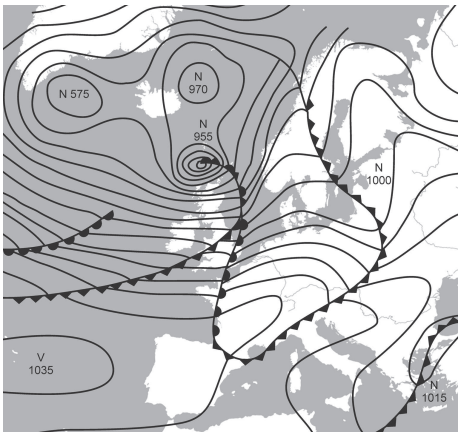
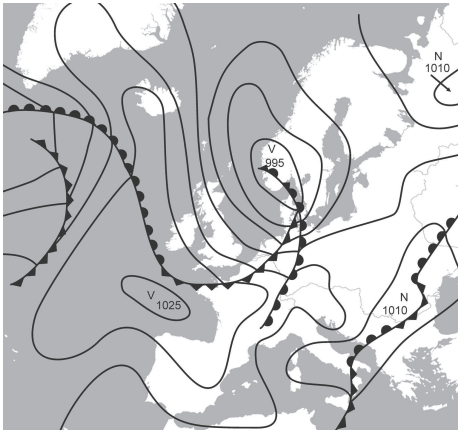
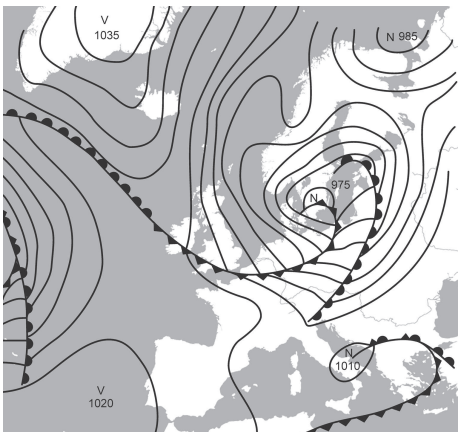


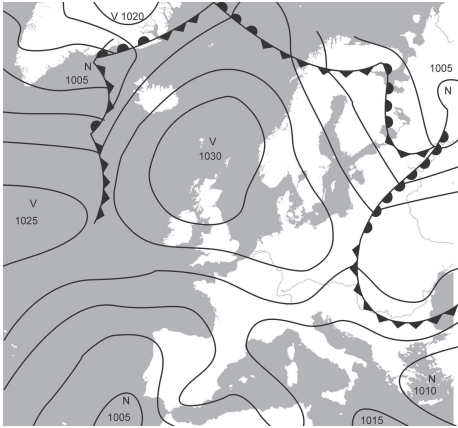
## 9 PŘÍLOHY

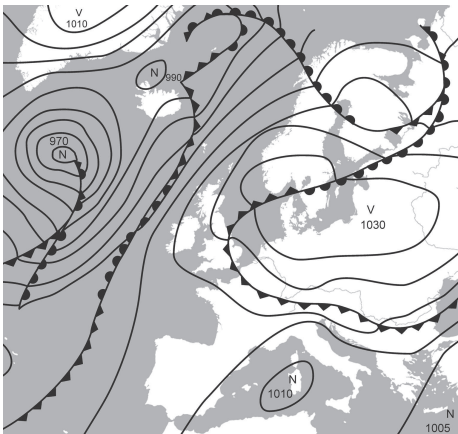
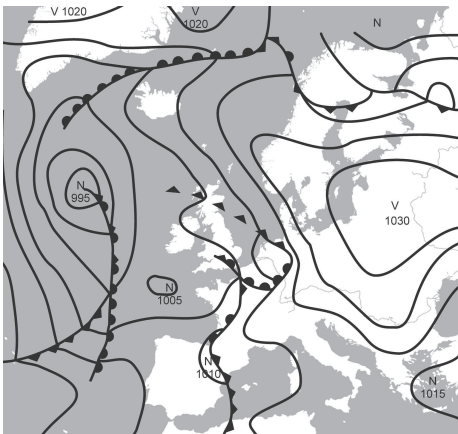
### P-1 Povětrnostní situace pro střední Evropu

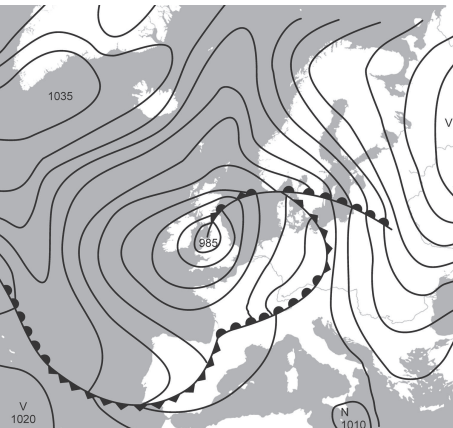
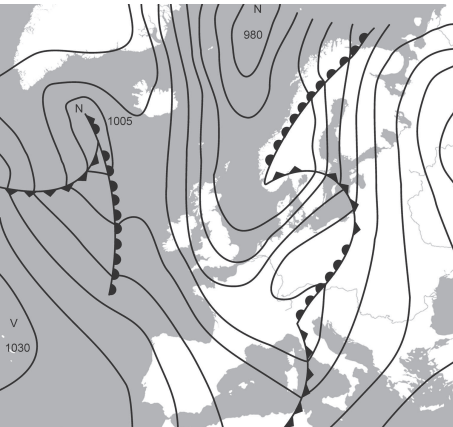
Níže uvedené popisy charakteristických povětrnostních situací byly převzaty z publikace *Počasí kolem nás*, jejímž autorem je RNDr. Vladimír Seifert.

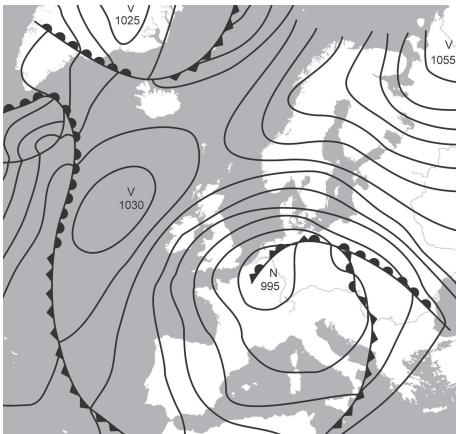
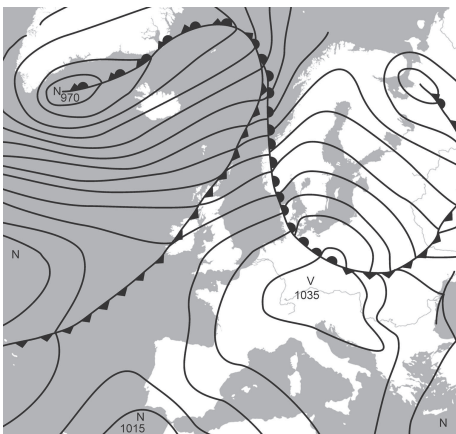
Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<p><b>Západní cyklonální (Wc)</b></p> 	<p>Nad střední Evropu proniká od západu vlhký oceánský vzduch od Atlantiku. Pohyb frontálních systémů řídí tlaková níže, která se pohybuje od Islandu nad jižní Skandinávií. Čím je tato níže hlubší, tím větrnější počasí můžeme očekávat. V rychlém západním proudění postupují svižně z východu i jednotlivé fronty (teplá až <math>40 \text{ km.h}^{-1}</math>, studená až <math>60 \text{ km.h}^{-1}</math>), které svou oblačností ovlivňují počasí od Skandinávie až po středomoří. Můžeme proto počítat s vydatnými srážkami, které budou na návětrných stranách hor ještě silnější. Tento charakter počasí, vyskytne-li se v raném létě, je nazýván medardovskou cirkulací. Ta se v létě vyznačuje poměrně nízkými denními teplotami, v zimě naopak přináší do nížin spíše teploty kolem nuly s typickými smíšenými srážkami a oblovou (tzv. vánoční obleva), na hory pak vydatné sněžení a mírné mrazy.</p>
<p><b>Západní anticyklonální (Wa)</b></p>	<p>Nad střední Evropu proniká od západu oceánský vzduch od Atlantiku, avšak vliv azorské tlakové výše, jejíž střed můžeme nalézt v oblasti Pyrenejského poloostrova, nedovoluje frontálním systémům pronikat do střední Evropy. Jejich vliv je zde jen velmi zanedbatelný, maximálně mohou přinést nevýrazné srážky do našich severních pohraničních hor. V letních měsících proto panuje ve střední Evropě suché teplé počasí s průměrnými denními teplotami kolem <math>25 \text{ }^\circ\text{C}</math>, a nočními kolem <math>13 \text{ }^\circ\text{C}</math>. V zimě pak můžeme očekávat spíše jen slabé mrazy (od <math>0</math> do <math>-5 \text{ }^\circ\text{C}</math>), které mohou být výraznější jen při sněhové pokrývce. Na podzim a v zimě tato situace přináší častokrát také mlhavé počasí s nízkou inverzní oblačností.</p>

Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<p><b>Severozápadní cyklonální (NWc)</b></p> 	<p>Na sklonku podzimu je tato situace toužebně očekávána lyžaři, v červenci nenáviděna milovníky horkého léta a v květnu vítána zemědělci. To proto, že přináší do střední Evropy chladný a vlhký vzduch z oblasti Islandu, který na podzim znamená občasné sněžení, v létě propršenou dovolenou a v květnu naplnění pranostiky: „Studený a vlhký máj, v stodole ráj.“ Ačkoli hovoříme o cyklonální situaci, příčinou severozápadního proudění nad střední Evropou je azorská tlaková výše, která svým výběžkem zasahuje daleko k severu, mnohdy až do oblasti Islandu. Po přední straně tohoto výběžku pak postupují jednotlivé frontální poruchy od Grónska, přes jižní Skandinávii až do střední Evropy. Tlaková níže, která tyto fronty pohání, se přitom udržuje nad jižním Norskem, nebo dokonce až nad Baltským mořem. Tato situace přináší do střední Evropy chladné, vlhké a často větrné počasí (v zimě mohou na horách nárazy větru překročit i <math>30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}</math>), ale v zimě s teplotami vyššími než činí dlouhodobý průměr.</p>
<p><b>Severozápadní anticyklonální (Nwa)</b></p>	<p>Při této situaci můžeme i na tak malém území, jakým je naše republika, pozorovat výrazné rozdíly mezi počasím na Ostravsku a v jižních Čechách. Příčinou toho je to, že právě severovýchod našeho území ovlivňují frontální poruchy spojené s tlakovou níží se středem nad Biskajským zálivem, postupují přes jižní Skandinávii a Baltské moře k jihovýchodu. Na severovýchodě našeho území proto převažuje chladné polojasné počasí s možností výskytu přeháněk. Teploty panující při této situaci jsou spíše průměrné – červencové maximální teploty <math>22 \text{ }^\circ\text{C}</math>, noční pak <math>13 \text{ }^\circ\text{C}</math>; lednová denní maxima <math>3 \text{ }^\circ\text{C}</math>, minima okolo <math>-1 \text{ }^\circ\text{C}</math>.</p>
<p><b>Severní cyklonální (Nc)</b></p> 	<p>Tato situace, která často stojí za rychlými změnami počasí na našich severních pohraničních horách, se velice často vyvine ze severozápadní cyklonální situace, a to tehdy, když se tlaková níže přesune z jižního Norska dále k východu nad východní oblasti Baltského moře nebo nad jižní Finsko a azorská tlaková výše se vysune ještě více k severu až někam nad Grónsko. Právem je proto tato situace považována za nepříjemně chladnou a fronty, které k nám přicházejí z jižní Skandinávie přes Baltské moře, přinášejí značné srážky do našich severních pohraničních hor. Pokud jde o teploty, tak průměr maximálních lednových teplot je <math>-2 \text{ }^\circ\text{C}</math>, minim pak <math>-6 \text{ }^\circ\text{C}</math>; průměr maximálních červencových teplot je necelých <math>20 \text{ }^\circ\text{C}</math>, minim pak pouhých <math>10 \text{ }^\circ\text{C}</math>.</p>

Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<b>Severovýchodní cyklonální (NEc)</b>	<p>Tato situace nastává tehdy, když se výběžek azorské tlakové výše rozšíří přes britské ostrovy až nad jižní Skandinávii. Přináší k nám výrazně podprůměrné teploty – průměr maxim na vrcholu léta je mírně nad 20 °C; v zimě přináší tato situace velice nízké teploty. Průměr minimálních teplot druhé poloviny ledna je kolem -9 °C, průměr maximálních teplot kolem -4 °C.</p>
<b>Severovýchodní anticyklonální (NEa)</b> 	<p>Při této situaci islandská tlaková níže ustupuje dále ke Grónsku. Nad severním Skotskem a nad Norským a Severním mořem se usazuje mohutná tlaková výše. Na sklonku jara a na počátku léta se tato situace může vyskytovat poměrně často. Pro střední Evropu tato situace znamená málo srážek i oblačnosti. Teploty mohou mít v letních měsících v důsledku dlouhého v okrajovém svitu letní charakter, zato v zimní polovině roku se k nám v okrajovém proudění tlakové výše dostává přes Švédsko a Finsko arktický vzduch, který se může dostat až do Alp.</p>
<b>Východní cyklonální (Ec)</b>	<p>Vzhledem k tomu, že dodavatelem vláhy pro Evropu je Atlantský oceán, mohli bychom získat dojem, že větry přicházející od východu musejí být suché. Mnohdy tomu tak skutečně je, ale jindy může být východní proudění dokonce příčinou povodní. To se může vyskytnout právě při východních cyklonálních situacích, když se k nám oceánský vzduch dostává jaksí oklikou. Hlavním tlakovým útvarem při této situaci je středomořská tlaková níže. Teplý oceánský vzduch proniká napřed nad Středozemní moře a teprve potom se kolem této tlakové níže dostává přes Balkánský poloostrov a Alpy do střední Evropy. Nad severovýchodní Evropou se přitom udržuje tlaková výše, která je naopak příčinou studeného východního proudění. Na styku teplého a vlhkého vzduchu, který přichází ze Středomoří, se studeným vzduchem přicházejícím od severovýchodu, dochází k zintenzivnění frontální činnosti. Výrazný teplotní kontrast může být příčinou vydatných srážek. V návětrných oblastech Šumavy mohou vzniknout i povodně. Postup front směrem k západu bývá často velmi pomalý, což prodlužuje dobu trvání srážek. Mezi západními Čechami a východní Moravou můžeme zaznamenat i rozdíl teplot 15 °C. Pravděpodobnost výskytu východní cyklonální situace v létě je malá, a to proto, že příděl slunečního záření nad Středozemním mořem je značný a tlakovým nížím nad Itálií se přitom nedaří.</p>

Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<p><b>Východní anticyklonální (Ea)</b></p> 	<p>Podobně jako při východní cyklonální situaci i při té východní anticyklonální převládají severovýchodní a východní větry. Nad Středozemním mořem ale chybí hluboká tlaková níže jako zdroj vlhkého vzduchu, a proto jsou východní větry tentokrát většinou suché. To sice neznamená, že by se srážky nevyskytovaly vůbec, ale jejich intenzita je slabá, a to zvláště v zimě. V letním období může dojít k místním bouřkám. Charakter počasí nazýváme při této situaci kontinentální. To znamená, že v létě se projevuje vysokými teplotami, průměrná červencová maxima se pohybují kolem 28 °C a minima kolem 14 °C. Zimní počasí je naopak velmi studené. Průměr lednových maximálních teplot je v nížinách kolem -4 °C, průměr nočních minimálních teplot kolem -12 °C. Nad celou Evropou je při této situaci málo oblačnosti. Ve Středomoří se v letním období tvoří kupovitá bouřková oblačnost. U Baltského a Severního moře převládá slunečné počasí.</p>
<p><b>Jihovýchodní anticyklonální (SEa)</b></p> 	<p>Ráz počasí ve střední Evropě při této situaci určuje tlaková výše, která se přesunuje ze Skandinávie nad Ukrajinu, a která blokuje postup frontálních systémů od oceánu nad evropský kontinent. Vzduch nad střední Evropou proto zůstává poměrně suchý, v zimě je velmi studený, v létě zase vlivem slunečního záření, které zahřívá východní Evropu, velmi teplý. Lednové mrazy jsou v nížinách v průměru kolem -9 °C, při sněhové pokrývce ještě nižší. Také denní teploty zůstávají pod nulou, většinou kolem -3 °C. V červenci se průměr denních maxim pohybují kolem 29 °C a minim kolem 15 °C. Takové teploty lákají k vodním sportům, neboť teplý jihovýchodní vítr je zesílen nahuštěním proudnic mezi Alpami a Karpaty. V zimě naproti tomu může tato situace představovat riziko vzniku nehod v důsledku namrzání přechlazených vodních kapiček mlhy, nejčastěji pak za přispění vlhkého sněhu. Zvláště Českomoravská vrchovina je vznikem těchto námraz při tomto charakteru počasí nejčastěji sužována.</p>
<p><b>Jižní anticyklonální (Sa)</b></p>	<p>Při této situaci bývají teploty vyšší, než v případě SEa. Často se tato situace nazývá také fénovou, protože se v Alpách při ní vyskytuje fén, jehož vliv může sahát až nad naše území. Teplé jižní proudění mezi brázdou nízkého tlaku vzduchu nad Biskajským zálivem a Pyrenejským poloostrovem a tlakovou výší nad východní Evropou. Počasí, které toto proudění přináší, vítají milovníci horkého léta, v zimě je však nenáviděno lyžaři, neboť sníh rychle taje i na horách. Pokud je tato situace doprovázena jen slabým větrem, vznikají na podzim a v zimě teplotní inverze. Jejich vlivem dochází k výrazným místním rozdílům.</p>

Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<p><b>Jihozápadní anticyklonální (SWa)</b></p>	<p>Podobně jako jižní anticyklonální situace patří i jihozápadní anticyklonální situace k velmi teplým. Průměr maximálních denních teplot nejteplejšího měsíce roku července se blíží ke 30 °C a průměr nočních teplot se pohybuje kolem 14 °C. Nejnižší klesají teploty při této situaci v polovině února, a to denní maxima v průměru na 2 °C a noční minima v průměru na -1 °C. Hlavními tlakovými útvary jsou tlakové výše nad střední a východní Evropou a tlaková níže se středem jižně od Islandu. Mezi nimi proudí teplý vzduch od Azor přes britské ostrovy až do Skandinávie. Proto téměř v celé Evropě panují při této situaci v létě ideální podmínky pro dovolenou.</p>
<p><b>Jihozápadní cyklonální (SWc)</b></p> 	<p>Jihozápadní cyklonální situace se vyznačuje značnou proměnlivostí, neboť při ní může v teplém jihozápadním proudění postupovat studená fronta přes Alpy do střední Evropy. Ze všech zde uváděných situací představuje bezesporu asi tu nejsložitější a čeští meteorologové ji dále rozdělují na 3 základní podtypy.</p>
<p><b>Brázda nízkého tlaku ve střední Evropě (Bc)</b></p> 	<p>Typickým projevem počasí při výskytu brázdy nízkého tlaku je zataženo s občasným deštěm nebo zataženo s občasným sněžením. Je to tím, že se při této situaci nevyskytuje nikde v bezprostředním okolí oblast vyššího tlaku. Charakter počasí bude proto po celé Evropě obdobný. Nízké teploty lze očekávat převážně v západní Evropě, kam po zadní straně brázdy nízkého tlaku proniká studený oceánský vzduch od severozápadu, naopak ve východní Evropě budou, v důsledku jihozápadního proudění po přední straně brázdy, teploty vyšší. Ve střední Evropě ale dochází k teplotnímu kontrastu, který může být příčinou nebezpečných jevů, jako záplav v létě nebo sněhových kalamit v zimě. Průměrná červencová teplota je při této situaci u nás kolem 22 °C, průměrná minimální kolem 11 °C. V lednu je průměr maxim slabě pod nulou, průměr minim kolem -6 °C. Četnost brázd nízkého tlaku v průběhu roku ovlivňuje celkové roční úhrny srážek. Vyskytují-li se hodně v zimě, pak přinášejí časté sněžení. V ostatních částech roku pak plískanici a dešť. Ve výrazné brázdě nízkého tlaku se studené fronty často vlní, to znamená, že se v některých oblastech poněkud vracejí směrem k západu jako fronty teplé, což má za následek vznik frontální teplotní inverze.</p>

Povětrnostní situace	Charakter proudění a počasí ve střední Evropě
<p data-bbox="320 376 603 405"><b>Cyklóna ve střední Evropě (C)</b></p> 	<p data-bbox="810 376 1276 929">Hlavním tlakovým útvarem za této situace je tlaková níže se středem nad naší republikou nebo jejím bezprostředním okolí. To znamená, že v dosahu působnosti tlakové níže lze očekávat velkou oblačnost se srážkami, ale nad severními oblastmi Ruska a nad Skandinávií budou slunné dny. V letních měsících pak může nastat zdánlivě paradoxní situace, kdy při cestě na sever budete unikat chladnému a deštivému počasí. Proudění kolem cyklóny se středem ve střední Evropě určuje pohyb frontálních systémů, který probíhá od Islandu přes britské ostrovy nad Španělsko, dále přes Středozemní moře nad Itálii přes Balkánský poloostrov a odtud k severu do střední Evropy. Protože se k nám vzduch oceánského původu dostává přes teplé oblasti Středozemí, jsou průměrné teploty při této situaci v létě vyšší než u situace Bc. Průměr červencových maxim je 25 °C, průměr minim 14 °C. Naopak lednové průměry jsou poněkud nižší, maxima kolem -4 °C, minima kolem -12 °C. Teplotní rozptyl od těchto průměrných hodnot je ale poměrně značný.</p> <p data-bbox="810 936 1276 1041">Cyklóna ve střední Evropě se ale našťástí nevyskytuje příliš často. Kdyby tomu tak bylo, převládalo by u nás deštivé počasí s velkou oblačností a nadbytkem srážek, které by naše řeky nestačily pojmout.</p>
<p data-bbox="320 1048 635 1077"><b>Anticyklóna ve střední Evropě (A)</b></p> 	<p data-bbox="810 1048 1276 1731">Po delším chladném a deštivém počasí většinu z nás jistě potěší zpráva, že se na naše území rozšiřuje tlaková výše. Sestupné vzduchové proudy v oblasti tlakové výše jsou nevhodné pro vznik a rozvoj oblačnosti, a proto při této povětrnostní situaci, kdy střed tlakové výše leží v blízkosti našeho území, můžeme očekávat slunné a teplé počasí. Na první pohled by se mohlo zdát, že je anticyklóna ve střední Evropě ideálním povětrnostním typem. Pro letní dovolenou skutečně ano, ale přes to je spojena s řadou negativních jevů. Při dlouhém trvání této situace totiž nastává sucho, zvyšuje se výpar vody z půdy a rozsáhlé zemědělské oblasti mohou trpět nedostatkem vláhy. Zvláště pak v jarním období může tento stav výrazně negativně ovlivnit očekávanou úrodu. V létě pak tento charakter počasí vytváří příznivé podmínky pro vznik lesních požárů. Na podzim a v zimě pak tuto situaci můžeme považovat za velmi nepříznivou. Na horách sice bývá slunečno, ale v nížinách pod vrstvou nízké oblačnosti lze očekávat nepříjemné, chladné a mlhavé počasí s nárůstem koncentrací nebezpečných zplodin. Pokud jde o teploty, pak průměrné maximální červencové teploty jsou u nás kolem 27 °C, průměrné minimální kolem 12 °C, průměr lednových maxim kolem -3 °C a průměr minim kolem -8 °C.</p>

## **P-2 Informace o projektu 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření projevů a účinků ohrožujících událostí“ – Projekt SPREAD**

### **Úvod**

Výzkumný projekt 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření a účinků ohrožujících událostí“, pracovně označovaný jako SPREAD, měl za cíl ověřit model šíření prachových částic, resp. aerosolů, které mohou v případě mimořádné události plnit také roli nosičů toxických, radioaktivních či biologických látek. Většina modelovacích programů pracuje převážně s událostmi typu průmyslových havárií, ale v dnešním světě nelze vyloučit ani použití „špinavé bomby“ při teroristickém útoku. Cílem projektu je proto vytvořit matematický model pro rozptyl oblaku pevného aerosolu uvedeného do vzduchu jednorázovou iniciací. Unikátní součástí projektu SPREAD bylo ověřování navrženého modelu za reálných podmínek v terénu, což si vyžádalo provést rozsáhlé a svým způsobem mimořádné terénní testy.

Projekt, který byl řešen v letech 2005 až 2009, byl spolufinancován Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR. Řešiteli byly společnosti T-SOFT, a. s., Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. v. i., ISATech, s. r. o. a Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a. s. Dalšími spolupracujícími organizacemi byly například Český hydrometeorologický ústav, Ústav pro životní prostředí University Karlovy, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí, Ústav termomechaniky Akademie věd ČR, Pyrotechnický odbor Policejního Prezidia ČR, Policejní akademie ČR, Univerzita obrany v Brně a firma ZECON, s. r. o. Na terénních testech se aktivně podíleli také vojáci z 31. brigády radiací, chemické a biologické ochrany Armády ČR.

### **Příprava a provedení terénních testů**

#### **Základní požadavky na ověření validity modelovacích software**

Hlavním výstupem projektu byl ověřený matematický model ve formě funkčního softwaru. Tento modul byl postupně vyvíjen již od konce roku 2006, přičemž v letech 2007 a 2009 byl postupně ověřován a zpřesňován na základě výsledků získaných ze čtyř sérií terénních testů. Ověřování matematického modelu v terénu patří mezi nejnáročnější součásti vývoje každého modelovacího software. Ovšem ne každý software, který je k dispozici na trhu, je takto validován, což jejich uživatelé většinou ani nevědí. Výsledky poskytované těmito programy lze proto z mnoha důvodů považovat za velmi nejisté a pro účely přesného modelování následků mimořádné události je nelze použít. Z tohoto ohledu byl projekt SPREAD unikátní.

Prvním krokem při přípravě terénních testů je vždy výběr nevhodnější lokality, která musí splňovat několik kritérií. Tento úkol byl jedním z nejdůležitějších ale i nejtěž-

ších. Dalším krokem byl výběr stopovače, který by byl vhodný k provedení testů. Se stopovačem velmi úzce souvisí další krok, kterým je výběr trhaviny. Trhavina pro tento typ použití nesmí spékat vybraný stopovač a musí mít dostatečnou výbuchovou rychlost. Jelikož projekt uvažuje jako iniciační událost použití tzv. špinavé bomby, měla by být trhavina i relativně snadno dostupná. Všechny tyto aspekty byly při výběru zohledňovány.



*Obrázek P2-1: Letecký snímek lokality Ústí nad Labem a jejího nejbližšího okolí;  
Zdroj: [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)*



*Obrázek P2-2: Pohled na jihozápadní polovinu plochy letiště v Ústí nad Labem;  
Autor: Michaela Havlová.*



## Výběr lokality

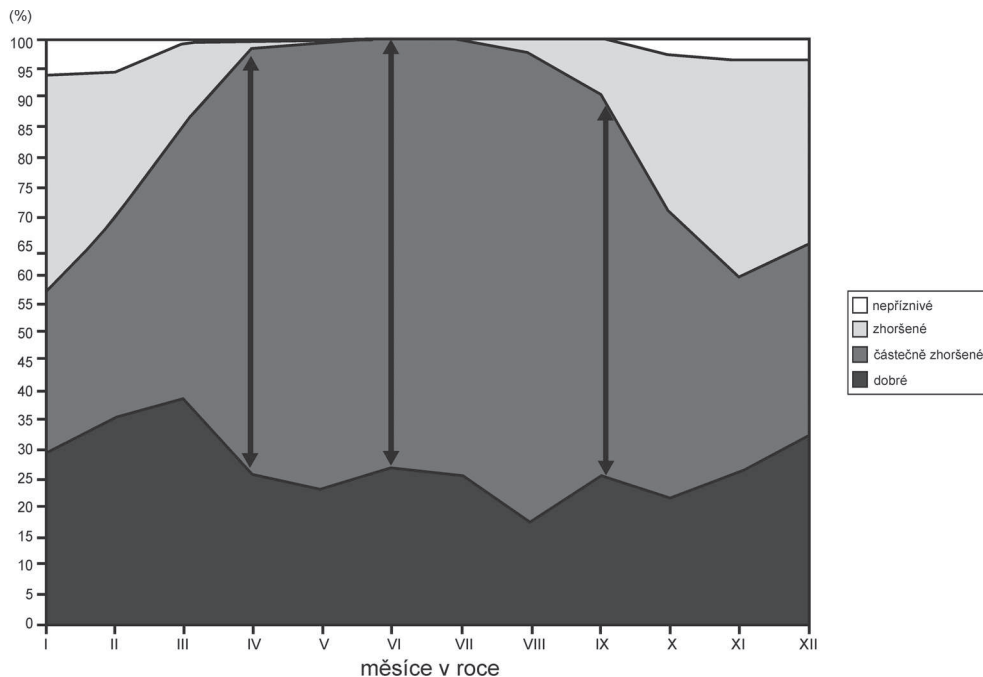
Již v roce 2006, rok před provedením hlavních testů, byly provedeny „předtesty“, které měly za cíl prověřit správnost navržené metodiky a identifikovat možné problémy, se kterými se lze v praxi setkat. Pro tento účel byla vybrána lokalita Tisá, kde se nachází vojenský výcvikový prostor 31. brigády chemické, biologické a radiační ochrany Armády České Republiky v Liberci. Polygon v lokalitě Tisá (okres Ústí nad Labem) představuje mírně svažitou plochu přibližně oválného tvaru uzavřenou po obvodu lesním porostem. Plocha polygonu byla pokryta travnatou vegetací, která však byla v době terénních testů posekána. Odstraněna byla také většina náletových dřevin, které by mohly svou přítomností ovlivnit charakter proudění vzduchu nad plochou polygonu. Provedení testů však ukázalo, že je tato lokalita zcela nevhodná, protože proudění vzduchu zde bylo výrazně ovlivňováno místní topografií, terénními překážkami a také velikostí a tvarem otevřené plochy. Výsledky ukázaly, že otevřená a rovná krajina s dostatečným volným prostorem pro rozmístění detekčních míst je pro tento typ terénních zkoušek naprosto nezbytná. Pro hlavní testy bylo tedy nutné vytipovat a zajistit jiný prostor, kde by bylo možné provádět báňskou činnost. Lokalitou pro hlavní testy se stalo polní letiště v Ústí nad Labem (viz obrázek P2-1 a P2-2), kde bylo Českým báňským úřadem povoleno provádět řízené výbuchy.

Hlavní testy byly provedeny v roce 2007 a to ve třech etapách – v dubnu, červnu a září, na něž pak navázaly ještě doplňující testy provedené v červnu 2008 a dubnu 2009. Kromě aspektů čistě odborných byly při výběru lokality zohledněny také její dostupnost, možnost zajištění technických a materiálních potřeb a finanční náročnost.

## Výběr termínů a klimatologické charakteristiky lokality

Výběr termínů vhodných pro provedení testů byl proveden na základě výsledků analýzy klimatických charakteristik lokality a analýzy rozptylových podmínek, které zpracoval Český hydrometeorologický ústav v Ústí nad Labem. Základními požadavky pro volbu termínů byly:

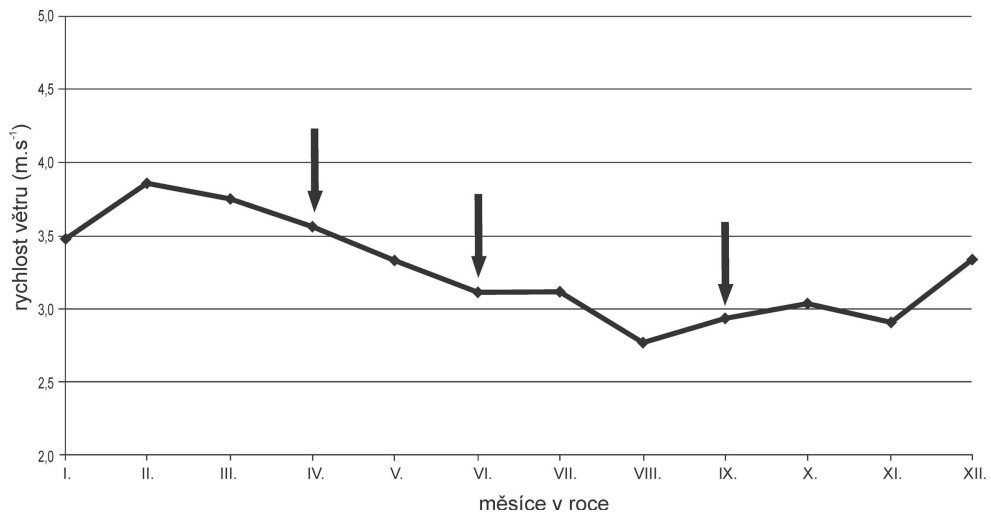
- **Různá roční období s absencí extrémních podmínek pro rozptyl aerosolu v ovzduší** – zcela vyloučena byla taková období, kdy se v lokalitě vyskytuje nejvíce dní s příliš dobrými rozptylovými podmínkami, resp. nepříznivými. Pro to, aby bylo možné ověřit rozptylový model pro tzv. nejpravděpodobnější scénář, bylo nutné testy provést nejlépe při částečně zhoršených podmínkách rozptylu, které statisticky nastávají nejčastěji (viz obrázek P2-3).
- **Období s rozdílnou insolací** – tento požadavek je důležitý z hlediska zohlednění vlivu energie slunečního záření dopadajícího na povrch. Připravovaný softwarový modul bude totiž uživateli nabízet možnost volby ročního období.
- **Období s nízkou mírou uplatnění termické konvekce** – výrazné zahřívání zemského povrchu vede ke vzniku výstupných proudů, které mohou výrazným způsobem negativně ovlivnit průběh měření. Z tohoto důvodu je nutné



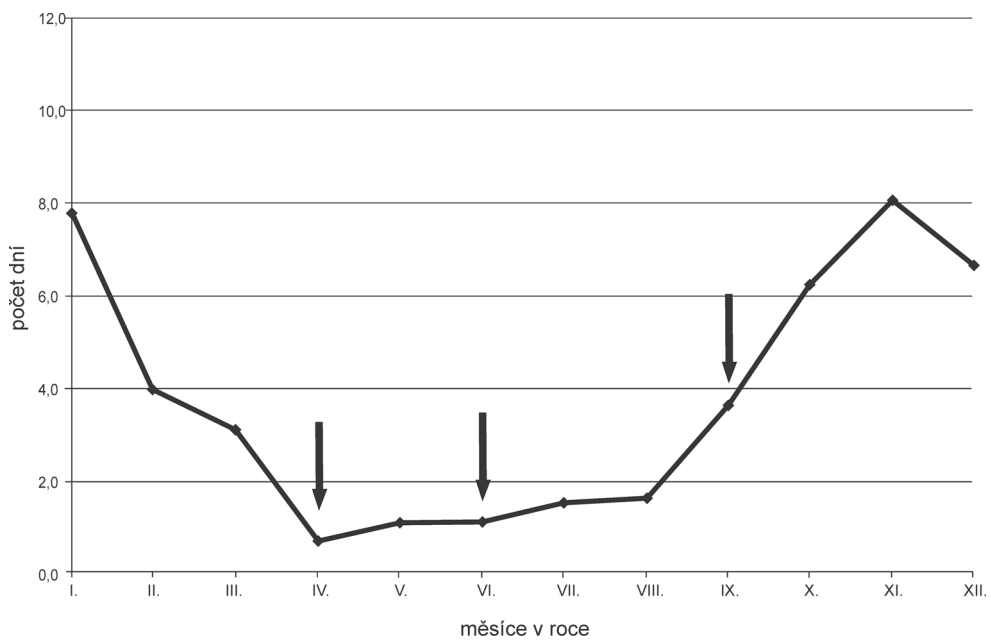
Obrázek P2-3: Charakteristika rozptylových podmínek během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.

testy provádět mimo nejteplejší měsíce roku a v denních hodinách, kdy ještě není zemský povrch příliš prohřátý (nejlépe v dopoledních hodinách).

- Období s malým počtem dnů s nárazovým větrem, větrem proměnlivého směru a s co nejnižší průměrnou rychlostí větru** – vítr je hlavní faktor, který se uplatňuje při rozptylu vzniklého oblaku v atmosféře (viz obrázek P2-4). Kolísání rychlosti větru a proměnlivost směru proudění je však faktor, který výraznou měrou ovlivní průběh experimentu. Díky této skutečnosti může být trajektorie postupu oblaku komplikovaná, což výrazně ztěžuje jak vyhodnocení výsledků, tak i jejich využitelnost pro validaci matematického aparátu, který je postaven na Suttonově modelu, jež uvažuje neměnné podmínky v proudění vzduchu. Nízká průměrná rychlost (cca do  $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je pak vhodná pro to, že za takových podmínek se oblak příliš nerozšiřuje do prostoru a koncentrace částic proto se vzdáleností od epicentra výbuchu klesá pomaleji. Tato skutečnost je důležitá pro pasivní detekci částic záchytem na terčících. Při vyšších rychlostech větru jsou terčíky také výrazněji obtékány vzduchem, což snižuje účinnost záchytu částic na jejich povrchu.
- Vysoká relativní četnost jihozápadního až západního proudění** – pro získání co možná nejlepších výsledků, je nutné, aby orientace sítě korelovala s převládajícím směrem větru v této lokalitě. Síť je proto orientována ve směru JZ-SV.



