apod. Pohybující se osoby jsou zobrazeny v grafickém plánu tunelu grafickými symboly osob. Zobrazení je dynamické, operátor tedy ví, jakým směrem se osoby v tunelu pohybují, a kde se aktuálně nachází. Pokud je v tunelu nainstalován nouzový zvukový systém, může operátor s osobami v tunelu obousměrně hlasově komunikovat. Viditelnost zde opět nehraje žádnou roli.



Obr. 4 Grafické dynamické zobrazení pohybujících se osob v tunelu pomocí funkce Voice Scan v reálném čase

## FUNKCE RATING

Tato funkce umožňuje operátorovi po detekovaném incidentu verifikovat spolehlivost ADS. Po zvládnutém a ukončeném incidentu, kdy je již známa přesná příčina, popř. druh dopravního incidentu, může být operátorem aktivována funkce „Rating“. Pomocí této funkce operátor potvrdí správnost reakce ADS vyplněním jednoduchého formuláře v aplikaci tohoto systému. ADS tímto jednak získává přirozenou cestou nová data, která jsou pak využita ke zdokonalení jeho detekčních algoritmů a jednak lze tímto postupem velmi přesně statisticky zjistit kvalitu detekce a počet planých poplachů.



Obr. 5 Obrazovka s formulářem funkce Rating

## REÁLNÝ PROVOZ AKUSTICKÉHO DETEKČNÍHO SYSTÉMU

ADS používá pro svou činnost prvky umělé inteligence a principy umělých neuronových sítí. Na rozdíl od laboratorních aplikací podobných principů zpracování signálu, popř. matematického modelování podobných algoritmů např. v prostředí Matlab, tento systém reálně funguje již téměř 10 let. Je třeba si uvědomit, že virtuální simulace většinou nezohledňují nelinearitu senzorů, konečný rozsah čísel, časové transportní zpoždění, šumové pozadí a další faktory. V praktickém provozu se všechny tyto faktory vyskytují, a k tomu se přidávají další faktory, jako je např. proces stárnutí jednotlivých komponent, vnější vliv prostředí (např. strojové čištění tunelu, vibrace) apod.

Pilotní nasazení tohoto systému proběhlo v Rakousku u společnosti ASFiNAG v letech 2010 až 2014 na dálničním tunelu Kirchdorf (1). Jedná se o dvoutroubový tunel s délkou 2400 metrů a počtem průjezdů 21000 vozidel denně. Vyhodnocování spolehlivosti a kvality detekce tohoto systému probíhalo v rozmezí let 2010 až 2014. Na základě výsledků z tohoto pilotního provozu se společnost ASFiNAG rozhodla nasazovat ADS do všech tunelů kategorie 3 a 4. V současné době je tento systém nasazen na 30 tunelech v Rakousku s celkovým počtem 1800 mikrofonů a délkou tunelových trub 140 km.

#### STATISTICKÁ ANALÝZA PROVOZU AKUSTICKÉHO DETEKČNÍHO SYSTÉMU

V letech 2016 až 2018 provedla společnost ASFiNAG rozsáhlé kontrolní ověření funkčnosti nasazeného ADS na statisticky relevantním vzorku 9 tunelů s rozdílnou délkou, počtem denních průjezdů a počtem mikrofonů. Metodika ověřování spočívala v porovnání časových záznamů jednotlivých reálných incidentů z těchto tunelů získaných z databáze řídicího systému tunelu, kamerového systému, systému indukčních smyček, prvků lidské obsluhy (SOS tlačítek, kontaktů dveří SOS hlásek), ostatních senzorů nainstalovaných v tunelu a ADS tunelu. Jako postačující časové rozlišení jednotlivých záznamů byla stanovena 1 sekunda. Výše uvedené systémy byly mezi sebou časově synchronizovány. Zde prezentované výsledky pocházejí právě z tohoto praktického ověření funkčnosti.