Obrázek P2-4: Průměrné rychlosti větru během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.



Obrázek P2-5: Počty dní s mlhou během roku v lokalitě letiště v Ústí nad Labem (šipky znázorňují vybrané termíny); Zdroj: studie ČHMÚ.

- **Období s nízkou pravděpodobností výskytu srážkové činnosti a mlh** – srážková činnost nebo zvýšená vlhkost vzduchu výraznou měrou ovlivní depozici částic, která však pro účely testů není zohledňována. Proto, aby nebyly výsledky zkreslovány výrazným úbytkem počtu částic tímto způsobem, je nutné provádět testy mimo období s největší četností srážek a výskytu mlh (viz obrázek P2-5).
- **Terén, kde je možné zajistit požadovanou výšku rostlinného pokryvu** (požadovaná hodnota koeficientu drsnosti povrchu  $z_0$ ) pro všechny testy. Pro statistické vyhodnocení úspěšných testů je nutné, aby nebyly při žádném z nich výrazněji měněny podmínky, vyjma podmínek atmosférických. Tento požadavek se vztahuje také na drsnost povrchu, která se výrazně uplatňuje při šíření oblaků těžších než vzduch.
- **Minimální časový odstup mezi jednotlivými testy** – nejen z důvodu průběžného vyhodnocení, ale také pro zajištění pokrytí jednotlivých ročních období s různými atmosférickými podmínkami, je vhodné, aby minimální časový odstup mezi jednotlivými sériemi testů byl alespoň 2 měsíce.

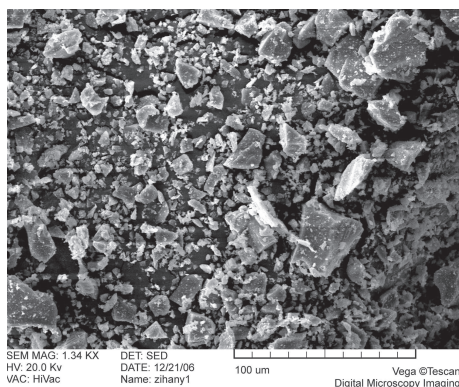
Tato výše uvedená kritéria jsou nejlépe splněna v měsících dubnu, červnu a září, což dokládají i výše uvedené obrázky P2-2 a P2-5 z povětrnostní studie zpracované Českým hydrometeorologickým ústavem. Ne všechny aspekty byly sice splněny zcela, nicméně ukázalo se, že tyto termíny představují optimální kompromis.

### Výběr stopovače

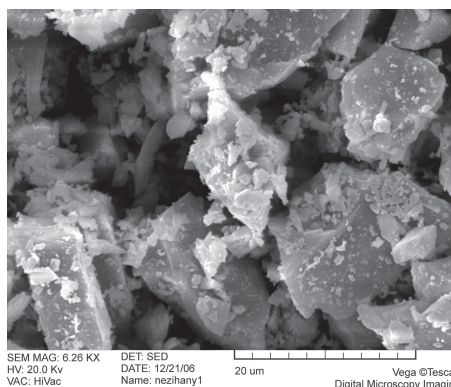
Výběr nosiče pro testy byl další velmi důležitou otázkou. Z analýz vyplynulo, že lidskému tělu bude působit nejvážnější problémy nosič, který je složen z velmi malých částic, které mohou snadno pronikat do lidského těla. Ideální velikost frakce dle vlivu na lidský organismus, bez ohledu na to, jakou látku nosič bude obsahovat, je od 2 do 10  $\mu\text{m}$ . Jedná se tedy o respirabilní frakci, jehož významná část může pronikat až do dosních cest dýchacích. Tento nosič kromě toho, že musí být velmi malý, musí být navíc snadno dostupný, snadno detekovatelný a nesmí při výbuchu měnit frakci. Z tohoto důvodu byl pro testy vybrán mikromletý sklářský písek z lokality Střeleč a také práškový mikromletý grafit. Z ekologických i praktických důvodů, jako je např. opakování testů v krátkém sledu za sebou, byl zvolen mikromletý sklářský písek obsahujícího 99,9 %  $\text{SiO}_2$  (CAS: 14808-60-7). Z hlediska mineralogicko-petrografického se jedná o písek vyrobený z pískovce o převažující frakci zrn 0,1 až 0,6 mm.

Pro praktické ověření spékavosti stopovače bylo za laboratorních podmínek provedeno žíhání pěti náhodně vybraných vzorků křemenného písku. Při stanovení podmínek žíhání bylo přihlédnuto ke skutečnosti, že při výbuchu by případně probíhalo suché slinování čistého křemene bez přítomnosti taveniny. Lze-li počítat s počáteční teplotou tání křemene kolem 1500 °C a s tím, že slinování nastává přibližně při 0,8 absolutní teploty tání křemene, byla stanovena teplota žíhání na 1200 °C. Působení tlaků se při této zkoušce neuvažovalo. Zkoumané vzorky byly pro tento experiment

volně nasypány na podložku a umístěny do žíhací pece. Vzorky byly žíhány při stanovené teplotě v časových intervalech 1 až 5 minut. Uvedený časový interval řádově převyšoval působení teplot při výbuchu. Při porovnání snímků před a po žíhání je zřejmé, že za atmosférického tlaku nemá teplota 1200 °C žádný vliv na změnu částic křemene. Nedocházelo k žádným pevným srůstům mezi částicemi a ani k patrným deformacím na povrchu částic (viz obrázky P2-6 a P2-7).



*Obrázek P2-6: Detail jednotlivých zrn písku před žíháním; Autor: Petr Dvořák.*



*Obrázek P2-7: Detail jednotlivých zrn písku po žíhání; Autor: Petr Dvořák.*

*Poznámka: rozlišení obou obrázků není totožné*

### Specifikace výbuchů

Prováděné testy měly kromě samotného uvádění jemně mletého křemene do vznosu a sledování jeho rozptylu v atmosféře také za cíl ověřit, zda má druh použité výbušné složky vliv na následný průběh rozptylu vzniklého oblaku. Pro tento účel byly proto specificky vybrány vhodné trhaviny, které se lišily ve sledovaných parametrech, především pak v detonační rychlosti. Tato veličina totiž určuje rychlost rozletu materiálu uváděného do vznosu, což může mít v konečném důsledku vliv na tvar vzniklého oblaku. Dalším parametrem, který bylo nutné při výběru vhodné trhaviny také zohlednit, bylo výbuchové teplo. Pro minimalizaci vzniku aglomerátů je nutné, aby bylo co nejnižší, tj. aby nedocházelo ke spékání částic a vytváření tak větších celků. Tato skutečnost by totiž výraznou měrou ovlivnila průběh testů, protože by tak došlo ke značnému úbytku množství materiálu, který by se v podobě oblaku šířil přes polygon, na kterém byly rozmístěny detekční body. Jelikož není snadné určit množství, které by tímto nežádoucím procesem bylo vyloučeno z rozptylu v atmosféře, potažmo hmotnost materiálu tvořícího vzniklý oblak, je zjevné, že tento parametr je značně důležitý.

Výběr výbušniny by měl zohledňovat také požadavky na bezpečnost práce. Z tohoto ohledu jsou nejvhodnější zejména trhaviny s nižší detonační rychlostí a nižším výbuchovým teplem. Vybrané charakteristiky nejpoužívanějších průmyslových trhavin jsou uvedeny v tabulce P2-1.

Tabulka P2-1: Vybrané charakteristiky nepoužívanějších průmyslových trhavin.

Název trhaviny	Druh trhaviny a její konzistence	Hustota nálože (g.cm <sup>-3</sup> )	Detonační rychlost (m.s <sup>-1</sup> )	Výbuchové teplo (kJ.kg <sup>-1</sup> )
DAP 1A	povrchová sypká	0,95	3 000	3 768
PERMONEX V 19	skalní sypká	1,0	4 800	4 086
PERMON EXTRA 18	skalní sypká	1,35	3 900	2 931
PERUNIT 20	skalní plastická	1,48	5 600	4 668
DANUBIT 1	skalní plastická	1,45	5 000	4 396
DANUBIT GEOFEX	speciální plastická	1,55	6 400	4 459
SEMTEX 1A	speciální plastická	1,4	7 300	4 980
SEMTEX P 30	speciální tvrdé desky	1,3	2 500	1 591
SEMTEX 10	speciální plastická	1,4	7 200	5 030
SYNTHESIT V 18	důlně bezpečná sypká	1,05	3 800	3 349
HARMONIT	důlně bezpečná poloplastická	1,1	1 900	2 093
VESUVIT TN	speciální sypká	1,7	2 050	3 050

Po provedené analýze výše uvedených vlastností byly pro provádění testů vybrány trhaviny: SEMTEX 1A, SEMTEX P 30, OSTRAVIT C a PERMON 10.

## Vlastní provedení testů

### Stanovení konstrukce výbušného systému

Pro základní pohled na sestavení nálože s ohledem na slinování je nutno zohlednit skutečnost s působením tlakového účinku na malých vzdálenostech (do 10 poloměru nálože), který je způsoben hlavně zplodinami výbuchu, ve větších vzdálenostech od nálože pak rázovou vlnou. Nutnost snížení tlakového efektu výbuchu na křemenný písek lze alespoň z části řešit zamezením vlastního kontaktu trhaviny s pískem. Vzdálenost písku od trhaviny může být zajištěna různými obaly (papírová krabice,

karton, měkký plast apod.) nebo i sypkou látkou jako je například chlorid sodný ve slabé vrstvě. Pro účely terénních testů byly využívány převážně kartony nebo polyethylen.

Celý výbušný systém byl tedy řešen jako vrstevnatá nálož, kdy trhavina byla oddělena od křemenného písku přepážkou s tím, že celý systém byl bez pevného obalu (viz obrázek P2-8). Důležitou součástí systému je také dostatečně masivní, pevná podložka, která umožní využít maximum energie vzniklé při explozi pro uvedení písku do vznosu. Pro tento účel byla použita dvou až třívrstvá litinová podložka (viz obrázek P2-9), která poměrně dobře odolávala výbuchu používaných náložek (podle typu trhaviny byly používány náložky o hmotnostech 0,5 kg až 3 kg), ačkoli se po výbuchu vždy zdeformovala středově centrovaným průhybem (viz obrázek P2-10).



*Obrázek P2-8: Výbušný systém připravený k explozi; Autor: Michaela Havlová.*



*Obrázek P2-9: Výbušný systém před umístěním křemenného písku; Autor: Michaela Havlová.*



*Obrázek P2-10: Epicentrum po provedeném výbuchu; Autor: Michaela Havlová.*

### **Návrh a konstrukce systému sběru dat**

Pro detekci mikromletého křemene, který byl uváděn do vznosu, byly zvoleny dvě metody. Aktivní metoda, která využívala měření pomocí série šesti laserových fotometrů DustTrak, a pasivní metoda, založená na záchytu částic na plastových destičkách opatřených grafitovými štítky kruhového profilu o ploše  $1\text{ cm}^2$  (viz obrázek P2-11). Pro měření pomocí grafitových terčů byla zkonstruována pravoúhlá síť o celkovém počtu 63 detekčních bodů, čímž byla pokryta celá požadovaná plocha o rozloze  $150 \times 450$  metrů. Detekční body byly rozmístěny v řadách ve vzdálenostech 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 a 450 metrů od epicentra a v každé řadě se nacházelo celkem 7 detekčních bodů ve vzájemném rozestupu 25 metrů (viz



*Obrázek P2-11: Pohled na pasivní detektor (detektor je po sejmutí plastového víčka připraven k expozici); Autor: Tomáš Vítek.*





*Obrázek P2-12: Vizualizace tvaru detekční sítě a rozmístění jednotlivých terčů, meteorologických stanic a epicentra výbuchu; Autor: Slavoj Zemánek.*



*Obrázek P2-13: Rozmístění aktivních detektorů DustTrak; Autor: Petr Skřehot.*

obrázek P2-12). Použitý typ sítě umožňoval poměrně velkou flexibilitu k aktuální povětrnostní situaci, kde určujícím faktorem byl směr větru. Síť tedy byla stacionární a podle potřeby se měnilo pouze umístění epicentra. Kontinuální detektory pak Dust-Trak pak byly umístěny uvnitř této sítě v různých konfiguracích (viz obrázek P-13). Všechny detektory byly umístěny ve výšce 170 cm nad zemí. Vyměření sítě v terénu bylo provedeno za pomoci GPS, takže přesnost lokace jednotlivých bodů činila 0,5 metru.

### **Operativní analýzy povětrnostní situace**

Operativní analýzy aktuální povětrnostní situace byly prováděny každý den před zahájením prací na polygonu. Analýza sestávala z prověření situace na letišti, pro-

vedení záznamu základních meteorologických informací, včetně pozorování stavu počasí s následnou diskuzí s profesionálním meteorologem z ČHMÚ. Pro operativní analýzu byly kromě místních dat využívány také aktuální informace z meteorologického serveru německé meteorologické služby Wetterzentrale. Analýza přízemní synoptické mapy a předpovědní mapy pro větrné pole však byla určena pouze pro prognózu vývoje počasí v rádech hodin (např. za účelem úpravy polohy epicentra pro testy v dalších dnech, výskyt nežádoucích povětrnostních jevů – např. bouřky, deště, nárazů větru apod.). Pro lokální předpověď určenou pro charakterizaci místních podmínek a určení optimálního času pro provádění testů v daném dni, však byly podstatné informace z místního pracoviště ČHMÚ.

Při operativních analýzách byl zjištěn také denní chod lokální cirkulace vzduchu, což byla informace důležitá pro správné načasování výbuchů. Dle místních podmínek i charakteru počasí v jednotlivých termínech (duben, červen a září) bylo možné testy provádět v dopoledních hodinách (cca od 8 do 13 hod) nebo vpolední (cca po 18 hod). Snahou bylo vyhnout se působení výraznější termické konvekce, která je pro měření přízemních koncentrací oblaku aerosolu nežádoucí.

### **Meteorologická měření**

Během testů bylo prováděno měření vybraných meteorologických veličin, které rozptyl oblaku ovlivňují. Pro měření byly použity tři mobilní automatické meteorologické stanice (viz obrázek P2-14) a jeden měřicí vůz chemického vojska značky Rover. Měření pomocí automatických stanic probíhalo ve třísekundových časových intervalech, měření pomocí vozu Rover ve třicetisekundových intervalech. Nejdůležitějšími veličinami byla rychlost větru, směr větru a teplota vzduchu.



*Obrázek P2-14: Mobilní automatická meteorologická stanice; Autor: Tomáš Vítek.*



*Obrázek P2-15: Pohled na hlavní linii s rozmístěnými tyčemi s fábory a automatickou meteorologickou stanicí; Autor: David Šátek.*

Pro určení směru větru na celé ploše polygonu byly používány výstražné fábory, které byly umístěny na všech tyčích hlavní (středové) linie (viz obrázek P2-15) a na okrajových tyčích v každé řadě. Tyto směrové ukazatele sloužily především pro stanovení okamžiku výbuchu, který bylo nutné stanovit ad hoc podle aktuální povětrnostní situace. Bylo-li větrné pole na celé ploše polygonu ustálené, pak bylo možno vydat pokyn k odpalu.

### **Snímání obrazu**

Při testech byly použity tři videokamery, které byly rozmístěny tak, aby bylo možno snímat postup oblaku z různých směrů. Následným vyhodnocením získaných výstupů lze určit velikost oblaku ve všech třech osách a dále pak půdorys dráhy jeho postupu.

Oproti videozáznamu poskytuje digitální fotografie výraznější detaily, avšak pro stanovení výšky oblaku v čase je využít nelze. V tomto ohledu posloužily především záznamy z kamer. Fotodokumentace byly také využity pro vzájemné srovnání různých tvarů oblaků bezprostředně po výbuchu (cca 1 až 2 sekundy). Jelikož je tvar oblaku závislý na počátečních energetických podmínkách, lze tuto informaci využít pro orientační určení typu použité výbušniny. Například na obrázku P2-16 jsou znázorněny dva převažující typy oblaků: a) „(polo)kulovitý“ a b) „kónický“. V prvním případě se jedná o oblak vzniklý při použití pomalé výbušniny Semtex 30 (2,5 kg), v druhém případě při použití rychlé výbušniny Permon 10 (3 kg).

### **Odhad velikosti a tvaru oblaku**

Odhad velikosti oblaku lze v praxi provádět rozborem videozáznamu a určením výšky srovnávacím stanovením. Pro tento účel byla využita kamera, před kterou

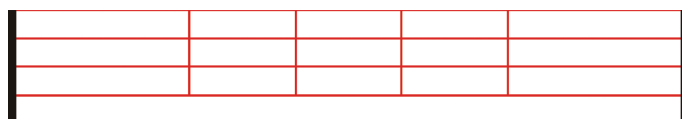


a)



b)

*Obrázek P2-16: Tvary oblaků cca 1 sekundu po výbuchu při použití různých výbušnin; Autor: Petr Skřehot.*



*Obrázek P2-17: Měřicí síť pro určování výšky oblaku.*



*Obrázek P2-18: Reálná podoba zaměřovací sítě na výstupu z videozáznamu; Autor: Slavoj Zemánek.*

byla umístěna síť z dostatečně tenkého, ale zároveň dostatečně reflexního materiálu. Výška oblaku pak byla určena pomocí jednoduchého trigonometrického výpočtu. Takto lze získat informaci i o šířce oblaku ve směru kolmém na dráhu jeho postupu.

Měřicí síť je možno vyrobit z motouzů napnutých mezi dvě zafixované tyče. V našem případě byl použit motouz oranžové barvy, který byl proti zelenému pozadí dostatečně viditelný. Důležité je, aby byla síť zkonstruována tak, aby kamera, snímala celé zorné pole, kde oblak pohyboval. Podoba zaměřovací sítě je znázorněna na obrázcích P2-17 a P2-18.

### **Organizace pracovních aktivit**

Jak již bylo uvedeno výše, úspěšné provedení testů záviselo na dokonalé přípravě a organizaci. Nedílnou součástí této fáze proto byla podrobná instruktáž všech účastníků testů, rozdělení funkcí a úkolů, smluvení signálů a způsobu komunikace a v neposlední řadě také proškolení z bezpečnosti práce (viz obrázek P2-19).

Každý test byl zakončen uzavřením pasivních detektorů, které muselo proběhnout rychle, aby byla minimalizována kontaminace detektorů požadovým prachem. K uzavírání však mohlo být přistoupeno až v okamžiku, kdy oblak aerosolu vzniklý výbuchem přešel přes celý polygon, anebo pokud došlo k jeho výstupu. Tento okamžik bylo nutné stanovit vizuálním pozorováním z řídicí věže (viz obrázek P2-20) odkud byl postup oblaku monitorován. Pomocí smluveného signálu byl následně vydán pokyn k uzavírání detektorů plastovými víčky (viz obrázek P2-21). Po vyklizení polygonu byly exponované detektory sejmuty z tyčí, rozříděny a odeslány k vyhodnocení (viz obrázek P2-22).



*Obrázek P2-19: Pracovní porada členů týmu před zahájením testů; Autor: Tomáš Vítek.*



*Obrázek P2-20: Pohled na řídicí stanoviště odkud bylo sledováno větrné pole na celé ploše polygonu a vydávány pokyny; Autor: David Šátek.*



*Obrázek P2-21: Plošné uzavírání pasivních detektorů; Autor: David Šátek.*



*Obrázek P2-22: Inventarizace a třídění sebraných pasivních detektorů; Autor: Michaela Havlová.*

## Vyhodnocení prováděných testů

### Určení fází rozptylu oblaku

Jak již bylo uvedeno výše, součástí terénních testů bylo také vizuální sledování rozptylu oblaku. Účelem bylo popsat chování oblaku po výbuchu, tj. jeho růst a následný rozptyl a určit základní fáze rozptylu. Tyto skutečnosti totiž podle dostupných zdrojů doposud nebyly řešeny, na rozdíl například od rozptylu oblaků z kontinuálních zdrojů. Získané výsledky významnou měrou pomohly zpřesnit navržený model, pro jehož vývoj bylo nutné znát velikost tzv. objemového zdroje jednorázové emise aerosolu. Tento objemový zdroj představuje oblak, který již dále neroste na základě impulsu uděleného jednotlivým částicím při samotném výbuchu. Kromě toho, načerpané poznatky také posloužily pro kvalitativní popis možného ohrožení osob po výbuchu špinavé bomby, neboť znalost chování takto vzniklého oblaku v čase je nezbytnou podmínkou pro definování efektivních způsobů ukrytí nebo evakuace.

Tvar oblaku bylo možné popsat po důkladné analýze videozáznamů, pro odhad jejich rozměrů však bylo potřeba použít matematického výpočtu. Kromě sítě vyrobené z reflexních motouzů umístěné před jednu z videokamer, byly pro výpočet využity také čtyřmetrové tyče, které byly rozmístěny na hlavní linii detekční sítě. Na těchto tyčích byly v předem definovaných výškách umístěny fábory, které pro pozorování z dálky posloužily jako vertikální měřítko. Určení výšky oblaku pak bylo prováděno na základě rozboru videozáznamu pořízeného z kamery, před níž byla umístěna síť z motouzů, a z kamery, která snímala rozptyl oblaku z profilu, tj. kolmo na hlavní linii tyčí s detektory. Tímto způsobem se podařilo získat relevantní informace o rozvoji oblaku v čase. Pro svou složitost a časovou náročnost bylo stanovení výšky oblaku provedeno jen pro tzv. typické povětrnostní situace. Bylo totiž vyzorováno, že růst oblaku a jeho rozptyl je výrazně závislý na teplotní stabilitě atmosféry, takže lze přistoupit ke zjednodušení, které sestává z detailní analýzy jen vybraných testů provedených za různých podmínek:

- při stabilním až inverzním teplotním zvrstvení atmosféry (třída stability E, F),
- při podmíněčně instabilním teplotním zvrstvení atmosféry (třída stability D),
- při mírně instabilním teplotním zvrstvení atmosféry (třída stability C),
- při instabilním teplotním zvrstvení atmosféry (třída stability A, B).

Ačkoli byly v roce 2007 prováděny celkem tři série terénních testů (duben, červen a září), optimální podmínky pro tato stanovení panovaly při dubnových testech, kdy se průběžně vyskytly všechny zmíněné stabilitní podmínky. To bylo výhodou, protože bylo možné použít stejného rozmístění měřicí techniky a také výška pokosu trávníku byla při všech těchto testech stejná (koeficient drsnosti povrchu  $z_0$  činil 0,45 cm). Stanovení rozptylových fází tak bylo maximálně objektivizováno.

Určení třídy stability atmosféry podle vnějších podmínek bylo provedeno pomocí Pasquillovy typizace zkonfrontované s aktuálním měřením vybraných povětrnostních prvků a doplněné o konzultaci s přítomným meteorologem ČHMÚ. Podmínky pro vybrané testy shrnuje tabulka P2-2.

Na základě provedené analýzy videozáznamů testů lze chování oblaku v čase obecně definovat následovně:

Po výbuchu oblak nebyl vždy kompaktní a bylo možné pozorovat několik oblačných laloků způsobených patrně rozletem aglomerátů či fragmentů. Po cca 6 vteřinách se oblak již dále nerozšiřoval do prostoru vlivem počátečního impulsu a nejvyšší partie začaly klesat k zemi. Při klesavé fázi se oblak postupně rozšiřoval při zemi do stran a začal se pohybovat ve směru proudění větru. I přes to si ale hlavní část oblaku udržovala zpravidla tvar polokoule, ze které zespod jakoby „vytékal“ materiál do stran. V případě, že panuje indiferentní nebo instabilní zvrstvení, začne vrcholová část oblaku po několika vteřinách vzlínat směrem vzhůru (čím instabilnější podmínky, tím je tato doba kratší). Tvar oblaku se tak začne rozšiřovat podél kužele, přičemž spodní partie oblaku se díky tření o povrch při svém pohybu „opožďují“ oproti svrchním partiím. Dále se oblak nařezával vzduchem vstupujícím do něj turbulencí a rozptyluje se podle panujících povětrnostních podmínek.

Test DUBEN\_3: Již po první fázi se začal oblak rozšiřovat podél kužele, takže klesavá fáze se neuplatnila. Tuto skutečnost lze vysvětlit pouze tak, že se uplatnil vliv proudění (rychlost větru byla cca  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Test DUBEN\_4: U tohoto testu byla výrazná fáze poklesu. Opět panovalo téměř bezvětří, takže oblak byl více méně kompaktní. První fáze (fáze růstu oblaku, resp. fáze zastavení rozšiřování vlivem počátečního impulsu) trvala v tomto případě 11 sekund. Oblak se výrazněji rozšiřoval do stran, takže po 60 sekundách vytvořil jakýsi plochý koláč s neohrazenými horními partiemi. Největší množství materiálu v tomto útvaru bylo možno pozorovat do výšky cca 4 až 5 metrů. Rychlost postupu oblaku byla cca  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pozitivně vzlínat začal oblak až po 6,5 minutách, tj. ve vzdálenosti čela oblaku 160 metrů od epicentra.

Test DUBEN\_6: Po 5 vteřinách od okamžiku výbuchu přestal oblak růst vlivem počátečního impulsu a začal se rozptylovat ve směru proudění, kde se rozšiřoval podél kužele. Rychlost pohybu oblaku činila  $1,5$  až  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po 80 vteřinách od výbuchu se již začala uplatňovat konvekce, resp. oblak nabral výstupný proud, který jej zcela rozptýlil ve výšce (to nastalo cca ve vzdálenosti 150 metrů od epicentra).

### **Vyhodnocení expozice terčů**

Po sběru exponovaných terčů bylo nutné vyhodnotit, kolik částic aerosolu se na pasivních detektorech během expozice (tj. během průchodu oblaku detekčním polem) deponovalo. Vyhodnocení depozice bylo provedeno v laboratořích, kde jednotlivé



Tabulka P2-2: Podmínky během testů série DUBEN vybraných pro stanovení rozptylových fází oblaku aerosolu.

Označení testu	Datum/čas exploze	Rychlost větru ve 2 metrech	Třída stability atmosféry	Popis povětrnostní situace
DUBEN_3	25.4.2007 11:42:38	2,5 m.s <sup>-1</sup>	C	V noci ubývala oblačnost, zesláblo proudění a vytvořily se tak podmínky pro radiální prochlazování zemského povrchu a následný vznik radiální přízemní teplotní inverze. Po východu slunce se stala radiální a tepelná bilance zemského povrchu kladnou a původní přízemní inverze se transformovala na výškovou s postupně se zvyšující spodní hranicí. K zániku radiální teplotní inverze došlo v době mezi 9. a 10. hodinou dopoledne (časy jsou uvedeny v SELČ). Poté převládalo polojasné počasí, zpočátku s indiferentním, postupně s instabilním vertikálním teplotním zvrstvením. Proudění bylo v ranních hodinách v přízemní vrstvě jen slabé (do 2 m.s <sup>-1</sup> ), s proměnlivým směrem určeným místními podmínkami. Po rozpuštění teplotní inverze převládalo jižní až jihovýchodní proudění s rychlostí 3 až 6 m.s <sup>-1</sup> .
DUBEN_4	26.4.2007 8:00:15	0,5 m.s <sup>-1</sup>	E	V noci se při malé oblačnosti a slabém proudění vytvořila nejprve přízemní radiální teplotní inverze, která se po východu slunce transformovala na výškovou se stoupající spodní hranicí. Po 10. hodině už teplotní inverze zanikla a teplotní zvrstvení bylo instabilní. Proudění v přízemní vrstvě bylo v ranních hodinách jen slabé (do 2 m.s <sup>-1</sup> ), s proměnlivým směrem daným místními podmínkami. Po rozpuštění inverze převládalo jihovýchodní proudění, rychlosti dosahovaly na stanicích v regionu hodnot mezi 3 až 7 m.s <sup>-1</sup> .
DUBEN_6	26.4.2007 11:06:05	2 m.s <sup>-1</sup>	A	

Poznámka: Pro testy byly použity trhaviny Semtex, Ostravit a Permon o celkové hmotnosti náložky 0,5 až 3 kg.

plastové vzorkovnice (typ Micro Mount) s grafitovými terčíky byly vizuálně kontrolovány v binokulárním stereoskopickém mikroskopu (Kruss – Optronic system, Hamburg) s vrchním osvětlením (5500 K) a v UV světle (366 nm a 254 nm). Tímto způsobem se docílilo lepšího vyniknutí některých druhů především biologických kontaminací, jakými byly například pylová zrna, hmyz apod. Následně bylo provedeno planimetrické vyhodnocení, které bylo provedeno vždy na třech vybraných reprezentativních místech každého terčíku (v místě, kde bylo minimální poškození vzorku a minimum nežádoucích kontaminací). Plocha, na níž byla planimetrie aplikována, byla o velikosti 1,5 mm<sup>2</sup>. Výsledky z jednotlivých sčítání byly následně zprůměrnovány a přepočítány na jednotkovou plochu 1 cm<sup>2</sup>.

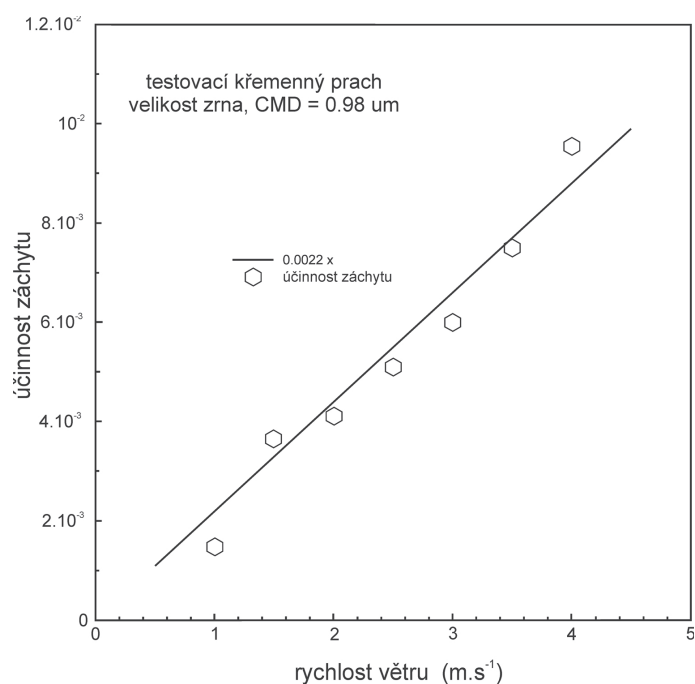
Bodová data získaná planimetrickým vyhodnocení byla dále zpracována pomocí vybraných metod geostatistiky. Základem tohoto vyhodnocování je teorie prostorově závislé proměnné, což je veličina, jejíž hodnoty závisejí na poloze bodů, v nichž byly stanoveny, v prostoru – v našem případě dvourozměrném. Jako optimální metoda se pro naše účely ukázala metoda odhadu – kriging. Tato metoda je založena na interpolaci váženého průměru hodnot okolních bodů, kdy se váhy jednotlivých hodnot určují na základě variogramu. Hlavní výhodou krigingu, oproti běžné interpolaci, je kromě zahrnutí většího počtu hodnot do výpočtu také možnost určení odhadu rozptylu vypočtené hodnoty. Postup při analýze bodových hodnot koncentrací byl následující:

- provedení popisné statistiky,
- sestrojení histogramu,
- analýza extrémů a jejich vyloučení,
- sestrojení variogramu,
- provedení krigingu s uvážením příslušného variogramu,
- vynesení výsledků do grafické podoby s průmětem na detekční síť

Takto získané výsledky prezentovaly informaci o distribuci deponovaných částic vyjádřenou pomocí izoploch, tj. míst se stejnou plošnou koncentrací částic na 1 cm<sup>2</sup> a to podél celé plochy detekční sítě (150 × 400 metrů). Tento výsledek sice poskytuje názornou informaci o tom, kolik aerosolu se po výbuchu zachytilo na sledované ploše, ale nevypovídá nic o dosazích jednotlivých objemových koncentracích v ovzduší od epicentra výbuchu ve směru vanutí větru. Během testů byly sice pro kontinuální měření koncentrací aerosolu v ovzduší (v mg.m<sup>-3</sup>) použity laserové fotometry Dust-Trak, avšak výsledky z nich získané poskytovaly informaci o změně koncentrace částic PM<sub>2,5</sub> v čase pouze v bodě umístění tohoto měřicího zařízení. Jejich výsledky bylo tedy možné použít pouze jako ukazatele absolutních hodnot maximálních koncentrací v daných vzdálenostech od epicentra (v závislosti na geometrii rozmístění, která se průběžně měnila za účelem získání co nejširšího počtu relevantních výsledků).

Získat z distribuce plošných koncentrací údaje o koncentraci částic aerosolu v jednotkovém objemu vzduchu však je možné, pakliže je pro danou rychlost větru známa účinnost záchytu částic aerosolu dané velikostní frakce na použitých detektorech. Tato koncentrace však představuje pouze průměrnou, nikoli maximální, koncentraci, protože je vypočítána z celkového počtu částic deponovaných na ploše terčíku po dobu průchodu oblaku daným místem.

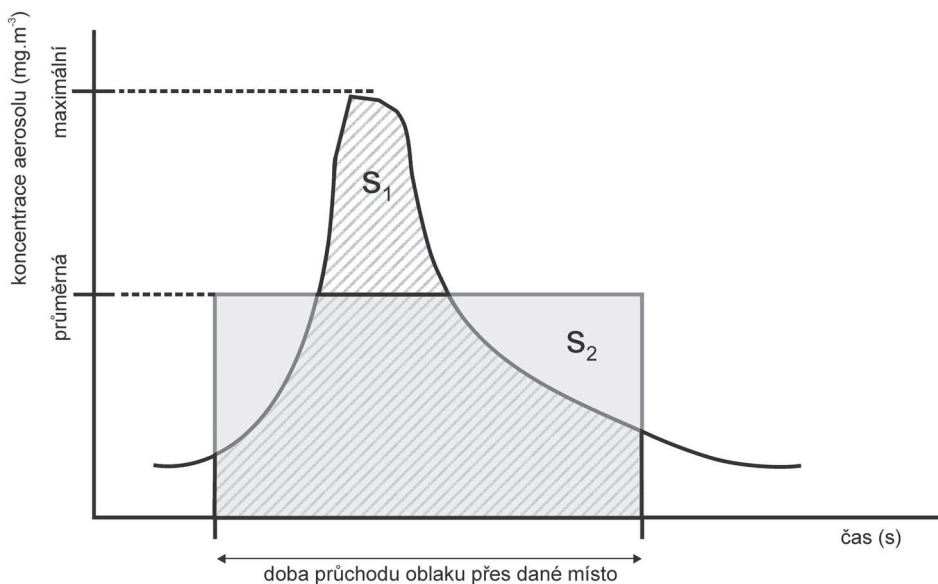
Určit účinnost záchytu ale bylo možné pouze na základě měření ve větrném tunelu v laboratoři. Příslušná měření, která si vyžádala velké množství opakování a stanovování na celkem 90ti experimentálních detektorech osazených krabičkami s terčíky (tj. konstrukčně stejné detektory jako v případě terénních testů), proběhla v Ústavu pro životní prostředí Univerzity Karlovy v Praze. Pro měření změny velikostní distribuce počtu částic v uzavřeném okruhu větrného tunelu byl použit aerodynamický spektrometr částic (model APS 3321, TSI) s integrační dobou měření pro každou velikostní frakci 6 sekund. Experimentální částice byly do tunelu injektovány z generátoru aerosolu AGK 2000 (Palas GmbH). Každé stanovení bylo prováděno po dobu 30 minut, takže celkový počet velikostních distribucí činil kolem 300 pro každý jednotlivý experiment.



Obrázek P2-23: Závislost koeficientu účinnosti záchytu na pasivní dozimetr na rychlosti proudění.

Výsledek z těchto experimentů pak shrnuje obrázek P2-23, který uvádí účinnost záchytu částic aerosolu (collection efficiency) pro rychlosti větru od 0,5 do 5 m.s<sup>-1</sup> při velikosti částic 0,98 μm (což odpovídá mediánu velikosti částic početní distribuce (CMD) prášku z mikromletého křemene použitého při terénních testech) a za podmínky vanutí větru kolmo na plochu terčíku. Z obrázku je patrné, že účinnost záchytu je velmi malá – pohybuje se v řádech 10<sup>-3</sup> (pro rychlost větru 1 m.s<sup>-1</sup>) až 10<sup>-2</sup> (pro rychlost větru 4 m.s<sup>-1</sup>), což znamená, že pouze cca každá stá až tisíce částice pohybující se ve válci o ploše odpovídající ploše terčíku a kolmé na terčík, se na něm zachytí. Z obrázku P2-23 je také patrné, že podíl zachyceného aerosolu s rostoucí rychlostí větru roste, ale ani při rychlosti větru 5 m.s<sup>-1</sup> nedosahuje ani 2%. Zbylých 98 % částic tak terčík „obečou“ v turbulentním proudění, které vzniká kolem tyče, na které je detektor s terčíkem umístěn.