Tunely zahrnuté do statistického ověření funkčnosti ADS společnosti ASFiNAG v rozmezí let 2016-2018

Tunel	Délka v m	Počet tubusů	Počet mikrofonů	Počet vozidel za den
Bosruck, A9	5 505	2	122	17 470
Ehrentalerberg, A2	3 345	2	75	30 623
Falkenberg, A2	1 090	2	26	30 623
Lendorf, A2	800	2	20	30 623
Trettinig, A2	450	2	12	30 623
Götschka, S10	4 435	2	86	37 298
Neumarkt, S10	1 970	2	38	37 298
Pernau, S10	245	2	4	37 298
Lest, S10	545	2	12	37 298
<b>Σ 9 Tunelů</b>	<b>Σ 36 770 m délka</b>		<b>Σ 395</b>	

Tab. 1 Tunely s celkovou délkou 36770 metrů zahrnuté do statistického vyhodnocení provozu Akustického Detekčního Systému v rozmezí let 2016 až 2018

Během tohoto vyhodnocovaného období bylo v těchto 9 tunelech zaznamenáno celkově 19 incidentů:

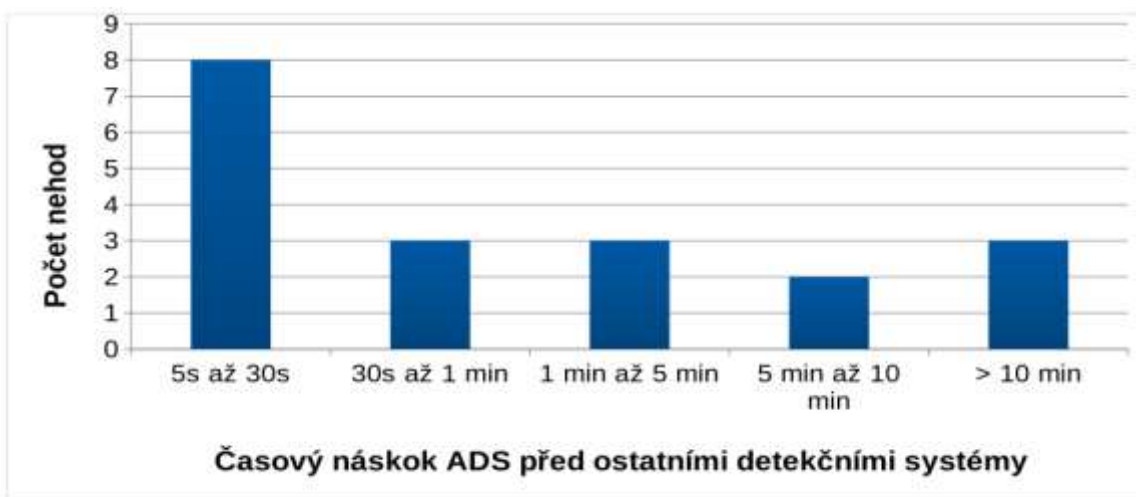
Typ nehody	
Náraz do zadní části vozidla	5
Kolize 2 vozidel	4
Kolize vozidla s infrastrukturou tunelu	10
<b>Celkově</b>	<b>19</b>

Tab. 2. Počet dopravních nehod a jejich zjištěná příčina během statistického vyhodnocení provozu Akustického Detekčního Systému v 9 vybraných tunelech v rozmezí let 2016 až 2018

Jedním z kritérií vyhodnocení kvality detekce bylo porovnání rychlosti reakce ADS oproti jiným technologiím, nainstalovaným v těchto tunelech. ADS reagoval ve všech 19 případech jednoznačně nejrychleji ze všech instalovaných detekčních technologií (kamerový systém, indukční smyčky, SOS tlačítka, dveřní kontakty na hláskách apod.). Statistika společnosti ASFiNAG uvádí, jaký časový náskok v detekci jednotlivých incidentů přineslo nasazení ADS v těchto tunelech oproti jiným detekčním