Účinnost záchytu je v reálné atmosféře závislá také na směru proudění, pod kterým částice k detektoru přicházejí. Proto bylo nutné pro každý terénní test, resp. příslušnou rychlost větru, hodnotu účinnosti záchytu odečtenou ze závislosti uvedené na obrázku P2-23 ještě vynásobit hodnotou sin( $\alpha$ ), kde  $\alpha$  je úhel, pod kterým vzduch k detektoru proudil (kolmo na plochu detektoru = 90°, podélně = 0°). Uvedeným postupem pak mohla být stanovena průměrná koncentrace aerosolu v ovzduší, která představuje hodnotu koncentrace odpovídající stejné expozici během průchodu oblaku nad daným místem jako v případě reálného průběhu koncentrace [tj. plocha pod píkem ( $S_1$ ) je shodná s plochou obdélníku ( $S_2$ )] (viz obrázek P2-24).

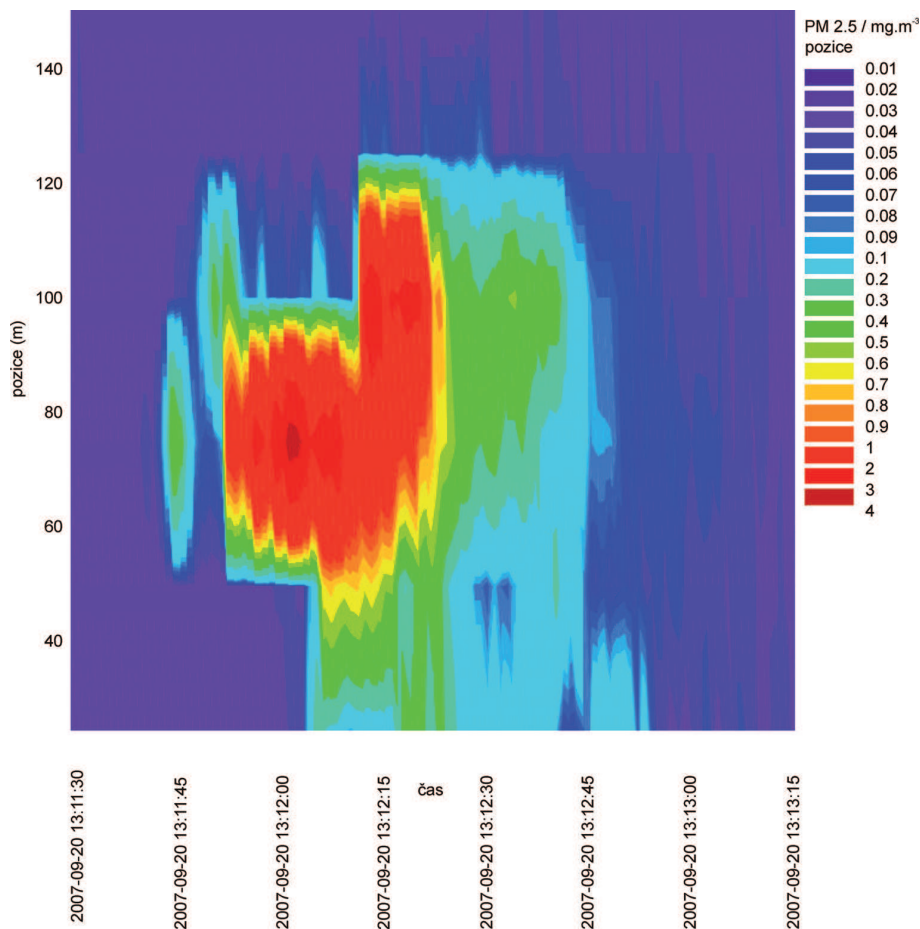


Obrázek P2-24: Vztah mezi průměrnou koncentrací (zašeděná oblast obdélníkového tvaru) a reálným průběhem koncentrace v čase (šrafovaná oblast pod křivkou) během průchodu oblaku nad daným místem.

Základem pro vyhodnocení vybraných testů, které byly hodnoceny jako dobré (jednalo se celkem o 7 testů z celkově provedených 18), se tedy stal základní výstup z krigingu aplikovaného na výsledky planimetrického stanovení počtu částic na jednotlivých detektorech. Tento grafický výstup, který uvádí distribuci celkové depozice částic aerosolu v počtu částic na  $1 \text{ cm}^2$ , je uveden na obrázku P2-24 (jedná se o test ZÁŘÍ\_6). Jak bylo zmíněno výše, tento výstup sice poměrně dobře vykresluje „stopu oblaku“ ve výšce 1,7 metru (výška umístění detektorů), ale nevyovídá nic o koncentracích, které bylo v jednotlivých místech detekční sítě možné naměřit. Proto byly výsledky z planimetrického stanovení přepočítány za využití experimentálně stanovených koeficientů účinnosti záchytu pro příslušné povětrnostní podmínky panující během jednotlivých testů (viz výše) a takto získané hodnoty pak byly opět za pomoci krigingu vyneseny do grafického zobrazení. Tímto způsobem byly získány výstupy v podobě průměrné koncentrace částic aerosolu, které byly v ovzduší během přechodu oblaku aerosolu, v jednotkách počtu částic na  $1 \text{ cm}^3$ . Při zohlednění hustoty použitého mikromletého křemene ( $\text{SiO}_2$ ) a jednotkového objemu částice o průměru  $0,98 \text{ }\mu\text{m}$ , tj. částice z nejpočetnější velikostní frakce (potvrzeno měřením Ústavu pro životní prostředí UK), bylo možné vypočítat průměrné koncentrace aerosolu během přechodu oblaku v  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , které byly opět za pomoci krigingu vyneseny do grafického zobrazení. Takto vyhodnocená data z vybraných testů v podstatě představují stěžejní výsledky terénních testů, které poskytují informaci, která je využitelná v praxi, neboť z ní lze usuzovat i na dávky, které mohou obdržet exponované osoby a tedy na ohrožení obyvatelstva při emisi nebezpečných aerosolů.

### Výpočet profilu koncentrace aerosolu v čase

Za využití speciálního software byly výsledky z kontinuálního měření koncentrace aerosolu z fotometrů DustTrak pro tři vybrané testy (DUBEN\_5, ZÁŘÍ\_2, ZÁŘÍ\_6) dále využity pro výpočet profilu koncentrace aerosolu v čase. Tento složitý výpočet byl založen na interpolaci hodnot koncentrací aerosolu  $\text{PM}_{2,5}$  naměřených jednotlivými fotometry v týchž časových okamžicích (přičemž integrační doba fotometrů činila 1 sekundu) během přechodu oblaku přes jednotlivé fotometry, které byly uspořádány v linii. Výsledky výpočtu byly pak také vyneseny do grafického zobrazení (viz obrázek P2-25), kde na ose  $x$  je vynášen čas (v tomto případě v SELČ), na ose  $y$  vzdálenost dle kót detekční sítě a jednotlivé barevné odstíny uvnitř grafu pak představují různé koncentrace podle škály uvedené vpravo. Toto vyobrazení tedy znázorňuje, jaké koncentrace aerosolu v  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se vyskytovaly v průběhu času podél linie, na které byly umístěny fotometry DustTrak, přičemž v případě obrázku P2-25 se jedná o příčnou linii nacházející se ve vzdálenosti 100 metrů od epicentra výbuchu (jedná se konkrétně o test ZÁŘÍ\_6). Dá se říci, že toto vyobrazení v sobě zahrnuje všechny čtyři rozměry časoprostoru současně – tři rozměry prostoru ( $x = 100 \text{ m}$  (vzdálenost od epicentra výbuchu – umístění linie fotometrů);  $y = 20 \text{ m}$  až  $150 \text{ m}$  (pozice na linii s rozmístěnými fotometry);  $z = 1,7 \text{ m}$  (výška fotometru nad zemí)) a rozměr času (běžícího od okamžiku výbuchu do ukončení měření).



Obrázek P2-25: Profil koncentrace aerosolu v čase v linii vzdálené 100 metrů od epicentra výbuchu pro test ZÁŘÍ\_6.

Ačkoli se jedná o výstup, jehož interpretace je poměrně náročná, jeho praktický význam je značný. Poskytuje totiž informaci, jak moc se hodnota průměrné koncentrace aerosolu, tak jak jsme ji vypočítali na základě planimetrického stanovení a následného krigingu, liší od maximální hodnoty absolutní koncentrace, která se vyskytla v daném místě v průběhu průchodu oblaku. Výstup kromě toho také umožňuje získat představu o tom, jak byl oblač vnitřně strukturován – například, zda se v něm maximální koncentrace aerosolu vyskytovaly na čele či uprostřed oblaku, anebo zda měl více „hustších“ či „řidších“ míst a kde. Pro již zmiňovaný test ZÁŘÍ\_6, jehož vyhodnocení je uvedeno na obrázku P2-25, pak lze z výsledku vyčíst, že ačkoli v linii vzdálené 100 metrů od epicentra výbuchu, kde byly fotometry umístěny, byla nejvyšší hodnota průměrné koncentrace částic aerosolu cca  $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ , ale absolutní koncentrace aerosolu zde dosahovaly až hodnoty  $4 \text{ mg.m}^{-3}$ , byly tedy  $8\times$  vyšší.

Maximální koncentrace bylo dosaženo 107 sekund od výbuchu. Čelo oblaku bylo ostře ohraničené, nejhustší část oblaku s koncentracemi nad  $1 \text{ mg.m}^{-3}$  měla zpočátku šířku 12 metrů a postupně se oblak rozšiřoval a zužoval, což svědčí o jeho kompaktnosti a vypovídá o oválném profilu. Postupně se oblak opět prudce rozšířil, což je důkaz o druhé „husté části“ oblaku, ve které koncentrace převyšovaly hodnotu  $1 \text{ mg.m}^{-3}$ . Rozměr oblaku v ose  $y$ , tedy jeho šířka zde dosahovala maximálně cca 60 metrů. Také tál této druhé „husté části“ oblaku byl poměrně ostře ohraničen, avšak nižší koncentrace aerosolu, od 0,1 do  $1 \text{ mg.m}^{-3}$ , se zde vyskytovaly ještě dalších cca 35 sekund, z čehož lze usoudit, že se oblak v horizontální rovině značně protáhl díky tření jeho základny o zemský povrch. Z vypočtených časových intervalů lze při vynásobení hodnotou rychlosti větru určit také přibližný rozměr oblaku podél osy  $x$ , a to pro časový okamžik, kdy touto linií procházel tál oblaku. Pro tento výpočet je ale nutné vzít v úvahu fakt, že se část oblaku přiléhající k zemskému povrchu (do cca 5 metrů výšky) nepohybuje stejnou rychlostí jako okolní proudění vzduchu, ale pouze rychlostí odpovídající cca 0,8 násobku rychlosti větru (tato hodnota byla určena odborným odhadem provedeným z videozáznamů). Tedy v případě uváděného testu ZÁŘÍ.6 činil rozměr oblaku (zahrnující části s koncentracemi aerosolu vyššími než  $0,1 \text{ mg.m}^{-3}$ ) v čase 150 sekund od výbuchu (tj.  $107 \text{ s} + 53 \text{ s}$ ) přibližně 64 metrů – numerický výpočet je:  $53 \text{ (s)} \times 1,5 \text{ (m.s}^{-1}) \times 0,8 \approx 64 \text{ metrů}$ .

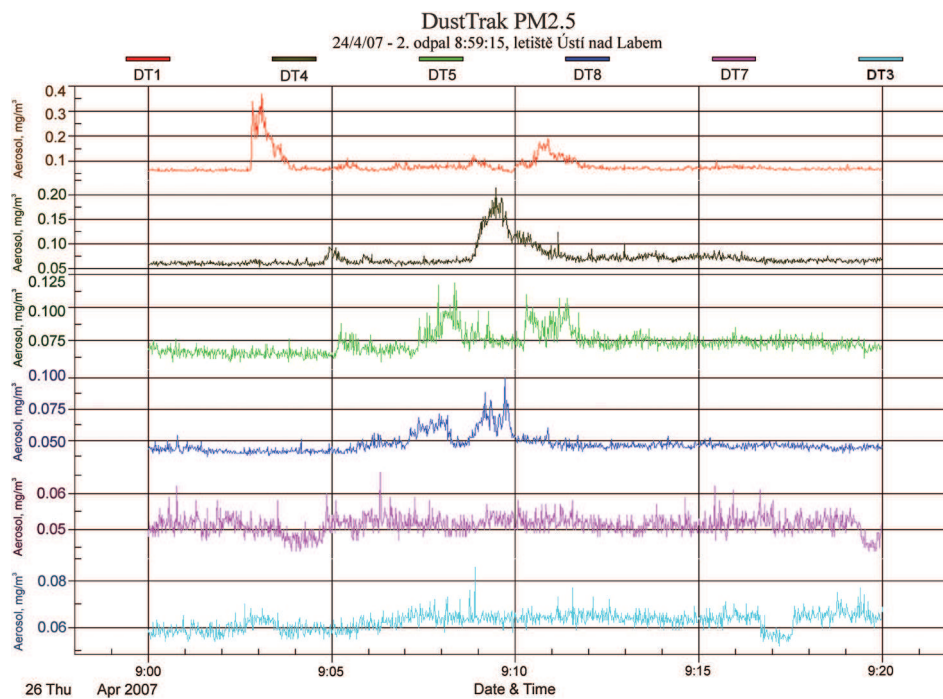
## Závěr

Tato příloha se pokusila představit způsob řešení a výsledky terénních testů projektu 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření ohrožujících událostí – SPREAD“. Smotné provádění terénních testů nebylo zdaleka jednoduché a řešitelský tým se musel potýkat s mnoha praktickými i teoretickými obtížemi, které provázejí každý projekt, jehož těžištěm jsou experimenty prováděné v terénu. Ovšem jsou to právě terénní testy, které lze označit za nejzajímavější část řešení. Ty byly provedeny postupně v celkem pěti sériích, z nichž tři zahrnovaly provedení experimentů zaměřených na studium rozptylu oblaků aerosolu a zjištění dosahu referenčních koncentrací.

Jedním z výstupů terénních testů je podání detailního popisu způsobu rozptylu oblaků aerosolu vzniklých jednorázovou emisí (výbuchem) do reálné atmosféry. Zajímavostí je, že se dle dostupných odborných prací této problematice v tomto pojetí a šíři doposud nikdo ve světě nevěnoval. Výsledky testů umožní validovat navržený rozptylový model, jehož softwarová podoba bude sloužit jako rychlý vyhodnocovací nástroj hasičům, záchranářům, odborníkům z praxe i úředníkům zodpovědným za havarijní plánování.

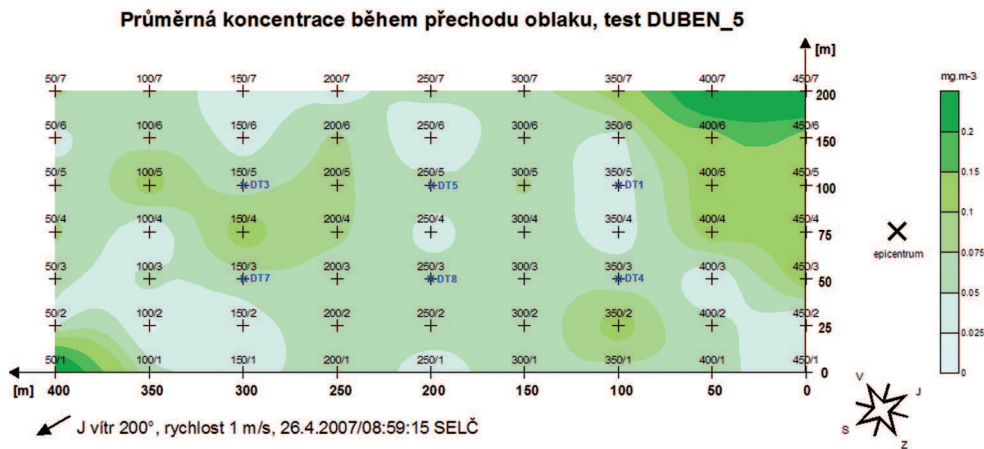
Při uvážení všech výše uvedených skutečností lze konstatovat, že projekt splnil svůj cíl, neboť nejenže byly úspěšně řešeny jeho jednotlivé etapy, ale především proto, že přinesl řadu unikátních (původně neočekávaných) zkušeností, poznatků a informací, které postupně jistě naleznou uplatnění v různých oborech i mimo bezpečnostní inženýrství či krizové řízení.

### P-3 Šíření částic aerosolu po výbuchu náložky špinavé bomby

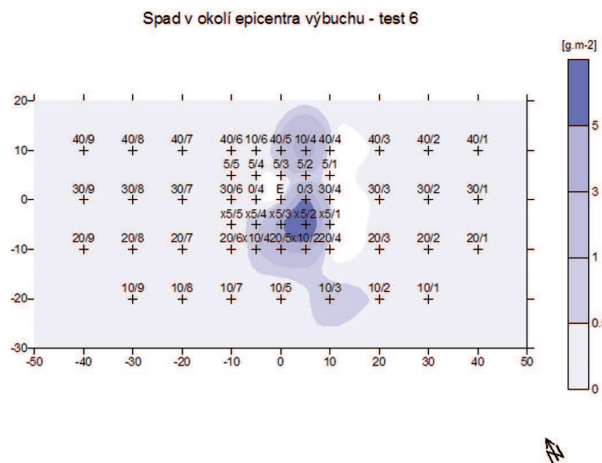


Obrázek P3-1: Výšek 20 minut časového průběhu koncentrace  $PM_{2.5}$  po testu DUBEN\_5 – odpal v 8:59:15 dne 26.4.2007.