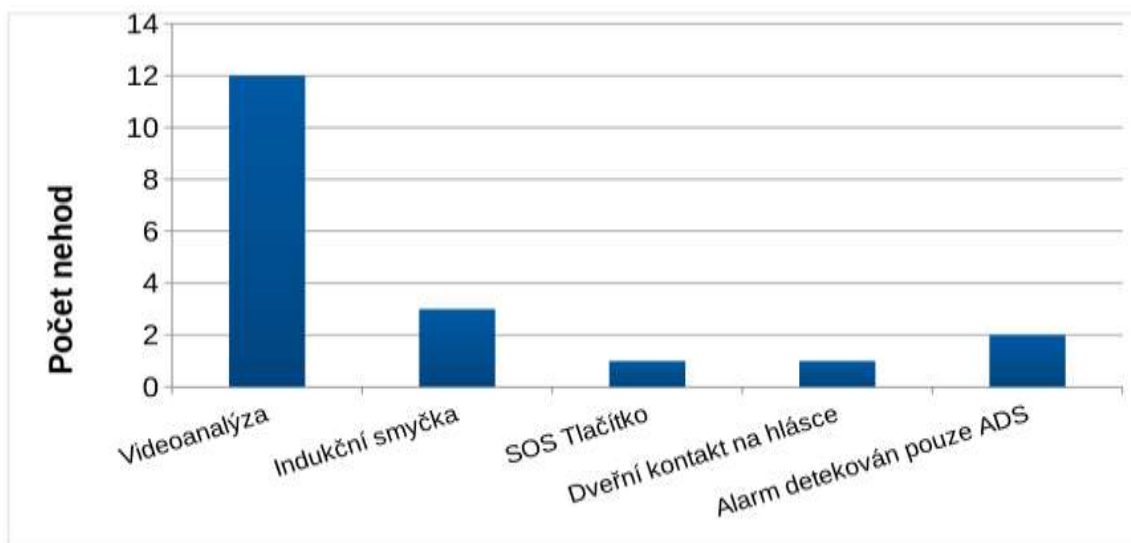
technologíím. Z grafu 1 je vidět, že v 8 případech byl ADS rychlejší než všechny ostatní detekční technologie s časovým předstihem 5 až 30 sekund, ve 3 případech činil jeho časový náskok 30 sekund až 1 minutu, v dalších 3 případech byl časový náskok 1 minuta až 5 minut, ve 2 případech byl časový náskok ADS 5 minut až 10 minut, a ve 3 případech byl časový náskok více než 10 minut.

Vzhledem k tomu, že rychlost reakce ADS od samotného fyzického incidentu (dopravní nehody) přes jeho naslouchání mikrofonními boxy, analytickým počítačovým vyhodnocením až k zobrazení daného incidentu na monitoru operačního střediska je extrémně rychlá s celkovým časem zpoždění do 1 sekundy, dají se tato získaná data interpretovat i takto: Uvedená doba časového náskoku ADS oproti jiným detekčním systémům je současně zpoždění, které jiné detekční systémy vykazují od začátku nehody až po její detekci těmito jinými systémy.



Graf 1 Časový náskok Akustického Detekčního Systému při detekci dopravních nehod oproti jiným detekčním technologiím, nainstalovaným v 9 vybraných tunelech v rozmezí let 2016 až 2018

Dále bylo pro statistickou analýzu důležité zjistit, jaké ostatní detekční systémy detekovaly tyto dopravní nehody jako druhé nejrychlejší po ADS. Vzhledem k jednotnému synchronizovanému času všech detekčních systémů nebyl problém porovnat časové záznamy jednotlivých detekčních systémů mezi sebou a vyhodnotit i tento parametr. Graf 2 ukazuje, že ve 12 případech byl jako druhý nejrychlejší po ADS právě kamerový systém, vybavený automatickými detekčními algoritmy. Velmi zajímavá je zde také skutečnost, že z 19 nehod nebyly 2 nehody detekovány ostatními detekčními systémy vůbec, tyto 2 nehody byly detekovány pouze ADS.



Graf 2 Statistika pořadí jiných detekčních systémů jako druhých nejrychlejších po Akustickém Detekčním Systému v rozmezí let 2016 až 2018 v 9 vybraných tunelech

## PLANÉ POPLACHY

Aby byl jakýkoliv automatický detekční systém prakticky použitelný, musí vykazovat co nejmenší počet planých poplachů. Toto platí ve zvýšené míře u tunelových aplikací, kdy je operátor tunelu vystaven velkému množství informací, které generují jak automatické detekční systémy, tak i jiné technologie, nainstalované v tunelu. Pro společnost ASFiNAG byl nízký počet planých poplachů klíčový parametr při svém rozhodnutí zavést plošně ADS do všech dálničních tunelů kategorie 3 a 4 v Rakousku. Pro potvrzení nízké míry planých poplachů, které ADS standardně vykazuje, provedla společnost ASFiNAG cílené vyhodnocování planých poplachů na 4 tunelech s výrazně rozdílnými parametry. Jedná se zde o tunely s délkou od 4 km do 15 km a s denní průjezdností od 13000 vozidel až po 109000 vozidel. Data byla průběžně vyhodnocována od listopadu 2019 na těchto tunelech:

Tunel	Délka v metrech	Počet mikrofonů	Počet vozidel za den	Počet planých poplachů za 24h na 1 km délky tunelu
Kaisermuehlen	4 268	97	109 000	0,21
Goetschka	8 870	82	37 298	0,11
Spering	5 740	62	19 819	0,02
Arlberg	15 516	175	13 033	0,29

Tab. 3. Tunely zahrnuté do statistického vyhodnocení počtu planých poplachů Akustického Detekčního Systému od roku 2019

Z důvodu rozdílné délky porovnávaných tunelů bylo potřeba zavést normovaný parametr, a sice počet planých poplachů na 1 km délky tunelové roury za 24 hodin provozu. Z výsledků statistického vyhodnocování je vidět, že se počet planých poplachů v těchto 4 tunelech pohybuje od 0,02 planého poplachu na 1 km délky tunelu za 24 hodin až do 0,29 planého poplachu na 1 km délky tunelu za 24 hodin. Rozptyl je značný, i když i ten nejvyšší počet planých poplachů (tedy 0,29 planého poplachu na jeden km délky tunelu za 24 hodin) je v porovnání s jinými detekčními technologiemi extrémně nízký. Aby si společnost ASFiNAG udělala představu o statistickém průměru planých poplachů ve všech svých tunelech, zprůměrovala data ze všech stávajících 26 tunelů vybavených ADS s celkovou délkou tunelových trub 130 km a celkovým počtem 1679 mikrofonů. Výsledkem je údaj 0,16 planých poplachů na 1 km tunelové trouby za 24 hodin. Tunel dlouhý 5 km (2 x 5 km tunelových trub) vykazuje celkově v průměru 1,6 planých poplachů za 24 hodin.

## ZÁVĚR

Jak ukazují praktické zkušenosti z téměř 10-ti letého provozu ADS v sousedním Rakousku, přináší jeho instalace zásadní zvýšení bezpečnosti provozu tunelu, zefektivnění a hlavně urychlení evakuace lidí z tunelu, a v neposlední řadě i snížení zátěže operátorů.

Unikátní vlastností ADS v porovnání se stávajícími technologiemi včetně kamer vybavených detekčními algoritmy je jeho extrémní rychlost detekce a řádově menší počet planých poplachů. Rychlost detekce je klíčová pro co nejrychlejší uzavření vjezdu vozidel do tunelu v případě havárie uvnitř tunelu. Důvod je zřejmý - čím méně vozidel vjede po havárii do tunelu, tím méně lidí se nachází uvnitř tunelu pro následnou evakuaci. V případě tunelu Kaisermuehlen vjíždí do tunelu v době dopravní špičky až 200 vozidel za minutu, což představuje zhruba 400 osob. Pokud uvažujeme, že ADS je v průměru o 90 sekund rychlejší než jakýkoliv jiný detekční systém, zabrání ADS vjezdu až 600 osob do tohoto tunelu v případě havárie. S nastupující elektromobilitou a problematikou hašení takovýchto vozů uvnitř tunelu je snížení počtu osob uvnitř tunelu při následné evakuaci z tunelu zásadním kritériem.