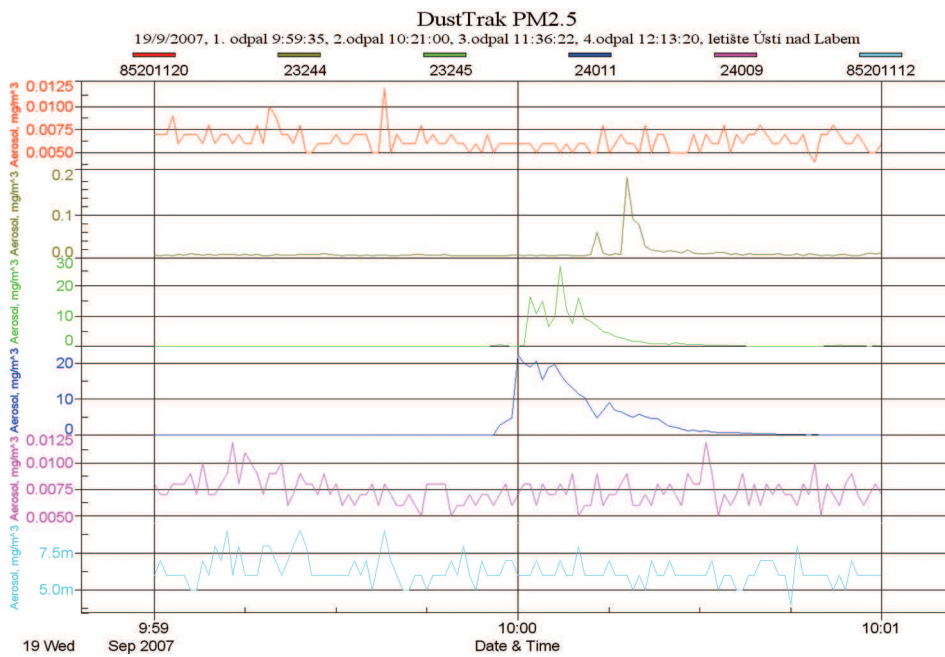




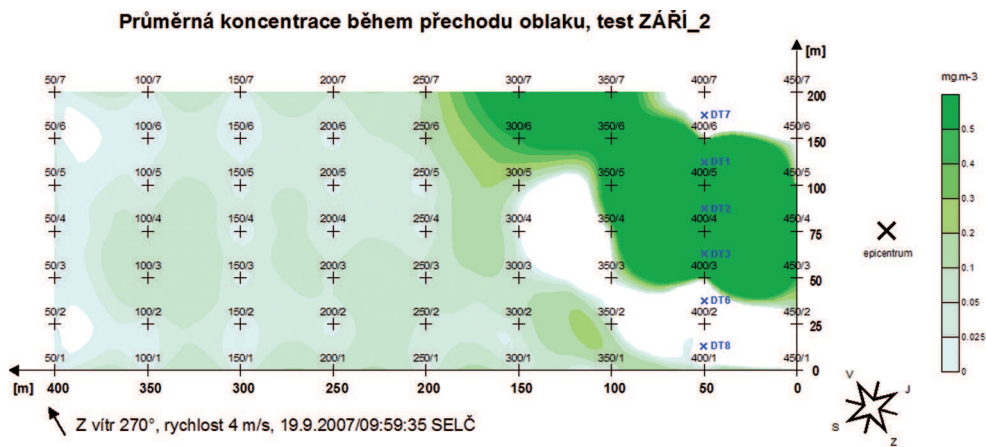
Obrázek P3-2: Průměrná koncentrace aerosolu během přechodu oblaku po testu DUBEN\_5 (třída stability atmosféry A).



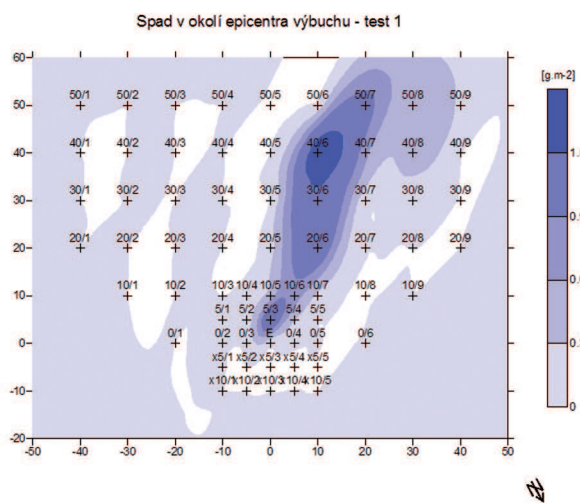
Obrázek P3-3: Spad částic aerosolu v okolí epicentra po testu DUBEN\_5.



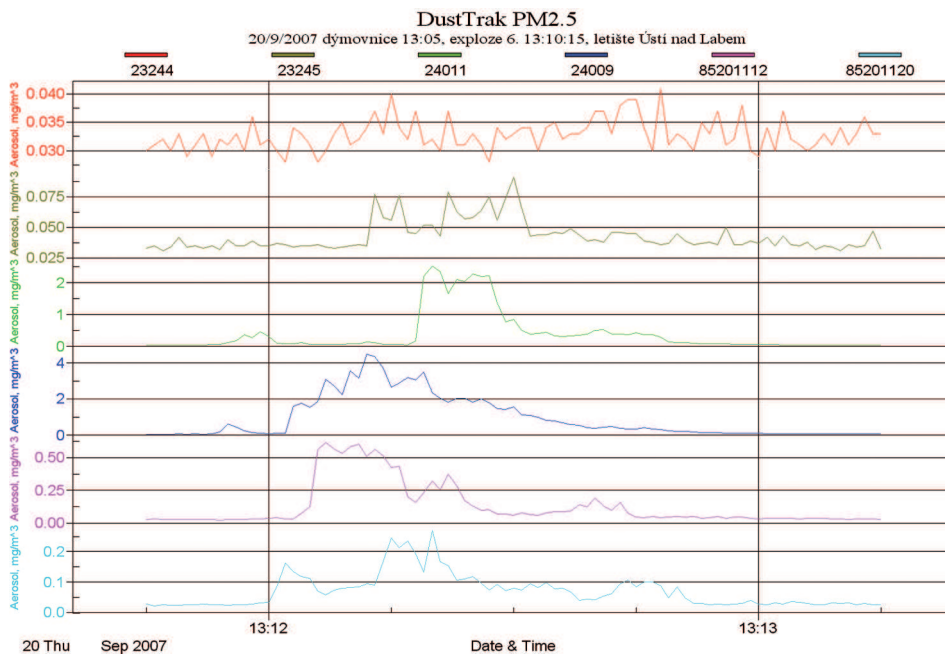
*Obrázek P3-4: Výšek 2 minut časového průběhu koncentrace  $PM_{2,5}$  po testu ZÁŘÍ\_2 – odpal ve 9:59:35 dne 19.9.2007.*



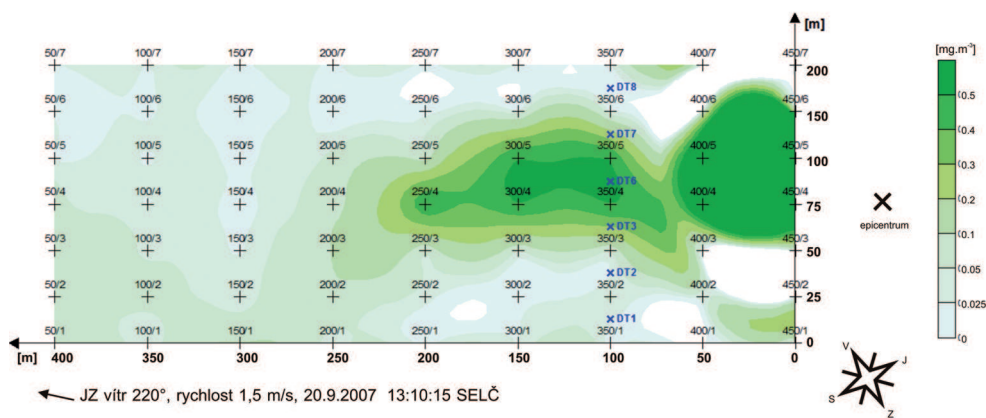
Obrázek P3-5: Průměrná koncentrace aerosolu během přechodu oblaku po testu ZÁŘÍ\_2 (třída stability atmosféry C).



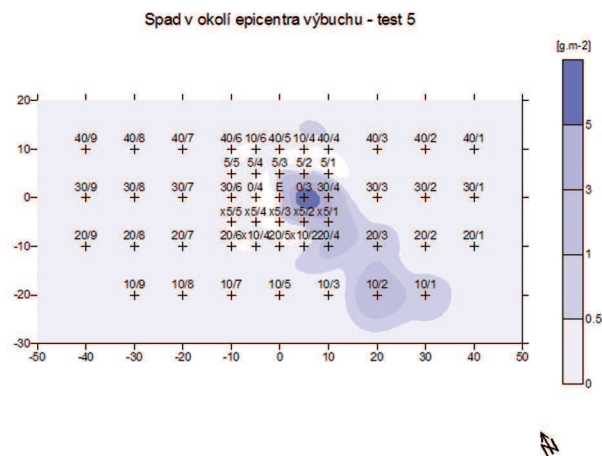
Obrázek P3-6: Spad částic aerosolu v okolí epicentra po testu ZÁŘÍ\_2.



Obrázek P3-7: Výšek 1,5 minuty časového průběhu koncentrace  $PM_{2,5}$ , po testu ZÁŘÍ\_6 – odpal v 13:10:15 dne 20.9.2007.



Obrázek P3-8: Spad částic aerosolu v okolí epicentra po testu ZÁŘÍ\_6 (třída stability atmosféry B).



Obrázek P3-9: Spad částic aerosolu v okolí epicentra po testu ZÁŘÍ\_6.

## P-4 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (HAZOP)

Níže uvedený text je neupraveným výpisem textů článků 6.3 až 7 a Příloh A a B z normy ČSN IEC 61882 a je určen výhradně pro studijní účely. Jeho přetisk v rámci této knihy byl umožněn s laskavým svolením Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, avšak jeho další šíření a kopírování je podle autorského zákona zakázáno.

### 6.3 Role a odpovědnosti

Manažer projektu má jasně stanovit role odpovědnosti týmu HAZOP a vedoucí studie HAZOP je má na začátku studie odsouhlasit. Vedoucí studie má přezkoumat projekt, aby určil, jaké informace jsou k dispozici a jaké dovednosti budou od členů týmu studie požadovány. Má se vypracovat program činnosti, který odráží milníky projektu, aby bylo možné jakákoliv doporučení provést včas.

Vedoucí studie odpovídá za to, že bude uveden do provozu příslušný komunikační systém a že se tento systém bude používat pro předávání výsledků studie HAZOP. Manažer projektu zodpovídá za to, že budou výsledky studie používány a že rozhodnutí týkající se jejich uplatnění učiněná projekčním týmem budou řádně dokumentována.

Manažer projektu a vedoucí studie se mají dohodnout o tom, zda se činnosti týmu HAZOP mají omezit na rozpoznání nebezpečí a problémových oblastí (které se potom ohlásí zpět manažerovi projektu a projekčnímu týmu, aby je vyřešili) nebo zda se při studii mají též navrhnout možná opatření k nápravě/zmírnění následků. V druhém případě je též nutné, aby se dohodli na odpovědnosti a mechanismu volby preferovaných opatření k nápravě/zmírnění následků a na zabezpečení vhodné autorizace každého opatření, které se má provést.

Studie HAZOP je výsledkem týmového úsilí, při němž je každý člen týmu vybrán pro nějakou přesně stanovenou roli. Tým má být co nejmenší, avšak takový, aby odpovídal příslušným dostupným technickým a provozním dovednostem a zkušenostem. Obecně by do něho měly být zapojeny nejméně čtyři osoby a výjimečně by jich mohlo být více než sedm. Čím větší je tým, tím pomalejší proces. Když byl systém navržen dodavatelem, má tým HAZOP zahrnovat pracovníky jak od dodavatele, tak i od zákazníka.

Doporučené role členů týmu jsou:

- Vedoucí studie: Není přímo spojen s projekčním týmem a s projektem. Je vyškolen a má zkušenosti s vedením studií HAZOP. Zodpovídá za komunikaci mezi vedením projektu a týmem HAZOP. Plánuje studii. Schvaluje složení týmu studie. Zjišťuje, aby byl týmu studie dodán soubor s prezentací projektu. Navrhuje vodící slova a interpretaci vztahu vodící slovo – prvek/charakteristika, které se musí při studii používat. Provádí studii. Zjišťuje dokumentaci výsledků.

- Zapisovatel: Dokumentuje jednání při pracovních poradách. Dokumentuje rozpoznaná nebezpečí a oblasti problémů, vypracovaná doporučení a jakákoliv opatření prováděná při dalším postupu. Pomáhá vedoucímu studie při plánování a plnění administrativních povinností. Je přípustné, aby v některých případech tuto roli zastával vedoucí projektu.
- Projektant: Vysvětluje projekt a jeho prezentaci. Vysvětluje, jak může dojít ke stanovené odchylce a jaká bude odpovídající odezva systému.
- Uživatel: Vysvětluje souvislosti provozu, v nichž bude daný studovaný prvek provozován, provozní následky odchylky a rozsah nebezpečnosti odchylek.
- Odborníci: Poskytují odborné posudky týkající se systému a studie. Mohou být vyzváni k omezené účasti, kdy tuto roli postupně přebírá několik pracovníků.
- Údržbář: Představitel personálu údržby (pokud je nutný).

Při studii se vždy požaduje stanovisko projektanta a uživatele. Je však přípustné, aby se v závislosti na konkrétní etapě životního cyklu, v níž se studie provádí, měnil typ odborníků, kteří jsou pro studii nejvhodnější.

Všichni členové týmu mají mít dostatečné znalosti techniky HAZOP, aby se mohli efektivně účastnit studie, nebo jim má být poskytnuto vhodné úvodní poučení.

## 6.4 Přípravné práce

### 6.4.1 Všeobecně

Vedoucí studie odpovídá za následující přípravné práce:

- a) získání informací,
- b) převedení těchto informací do vhodného formátu,
- c) plánování posloupnosti pracovních porad,
- d) pořádání nutných pracovních porad.

Kromě toho je možné, aby vedoucí studie zorganizoval provedení rešerše databází atd. pro identifikaci nežádoucích událostí (incidentů), ke kterým došlo u stejných nebo podobných technologií.

Vedoucí studie je odpovědný za zajištění, že bude k dispozici přiměřená prezentace projektu. Jestliže má prezentace projektu nedostatky nebo je neúplná, má být před zahájením studie opravena. V etapě plánování studie má pracovník obeznámený s projektem identifikovat v prezentaci projektu příslušné části, prvky a jejich charakteristiky.

Vedoucí studie je zodpovědný za přípravu plánu studie, který má obsahovat:

- cíl a předmět členů,
- technické podrobnosti,
- prezentaci projektu rozdělenou na části a prvky se stanoveným cílem projektu a u každého prvku seznam součástí, materiálů a činností a jejich charakteristik,
- seznam navržených vodících slov, která se budou používat, a interpretace kombinací vodící slovo – prvek/charakteristika, jak je naznačeno v článku 6.4.3 normy,
- seznam vhodných odkazů,
- administrativní uspořádání, plán pracovních porad, včetně jejich údajů o kalendářním datu a čase a o místě konání,
- formuláře pro požadované záznamy (viz příloha A normy),
- šablony, které se mohou při studii používat.

Pro usnadnění efektivního průběhu pracovní rady mají být poskytnuty vhodné místnosti a vizuální a záznamové pomůcky.

Členům týmu studie má být v předstihu před první pracovní radou zaslán instruktažní soubor informací sestávající z plánu studie a nezbytných odkazů, aby se mohli seznámit s jeho obsahem. Je žádoucí, aby mohli systém fyzicky přezkoumat.

Úspěch studie HAZOP silně závisí na bystrosti a soustředění členů týmů a je tudíž důležité, aby jednání trvala omezenou dobu a byly do nich zařazeny vhodné přestávky. Za dosažení těchto požadavků je zodpovědný především vedoucí studie.

#### **6.4.2 Popis projektu**

Popis projektu se může typicky skládat z některých dále uvedených dokumentů, které mají být jasně a jednoznačně identifikovány, schváleny a datovány:

- a) pro všechny systémy:
  - požadavky a popisy projektu, vývojové diagramy, funkční blokové diagramy, schémata měření a regulace, elektrická schémata zapojení, tabulky s technickými daty, výkresy uspořádání, specifikace technického vybavení, požadavky na provoz a údržbu,
- b) pro systémy zpracování toku materiálu:
  - schéma potrubí a přístrojového vybavení, specifikace materiálu a normy pro zařízení, nákres uspořádání potrubí a systému,



- c) pro programovatelné elektronické systémy:
  - schémata toku dat, schémata objektově orientovaného návrhu, schémata stavových přechodů, diagramy časování, logické diagramy.

Kromě toho mají být poskytovány následující informace:

- hranice objektu, který je předmětem studia, a rozhraní na těchto hranicích,
- podmínky prostředí, v nichž bude systém provozován,
- kvalifikace, dovednosti a zkušenosti provozního personálu a pracovníků údržby,
- postupy a/nebo provozní instrukce,
- zkušenosti s provozem a údržbou a známá nebezpečí spojená s obdobnými systémy.

#### 6.4.3 Vodící slova a odchylky

V etapě plánované studie HAZOP má vedoucí studie navrhnout počáteční seznam vodících slov, která se musí používat. Vedoucí studie má navržená vodící slova vyzkoušet u daného systému a má potvrdit jejich přiměřenost. Volba vodících slov se má pečlivě uvážit, jelikož je možné, že vodící slovo, které je příliš specifické, omezí nápady a diskusi, a vodící slovo, které je příliš obecné, nemusí efektivně zaměřit pozornost studie HAZOP. Některé příklady různých typů odchylek a s nimi spojených vodících slov jsou uvedeny v tabulce P4-1.

Kombinace vodící slovo – prvek/charakteristika mohou být ve studiích jiných systémů, v jiných etapách životního cyklu a při použití jiných prezentací projektu interpretovány odlišně. Některé kombinace nemusí mít pro danou studii smysluplnou interpretaci a nemá se na ně brát ohled. Interpretace všech kombinací vodící slovo-prvek/charakteristika má být přesně vymezena a dokumentována. Jestliže má daná kombinace v kontextu tohoto projektu více než jednu rozumnou interpretaci, mají se v dokumentaci uvést všechny interpretace. Na druhou stranu se možná zjistí, že je stejná interpretace odvozena z různých kombinací. Když k tomu dojde, mají se vypracovat vhodné křížové odkazy.

#### 6.5 Zkoumání

Jednání při zkoumání má být strukturováno a vedoucí studie má při něm vést diskusi podle plánu studie. Vedoucí studie nebo člen týmu, který je obeznámen se zkoumaným procesem a jeho problémy, má při zahájení pracovní porady studie HAZOP:

- V hlavních rysech vysvětlit plán studie, aby bylo zajištěno, že jsou členové obeznámeni se systémem a s cíli a předmětem studie.

Tabulka P4-1: Příklady odchylek a s nimi spojených vodících slov.