Nasazení ADS v tunelech v Rakousku bylo také jedním z důvodů pro zvýšení povolené rychlosti v tunelech na 100km/hod. Toto zvýšení povolené rychlosti vedlo automaticky ke zmenšení rychlostního rozdílu uvnitř a vně tunelu, k vyšší pravidelnosti dopravy, a tím také ke snížení rizika nehody před vjezdem do tunelu.

V případě, že k nehodě v tunelu přes všechna preventivní opatření dojde, a osoby z vozidel vystoupí, umožňuje ADS automatickou cílenou lokalizaci osob pohybujících se v tunelu. Tyto osoby jsou mnohdy dezorientované, a v případě snížené či nulové viditelnosti je nelze lokalizovat žádným jiným technologickým systémem. Pokud by složky IZS obdržely informaci o lokalizaci pohybujících se osob v tunelu od Akustického Detekčního Systému, byl by jejich následný zásah jistě mnohem efektivnější a rychlejší.

Statistické vyhodnocení reálného provozu ADS ukázalo další důležitou vlastnost tohoto systému, a tím je velmi malý počet planých poplachů. Tento parametr mimo jiné umožnil centralizaci velínů společnosti ASFiNAG v Rakousku. Před centralizací měl téměř každý delší tunel svůj vlastní velín s nepřetržitou obsluhou, což přinášelo velké provozní náklady, a to jak mzdové, tak i náklady na výcvik, školení a training specialistů jednotlivých velínů. Nasazení automatických systémů s velmi nízkou četností planých poplachů, jakým Akustický Detekční Systém bezesporu je, vedlo mimo jiné i k centralizaci velínů dálničních tunelů. V současné době je u společnosti ASFiNAG v provozu pro celé území Rakouska se zhruba 300 km dálničních tunelů pouze 9 centralizovaných velínů v každé spolkové zemi, a jedno záložní dozorové globální pracoviště ve Vídni. V praxi to znamená menší počet vysoce specializovaných odborníků, kteří jsou schopni adekvátně reagovat na jakoukoliv mimořádnou situaci. V případě velkého množství planých poplachů by tato centralizace nebyla v praxi myslitelná, a zde hraje ADS s extrémně nízkou četností planých poplachů velmi důležitou roli.

Jako poslední důležitou vlastnost tohoto systému je třeba uvést jeho minimální provozní náklady. Speciální provedení mikrofonů umožňuje použití běžného strojového mytí tunelu, a kalibrace systému se provádí v rámci běžné údržby tunelu průjezdem kalibračního vozidla. Na mikrofonních boxech není třeba z důvodu údržby provádět žádné fyzické zásahy. Praxe ukazuje, že na nejdéle sloužícím tunelu Kirchdorf za posledních 11 let nebylo nutno vyměnit žádný komponent ADS, umístěný v tunelové troubě. Výjimkou byla pouze výměna jednoho z harddisku průmyslových serverů umístěných na velínu, na kterých ADS běží, což je však běžná provozní záležitost, týkající se všech systémů, které používají průmyslové počítače.

## LITERATURA

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Tunnel\\_Kirchdorf](https://de.wikipedia.org/wiki/Tunnel_Kirchdorf)
- [2] Akustisches Tunnelmonitoring, statistika společnosti ASFiNAG z let 2016 až 2019
- [3] Popis Akustického Detekčního Systému, dokumentace společnosti Powerdynax, s.r.o., 10/2020
- [4] Stručný popis integrace Akustického Detekčního Systému do řídicího systému tunelu, dokumentace společnosti Powerdynax, s.r.o., 11/2020