Typ odchylky	Vodící slovo	Příklad interpretace po zpracovatelský průmysl	Příklad interpretace pro programovatelný elektronický systém (PES)
Negace	ŽÁDNÝ, NENÍ ŽÁDNÝ	Žádné části zamýšleného cíle (funkce) se nedosáhlo, např. žádný průtok	Nejsou předávána žádná data nebo řídicí signály
Kvantitativní změna	VYŠŠÍ  NIŽŠÍ	Kvantitativní nárůst, např. vyšší teplota  Kvantitativní pokles, např. nižší teplota	Data jsou předávána vyšší rychlostí, než je zamýšleno  Data jsou předávána nižší rychlostí, než je zamýšleno
Kvalitativní změna	A TAKÉ, JAKOŽ I, A ROVNĚŽ  ČÁSTEČNĚ	Jsou přítomny nečistoty Současně se vykonává nějaká další operace/krok  Dosahuje se pouze něco ze zamýšleného cíle, např. k zamýšlené přepravě kapaliny dochází pouze částečně	Je přítomen nějaký další nebo rušivý signál  Data nebo řídicí signály jsou neúplné
Náhrada, záměna	OBRÁCENÝ, ZPĚTNÝ  JINÝ NEŽ	Toto vodící slovo se používá např. pro obrácený tok v potrubí a zpětnou chemickou reakci  Dosáhlo se jiného výsledku, než byl původní cíl, např. došlo k přenosu nesprávného materiálu	Zpravidla se systému PES netýká  Data nebo řídicí signály jsou nesprávné
Čas	PŘEDČASNÝ  ZPOŽDĚNÝ	K něčemu, např. ke chlazení nebo filtraci, došlo relativně dříve vzhledem ke stanovenému času  K něčemu, např. ke chlazení nebo k filtraci, došlo relativně pozdě vzhledem ke stanovenému času	Signály přicházejí příliš brzy vzhledem ke stanovenému času  Signály přicházejí příliš pozdě vzhledem ke stanovenému času
Pořadí nebo posloupnost	PŘEDMĚT  PO	K něčemu, např. ke směšování nebo ohřevu, došlo v nějaké posloupnosti příliš brzy  K něčemu, např. ke směšování nebo ohřevu, došlo v nějaké posloupnosti příliš pozdě	Signály přicházejí dříve, než bylo v nějaké posloupnosti zamýšleno  Signály přicházejí později, než bylo v nějaké posloupnosti zamýšleno

- V hlavních rysech navrhnout prezentaci projektu a vysvětlit navržené prvky a vodící slova, která se musí používat.
- Přezkoumat známá nebezpečí a problémy s provozem, jakož i potenciální oblasti zájmu.

Analýza se má řídit podle toku nebo posloupnosti týkající se předmětu analýzy, přičemž má postupovat od vstupů k výstupům v logické posloupnosti. Síla technik rozpoznávání nebezpečí, jako je HAZOP, spočívá v systematickém procesu zkoumání krok za krokem. Existují dvě možné posloupnosti zkoumání: „nejdřív prvek“ a „nejdřív vodící slovo“. Posloupnost „nejdřív prvek“ je popsána takto:

- a) Vedoucí studie zahajuje zkoumání volbou nějaké části z prezentace projektu jako výchozího bodu a označením této části. Cíl projektu této části se potom vysvětlí a zjistí se příslušné prvky a všechny charakteristiky sdružené s těmito prvky.
- b) Vedoucí studie vybere jeden z prvků s dohodou se s týmem, zda se dané vodící slovo má použít přímo u samotného tohoto prvku nebo u jednotlivých charakteristik tohoto prvku. Vedoucí studie určuje, které vodící slovo se použije jako první.
- c) První použitelná interpretace vodícího slova se prozkoumá v kontextu daného zkoumaného prvku nebo charakteristiky, aby se ukázalo, zda existuje věrohodná odchylka od cíle projektu. Jestliže je věrohodná odchylka rozpoznána, zkoumají se její možné příčiny a následky. U některých aplikací bývá užitečné kategorizovat odchylky buď podle potenciální závažnosti následků, nebo podle třídy relativního rizika na základě použití matice rizik. Použití matice rizik je podrobněji uvedeno v IEC 60300-3-9.
- d) Tým má rozpoznat přítomnost mechanismů ochrany, detekce a indikace pro danou odchylku, které je přípustné začlenit do zvolené části nebo které tvoří součást cílů projektu jiných částí. Existence takových mechanismů nemá být důvodem, aby se zastavilo prozkoumávání potenciálního nebezpečí nebo problému s provozuschopností, či aby se toto nebezpečí či problém nezařadil do seznamu, ani se nemá přestat v pokusech o zmenšení pravděpodobnosti jeho výskytu či zmírnění jeho následků.
- e) Vedoucí studie má shrnout výsledky, které zapisovatel zaznamená do dokumentace. Pokud je nutné provést další následné práce, má se též zaznamenat osoba odpovědná za zajištění, že tyto práce budou provedeny.
- f) Proces se potom opakuje pro jakoukoliv jinou interpretaci daného vodícího slova, potom pro další vodící slovo, potom pro každou charakteristiku zkoumaného prvku (jestliže byla u tohoto prvku dohodnuta analýza na úrovni charakteristiky) a potom pro každý prvek části podrobené studii. Poté co byla nějaká část plně prozkoumána, má se označit jako dokončená. Proces se opakuje, dokud nebudou analyzovány všechny části.

Místo metody použití vodících slov uvedené výše je možné použít alternativní metodu, kdy se nejdříve aplikuje vodící slovo postupně u každého prvku v dané části. Po dokončení tohoto kroku se pokračuje s dalším vodícím slovem, které se opět postupně používá u všech prvků. Proces se opakuje, dokud nebudou použita všechna vodící slova u všech prvků v této konkrétní části, než se přejde k další části.

Volbu posloupnosti, kterou se bude tým řídit při konkrétní studii, má provést vedoucí studie a jeho tým. Na tuto volbu má vliv detailní způsob provádění studie HAZOP. Mezi další faktory ovlivňující rozhodování patří povaha použitých technologií, potřeba pružnosti při zkoumání a do určitého rozsahu i výcvik, jaký účastníci absolvovali.

## **6.6 Dokumentace**

### **6.6.1 Všeobecné**

Základní síla studie HAZOP spočívá v tom, že poskytuje systematicky, disciplinovaný a dokumentovaný přístup. Aby se dosáhlo plného přínosu ze studie HAZOP, musí být studie řádně dokumentována a využívána. Vedoucí studie je odpovědný za zajištění, že budou při každé pracovní poradě vypracovány vhodné záznamy. Zapisovatel má mít dobré technické znalosti studovaného objektu, dobrou jazykovou zručnost a dobrou schopnost naslouchat a věnovat pozornost podrobnostem. Různé metody podávání zpráv (hlášení) jsou rozebrány v příloze A.

### **6.6.2 Způsoby zaznamenávání**

Existují dva základní způsoby zaznamenávání HAZOP: úplné a pouze při výjimkách. O metodě zaznamenávání má být rozhodnuto před každým jednáním a zapisovateli se má oznámit, jaká metoda se bude používat.

- Při úplném zaznamenávání se zaznamenávají všechny výsledky použití každé kombinace vodící slovo – prvek/charakteristika u každé části nebo prvku v prezentaci projektu. Tato metoda, byť těžkopádná, poskytuje důkaz, že byla studie úplná, a má uspokojit i nejpřísnější požadavky auditu.
- Při zaznamenávání při výjimkách se zaznamenávají pouze rozpoznaná nebezpečí a problémy s provozuschopností spolu s následnými opatřeními. Zaznamenávání při výjimkách vede ke snadněji zvládnuté dokumentaci. Není však při ní dokumentována úplnost studie a je tudíž méně užitečná pro účely auditu. To může též vést k tomu, že bude při některé budoucí studii studován stejný předmět znovu. Zaznamenávání při výjimkách je tudíž minimální požadavek a má se používat opatrně.

Při rozhodování o formě podávání zpráv, která se bude používat, se mají uvážit následující faktory:

- požadavky nařízení a předpisů,
- smluvní závazky,
- celková politika společnosti a auditovatelnosti,
- velikost rizik, která dotyčný systém představuje,
- poskytnutá doba a dostupné zdroje.

### 6.6.3 Výstup studie

Výstup ze studie HAZOP má zahrnovat:

- Podrobnosti o rozpoznávaných nebezpečích a problémech s provozuschopností spolu s podrobnostmi o jakýchkoliv opatřeních pro jejich detekci a/nebo zmírnění.
- Doporučení pro jakékoliv další studie specifických aspektů projektu s použitím odlišných technik, pokud je nutné.
- Opatření nutná k tomu, aby bylo možné se zaměřit na nejistoty objevené během studie.
- Doporučení pro zmírnění rozpoznávaných problémů na základě týmové znalosti systému (jestliže to je předmětem studie).
- Poznámky upozorňující na konkrétní body, na něž je třeba se zaměřit při postupech provozu a údržby.
- Seznam členů týmu při každém jednání.
- Seznam všech částí uvažovaných při analýze spolu s důvody jejich případného vyloučení.
- Seznam všech výkresů, specifikací, datových tabulek, zpráv a hlášení atd., přičemž jsou v nich citována čísla revizí použitých týmem.

Při zaznamenávání „při výjimkách“ bývají tyto výstupy obvykle obsaženy ve zhuštěné formě v pracovních výkazech HAZOP. Při úplném zaznamenávání bude možná nutné požadované výstupy „vyčlenit“ z celkových pracovních výkazů studie.

#### 6.6.4 Požadavky na podávání zpráv

Zaznamenané informace mají splňovat tato hlediska:

- Každé nebezpečí a každý provozní problém má být zaznamenán jako samostatná položka.
- Všechna nebezpečí a provozní problémy mají být zaznamenány společně se svými příčinami bez ohledu na jakýkoliv již existující mechanismus ochrany nebo poplachu v systému.
- Každý dotaz vznesený týmem, který bude prostudován po pracovní poradě, má být zaznamenán společně se jménem osoby, která je za odpověď na něj zodpovědná.
- Má být schválen vhodný systém číslování, aby bylo zjištěno, že každé nebezpečí, problém s provozuschopností, dotaz, doporučení atd. budou jedinečně identifikovatelné.
- Dokumentace studie má být archivována, aby ji bylo možno nalézt a vyjmout, pokud je to požadováno a kdykoliv je to požadováno, a má na ni být odkaz v deníku nebezpečí daného systému (pokud existuje).

Kdo přesně má přijmout kopii závěrečné zprávy je zpravidla stanoveno vnitřní politikou společnosti nebo je to dáno požadavky nařízení a předpisů, ale obvykle se mezi tyto osoby má zahrnout manažer projektu, vedoucí studie a osoba, které byla přidělena odpovědnost za zajištění, že budou následná opatření/doporučení uplatněna (viz článek 6.1 normy).

#### 6.6.5 Schválení dokumentace

Na konci studie má být vypracována zpráva o studii, kterou má tým schválit. Jestliže nelze dosáhnout dohody, mají být důvody zaznamenány.

#### 6.7 Další postup a odpovědnost

Studie HAZOP nesměřují k přepracování projektu systému. Není též obvyklé, aby vedoucí studie měl pravomoc zajistit, že bude postupováno podle studie týmu HAZOP.

Před tím, než budou uplatněny jakékoliv významné změny vyplývající z nálezů při studii HAZOP, a jakmile je k dispozici zkontrolovaná dokumentace, má manažer projektu uvážit, zda nemá opět svolat tým HAZOP, aby bylo zajištěno, že nevznikla žádná nová nebezpečí ani nové problémy s provozuschopností či údržbou.

V některých případech, jak je naznačováno v 6.3, je možné, aby manažer projektu zplnomocnil tým HAZOP k tomu, aby uplatnil doporučení a provedl změny projektu.

V tomto případě může být od týmu HAZOP požadováno, aby provedl následující dodatečné práce:

- Dohodl se o nevyřízených problémech a upravil projekt nebo postupy provozu a údržby.
- Ověřil úpravy a změny a sdělil je manažeru projektu a získal jejich schválení.
- Provedl další studie HAZOP týkající se úprav, včetně rozhraní systému.

## 7 Audit

Program a výsledky studií HAZOP mohou být podrobeny vnitřnímu auditu společnosti nebo oficiálnímu auditu úředním orgánem. Kritéria a problémy, které je možné auditovat, mají být přesně stanoveny v postupech společnosti. Do těchto kritérií je možné zahrnout pracovníky, postupy, přípravu, dokumentaci a následné činnosti. Má se do nich zahrnout i důkladná kontrola technických hledisek.

### Příloha A – Metody podávání zpráv

#### A.1 Volitelné možnosti podávání zpráv

Jsou k dispozici různé volitelné možnosti zaznamenávání:

- Ruční zaznamenávání do připravených formulářů, které může být zcela přiměřené, zejména u malých studií, za předpokladu, že jsou splněny základní potřeby čitelnosti.
- Rukou psané poznámky ze studie HAZOP, které je možné po jednání podrobit zpracování textu, aby se dosáhlo vhodné jakosti výtisku pro vydání.
- K vytvoření pracovních výkazů během jednání lze použít přenosný počítač se standardním softwarem pro zpracování textu nebo s tabulkovým procesorem.
- Při zaznamenávání výsledků studie HAZOP mohou pomáhat specifické softwarové programy PC s různou úrovní důmyslnosti. Použití programového balíku, který umožňuje zobrazit poznámky o zkoumání (pomocí projektoru), jakmile jsou zaznamenány, může poskytnout další úspory.

#### A.2 Pracovní výkaz HAZOP

Pro zaznamenávání výsledků zkoumání a následného sledování se má vypracovat nebo přijmout nějaký pracovní výkaz. Bez ohledu na přijaté volitelné možnosti zaznamenávání má pracovní výkaz obsahovat zásadní význačné vlastnosti nutné pro splnění konkrétních požadavků, jejichž příklady jsou uvedeny dále. Uspořádání pracovního výkazu se zpravidla mění v závislosti na tom, zda je součástí ručního či počítačového programu podávání zpráv. Ručně vyplněný formulář se obvykle skládá ze záhlaví a sloupců.

Záhlaví může obsahovat následující informace: projekt, předmět studie, cíl projektu, zkoumaná část systému, členové týmu, zkoumaný výkres nebo dokument, datum, číslo stránky atd.

Záhlaví (nadpisy) sloupců mohou být následující:

1. u sloupců vyplňovaných během zkoumání:
  - a) referenční číslo,
  - b) prvek,
  - c) vodící slovo,
  - d) odchylka,
  - e) příčina,
  - f) následky,
  - g) požadované opatření.

Je možné zaznamenávat i další dodatečné informace, jako jsou bezpečnostní opatření, závažnost, komentáře a třída rizika.

2. u sloupců vyplňovaných během následného zkoumání:
  - a) doporučené opatření,
  - b) priorita/třída rizika,
  - c) odpovědnost za opatření,
  - d) status,
  - e) komentáře.

Počítačové podávání zpráv (hlášení) umožňuje větší pružnost uspořádání, lepší prezentaci informace a snadnější přípravu požadovaných zpráv, jako jsou:

- podrobnější pracovní výkazy,
- zprávy vydávané podle příčin a/nebo následků,
- zprávy o následném sledování s odpovědnostmi a statusem.

Formuláře zpráv vypracované na zakázku mohou být snadno vypracovány s použitím dostupných systémů na zpracování textu. Kromě toho je na trhu několik softwarových balíků, které zjednodušují úlohu zaznamenávání dat a vytváření zpráv. Takové balíky jsou hodnotné pro usnadnění úlohy zapisovatele. Některé balíky se však též pokoušejí převzít roli vedoucího studie tým, že používají kontrolní seznam dvojic vodící slovo – prvek/charakteristika jako alternativu k vytváření odchylek při používání vodících slov přímo u prvků (a pokud to je nutné, charakteristik). Zatímco tyto balíky zpravidla



rozpoznávají mnoho nebezpečí a vytvářejí výpisy, které se podobají výpisům ze studie HAZOP, postrádají přesnost při generování nebezpečí z „pracovního systému“ a mají omezenou použitelnost mimo oblast jednotek nepřetržitého zpracování. Zejména se nedoporučuje používat softwarové balíky, které úplně nahrazují vedoucího studie. Namátkové použití kontrolních seznamů vypracovaných pro daný účel nemůže být považováno za studii HAZOP, jak je stanoveno v této normě.

### A.3 Zpráva o studii HAZOP

Má se vypracovat závěrečná zpráva o studii HAZOP, která má obsahovat:

- souhrn,
- závěry,
- předmět a cíle,
- výstup studie rozčleněný na položky uvedené v článku 6.6.3 normy,
- pracovní výkazy HAZOP,
- seznam výkresů a dokumentace používaných ve studii,
- odkazy na předchozí studie, databáze atd., které byly použity v průběhu studie.

## Příloha B – Příklady studií HAZOP

Účelem příkladů obsažených v této příloze je vysvětlit, jak se principy zkoumání HAZOP rámcově popsané v této normě (zejména v 4.2, 6.4 a 6.5) používají v řadě aplikací zahrnujících různá průmyslová odvětví a různé činnosti. Je však třeba poznamenat, že tyto příklady byly pro účely ilustrativního znázornění značně zjednodušeny a v žádném případě není jejich účelem reprodukovat všechny podrobné technické složitosti studií skutečných případů. Je nutné též poznamenat, že jsou uvedeny pouze příklady výstupů.

### B.1 Úvodní příklad

Účelem tohoto příkladu je seznámit čtenáře se základy metody zkoumání HAZOP. Příklad je převzat z původní publikace zabývající se studii HAZOP.

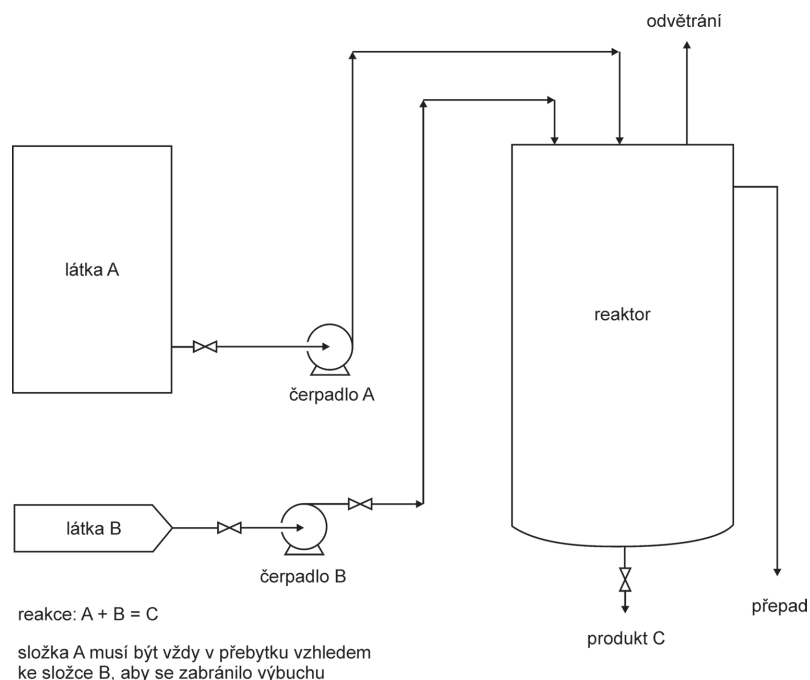
Uvažuje se jednoduché zařízení na zpracování chemických látek uvedené na obrázku P4-1. Látky A a B jsou nepřetržitě dopravovány čerpadlem ze svých zdrojových tanků, aby se sloučily a vytvořily v reaktoru produkt C. Předpokládejme, že látka A musí být v reaktoru vzhledem k látce B vždy v přebytku, aby se zabránilo nebezpečí výbuchu. Úplná prezentace projektu by zahrnovala mnoho dalších podrobností, jako je vliv tlaku, teploty reakce a reaktantů, míchání, dobu reakce, slučitelnost čer-

padel A a B atd., ale pro účely tohoto jednoduchého názorného příkladu budou tyto podrobnosti ignorovány. Zkoumaná část zařízení je znázorněna tučně.

Část systému vybraná pro zkoumání je potrubí od zdrojového tanku obsahující látku A k reaktoru, včetně čerpadla A. Cíl projektu pro tuto část je nepřetržitě přepravovat látku A z tanku do reaktoru rychlostí větší, než je rychlost přepravy látky B. Cíl projektu vyjádřený v podobě prvků je uveden v záhlaví:

Látka	Činnost	Zdroj	Místo určení
A	Přeprava (rychlostí > B)	Tank pro A	Reaktor

Každé z vodicích slov uvedených v tabulce P4-1 (plus jakýchkoliv jiných slov dohodnutých jako vhodná vodicí slova během přípravných prací, viz 6.4) se potom postupně použije u každého prvku a výsledek se zaznamená do pracovních výkazů HAZOP. Příklady možných výstupů HAZOP pro prvky „látka“ a „činnost“ jsou uvedeny v tabulce P4-2, kde byl použit způsob podávání zpráv „při výjimkách“ a jsou zaznamenány pouze odchylky, které mají smysl. Poté, co jsou prozkoumána všechna vodicí slova každého prvku příslušného této části systému, by mohla být zvolena další část (řekněme přepravní potrubí pro látku B) a proces by se mohl opakovat. Konečně by se tímto způsobem prozkoumaly všechny části systému a výsledky by se zaznamenaly.



Obrázek P4-1: Schéma jednoduchého toku.

<b>Název studie:</b> Příklad procesu		List č.: 1 ze 4									
<b>Výkres č.:</b>		Datum: 17. prosince 1998									
<b>Složení týmu:</b>		Datum porady 15. prosince 1998									
<b>Uvažovaná část:</b>		Převrtní potrubí ze zásobního tanku A do reaktoru									
<b>Cíl projektu:</b>		Činnost: nepřetržitá přeprava rychlosti větší B									
		Místo určení: reaktor									
		Zdroj: tank pro A									
<b>Č.</b>	<b>Vodící slovo</b>	<b>Prvek</b>	<b>Odechylka</b>	<b>Možné příčiny</b>	<b>Následky</b>	<b>Bezpečnostní opatření</b>	<b>Komentáře</b>	<b>Požadovaná opatření</b>	<b>Opatření přiděleno</b>		
1	Žádný, není žádný	Látka A	Žádná odechylka A	Zdrojový tank A je prázdný	Žádný tok A do reaktoru Výbuch	Žádná nejsou specifikována	Nepříjemná situace	Uvážit instalaci poplachu plus zablkování čerpadla B při nízké hladině v tanku A	MG		
2	Žádný, není žádný	Přeprava A (rychlost? B)	K žádné přepravě A nedochází	Čerpadlo A se zastavilo, potrubí se ucpalo	Výbuch	Žádná nejsou specifikována	Nepříjemná situace	Měřeni rychlosti průtoku materiálu A plus poplach při malém průtoku plus zablkování čerpadla B při malém průtoku	JK		
3	Vyšší	Látka A	Více látky A: zdrojový tank je přeplněn	Plnění tanku z tankeru při jeho nedostatečné kapacitě	Tank přeteče do omezeného prostoru	Žádná nejsou specifikována	Poznámka: Toto by se zjistilo během zkoumání tanku	Uvážit poplach při vysoké hladině, jestliže nebyla rozpoznána dříve	EK		

<b>Název studie:</b> Příklad procesu		List č.: 2 ze 4							
<b>Výkres č.:</b>		Datum: 17. prosince 1998							
<b>Složení týmu:</b>		Datum porady 15. prosince 1998							
<b>Uvažovaná část:</b>		Přepavní potrubí ze zásobního tanku A do reaktoru							
<b>Cíl projektu:</b>		Činnost: nepřetržitá přeprava rychlosti větší B Místo určení: reaktor							
<b>Č.</b>	<b>Vodící slovo</b>	<b>Prvek</b>	<b>Odchylka</b>	<b>Možné příčiny</b>	<b>Následky</b>	<b>Bezpečnostní opatření</b>	<b>Komentáře</b>	<b>Požadovaná opatření</b>	<b>Opatření přiděleno</b>
4	Vyšší	Přeprava A	Vyšší přeprava Zvýšená rychlost průtoku látky A	Nesprávná velikost čerpadla Instalace nesprávného čerpadla	Možné snížení výtežku Produkt bude obsahovat velký přebytek A	Žádné		Zkontrolovat průtoky čerpadel a jeho charakteristiky při oficiálním uvádění do provozu Zkontrolovat při nízké hladině v tanku	JK
5	Nížší	Látka A	Méně látka A	Nízká hladina v tanku	Nepřiměřená sací hlava se sífkou Možná turbulence vedoucí k výbuchu Nepřiměřený tok	Žádné	Nepřijatelné Totéž jako u 1	Poplach při nízké hladině v tanku Totéž jako u 1	MG
6	Nížší	Přeprava A (rychlost? B)	Snižovaný průtok látky A	Potrubí je částečně ucpané, snížený výkon čerpadla atd.	Výbuch	Žádná nejsou specifikována	Nepřijatelné	Totéž jako u 2	JK

<b>Název studie: Příklad procesu</b>		List č.: 3 ze 4									
<b>Výkres č.:</b>		Číslo revize:									
<b>Složení týmu:</b>		LB, DH, EK, NE, MG, JK Datum: 17. prosince 1998 Datum porady 15. prosince 1998									
<b>Uvažovaná část:</b>		Převrtní potrubí ze zásobního tanku A do reaktoru									
<b>Cíl projektu:</b>		Činnost: nepřetržitá přeprava rychlosti větší B Místo určení: reaktor									
<b>Č.</b>	<b>Vodící slovo</b>	<b>Prvek</b>	<b>Odchylka</b>	<b>Možné přičiny</b>	<b>Následky</b>	<b>Bezpečnostní opatření</b>	<b>Komentáře</b>	<b>Požadovaná opatření</b>	<b>Opatření přiděleno</b>		
7	A také, jakož i, a rovněž	Látka A	Ve zdrojovém tanku je kromě látky A přítomna i jiná kapalina	Znečištění zdrojového tanku	Nejsou známy	Kontrolovat obsah všech tanků a analyzovat je před jejich vyprázdněním do tanku	Považuje se za přijatelné	Zkontrolovat provozní postup	LB		
8	A také, jakož i, a rovněž	Přeprava látky A	Přeprava látky A a také nastává něco jiného, jako je koroze, eroze, krystalizace nebo rozklad	Je třeba uvážit potencionální možnosti v souvislosti se specifitějšími podrobnostmi						NE	
9	A také, jakož i, a rovněž	Cílový reaktor	Reaktor, jakož i Vnější průsaky	Průsaky potrubí, ventilů nebo těsnění	Znečištění životního prostředí Možnost výbuchu	Použití přijatelný kód/vhodnou normu pro potrubí	Kvalifikovaná přejejmka	Umístit průtokové čidlo co nejbližší k reaktoru	DH		

<b>Název studie:</b> Příklad procesu		List č.: 4 ze 4							
<b>Výkres č.:</b>		Datum: 17. prosince 1998							
<b>Složení týmu:</b>		Datum porady 15. prosince 1998							
<b>Uvažovaná část:</b>		Převravní potrubí ze zásobního tanku A do reaktoru							
<b>Cíl projektu:</b>		Činnost: nepřetržitá přeprava rychlosti větší B Místo určení: reaktor							
<b>Č.</b>	<b>Vodící slovo</b>	<b>Prvek</b>	<b>Odchylka</b>	<b>Možné příčiny</b>	<b>Následky</b>	<b>Bezpečnostní opatření</b>	<b>Komentáře</b>	<b>Požadovaná opatření</b>	<b>Opatření přiděleno</b>
10	Obrácený zpětný	Přeprava látky A	Obrácený směr toku Látka teče z reaktoru do zdrojového tanku	Tlak v reaktoru je vyšší, než je výtláčový tlak čerpadla	Zpětné znečištění zdrojového tanku reakčním materiálem	Žádná nejsou specifikována	Neuspokojivá situace	Uvázat instalaci zpětné klapky do potrubí	MG
11	Jiný než	Látka A	Jiná než A Ve zdrojovém tanku je jiná látka než A	Nesprávná látka ve zdrojovém tanku	Nejsou známy Budou záviset na látce	Před vypouštěním tanku zkontrolovat a analyzovat jeho obsah	Přijatelná situace		
12	Jiný než	Cílový reaktor	Vnější trhlina Nic se do reaktoru nedostane	Prasklé potrubí	Znečištění prostředí a možný výbuch	Celistvost potrubí	Zkontrolovat návrh potrubí	Specifikovat, aby navržené blokování toku mělo dostatečně rychlou odezvu, aby zabránilo výbuchu	MG

## **P-5 Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků (FMEA)**

Níže uvedený text je neupraveným výpisem textů kapitol 4 až 7 a Příloh A a B z normy ČSN EN 60812 a je určen výhradně pro studijní účely. Jeho přetisk v rámci této knihy byl umožněn s laskavým svolením Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, avšak jeho další šíření a kopírování je podle autorského zákona zakázáno.

### **Kapitola 4: Přehled**

#### **4.1 Úvod**

Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA – Failure Modes and Effects Analysis) je systematický postup analýzy systému za účelem zjištění potenciačních způsobů poruch, jejich příčin a důsledků na technické parametry (výkonnost) systému (bezprostřední montážní sestavy i celého systému či procesu). Termín systém se zde používá jako představitel hardwaru, softwaru (s jejich vzájemným působením) nebo procesu. Analýza se úspěšně provádí přednostně v rané etapě vývojového cyklu, aby se daný způsob poruchy nákladově efektivně odstranil nebo zmírnil. Tato analýza může být zahájena, jakmile je systém dostatečně vymezen, aby mohl být prezentován jako funkční blokový diagram, ve kterém mohou být stanoveny technické parametry jeho prvků.

Zásadně důležité je načasování analýzy FMEA; jestliže se provádí dostatečně brzy v cyklu vývoje. Potom může být začlenění změn návrhu k překonání nedostatků zjištěných analýzou FMEA nákladově efektivní. Tudíž je důležité, aby byly úkol FMEA a jeho očekávané výsledky začleněny do plánu a harmonogramu vývoje. FMEA je tedy iterativní proces, který probíhá současně s procesem návrhu.

Analýza FMEA je použitelná na rozmanitých stupních rozčlenění systému od nejvyššího stupně blokového diagramu dolů k funkcím jednotlivých součástí nebo softwarových příkazů. FMEA je tedy iterativní proces, který se aktualizuje, jak se návrh vyvíjí. Po změnách návrhu je nutné, aby se příslušné části analýzy FMEA přezkoumaly a aktualizovaly.

Zevrubná analýza FMEA je výsledkem práce týmu složeného z jednotlivců způsobilých rozpoznat a posoudit velikost a následky různých druhů potenciačních nedostatků návrhu produktu, které by mohly vést k poruchám. Výhodou týmové práce je, že podněcuje proces myšlení a zajišťuje nezbytnou odbornou kvalifikaci.

Národní poznámka: Pod pojmem „zmírnění“ (způsobů poruch, lidských chyb) se v této normě rozumí snížení závažnosti jejich následků a/nebo pravděpodobnosti/četnosti jejich výskytu, případně i zlepšení jejich detekce.

FMEA se považuje za metodu zjišťování závažnosti potencionálních způsobů poruch a poskytování vstupu pro opatření k jejich zmírnění, aby se snížilo riziko. V některých aplikacích se však do analýzy FMEA zahrnuje odhad pravděpodobnosti výskytu způsobů poruch. Poskytnutím určité míry pravděpodobnosti výskytu daného způsobu poruch se analýza zdokonaluje.

Před použitím analýzy FMEA předchází hierarchické rozčlenění systému (hardwaru se softwarem či procesu) na základnější prvky. Ke znázornění tohoto rozčlenění je užitečné použít jednoduché blokové diagramy (viz IEC 61078). Analýza potom začíná od prvků na nejnižším stupni. Důsledek způsobu poruchy na nižším stupni se potom může stát příčinou poruchy pro způsob poruchy objektu na následujícím vyšším stupni. Při analýze se postupuje způsobem zdola nahoru, dokud není zjištěn konečný důsledek pro systém.

FMECA (Failure modes, effects and criticality analysis – analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch) je rozšířením analýzy FMEA spočívající v tom, že jsou do ní zahrnuty prostředky pro klasifikaci závažnosti způsobů poruch, aby bylo možné stanovit prioritu protiopatření. Tato klasifikace se provádí kombinováním míry závažnosti a četnosti výskytu, což vytváří metriku (relativní míru) zvanou kritičnost.

Principy analýzy FMEA mohou být aplikovány i mimo technický návrh. Postup analýzy FMEA lze aplikovat na výrobní nebo jakýkoliv jiný pracovní proces, jaký probíhá v nemocnicích, zdravotnických laboratořích, školských systémech či jinde. Když se FMEA aplikuje na výrobní proces, je tento postup znám v průmyslu jako FMEA procesu neboli PFMEA (Process FMEA). Aby byla analýza FMEA efektivní, musí být pracovnímu týmu poskytnuty přiměřené zdroje. U předběžné analýzy FMEA nemusí být zevrubné pochopení analyzovaného systému zásadně důležité. Jak se návrh vyvíjí, bude pro podrobnou analýzu způsobů poruch nutná zevrubná znalost technických parametrů návrhu a jeho specifikací. Složitě technické návrhy obvykle vyžadují, aby se do analýzy zapojili návrhoví odborníci z mnoha oborů (jako je např. strojírenství, elektrotechnika, systémové inženýrství, softwarové inženýrství, zajištění údržby atd.).

FMEA se obecně zabývá jednotlivými způsoby poruch a důsledky těchto způsobů poruch pro systém. Každý způsob poruchy se zpracovává jako nezávislý. Tento postup je tudíž nevhodný pro uvažování závislých poruch nebo poruch vyplývajících z posloupnosti událostí. Je možné, že k analýze těchto situací bude nutné použít jiné metody a techniky, jako je Markova analýza (viz IEC 61165, resp. ČSN EN 61165) nebo analýzy stromu poruchových stavů (viz. IEC 61025, resp. ČSN EN 61025).

Při určování dopadu poruchy se musí uvážit poruchy vyvolané na vyšším stupni rozčlenění – výsledné poruchy – a případně poruchy vyvolané na stejném stupni. Při analýze se mají vyznačit pokud možno všechny kombinace způsobů poruch nebi jejich následků, které byly příčinou důsledků na vyšším stupni. V tom případě je nutné další modelování, aby se odhadla velikost důsledku nebo jeho pravděpodobnost výskytu.



FMEA je pružný nástroj, který může být přizpůsoben tak, aby splnil specifické potřeby daného průmyslového odvětví nebo produktu. Specializované pracovní listy vyžadující specifické zápisy mohou být přizpůsobeny určitým aplikacím. Jestliže se stanovují úrovně závažnosti způsobů poruch, mohou být tyto úrovně pro odlišné systémy či odlišné stupně rozčlenění systému stanoveny jinak.

## 4.2 Účel a cíle analýzy

Mezi důvody provádění analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA) nebo analýzy způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA) je možné zahrnout:

- a) zjištění poruch, které mají nežádoucí důsledky pro provoz systému (např. zne-možňují nebo významně zhoršují provoz nebo ovlivňují bezpečnost uživatele)
- b) splnění požadavků smlouvy se zákazníkem, pokud jsou v ní uvedeny
- c) možnosti zlepšení bezporuchovosti nebo bezpečnosti systému (např. modifi-kacemi návrhu nebo opatřeními k zajištění kvality)
- d) možnosti zlepšení udržitelnosti systému (zvýrazněním oblastí rizika nebo neshody týkající se udržitelnosti)

S ohledem na výše uvedené důvody pro vynaložení úsilí na provedení analýzy FMEA se mezi cíle FMEA (či FMECA) může zahrnout:

- a) zevrubná identifikace a vyhodnocení všech nežádoucích důsledků ve vy-mezených hranicích analyzovaného systému a posloupnosti událostí, které způsobil zjištěný způsob poruchy objektu z jakýchkoliv příčin na rozličných stupních funkční hierarchie systému
- b) stanovení kritičnosti nebo priority zaměření pozornosti/zmírnění (viz kapi-tolu 6 normy) každého způsobu poruchy s ohledem na správnou funkci či technické parametry a na dopad na dotýčný proces
- c) klasifikace zjištěných způsobů poruch podle příslušných charakteristik včetně snadnosti jejich detekce, podle způsobilosti být diagnostikován, podle testovatelnosti, kompenzace poruch a provozních opatření (opravy, údržby, logistiky atd.)
- d) zjištění funkčních poruch systému a odhad míry závažnosti a pravděpodob-nosti poruchy
- e) vypracování plánu na zlepšení návrhu, aby se zmírnily způsoby poruch
- f) podpora vývoje efektivního vývoje plánu údržby, aby se zmírnily následky nebo aby se snížila pravděpodobnost vzniku poruchy (viz IEC 60300-3-11)

Poznámka: Když se nějaké ustanovení zabývá kritičností nebo pravděpodobností výskytu, komentáře se týkají metodiky FMECA.

## Kapitola 5: Analýza způsobů a důsledků poruch

### 5.1 Všeobecné úvahy

Ve způsobu provádění a prezentace analýzy FMEA tradičně existují značné rozdíly. Tato analýza se obvykle provádí zjišťováním způsobů poruch, jejich příslušných příčin a bezprostředních a konečných důsledků. Výsledky analýzy mohou být prezentovány na pracovních listech, které obsahují jádro zásadně důležitých informací pro celý systém a podrobnosti vypracované pro tento specifický systém. V těchto listech jsou uvedeny způsoby, jakými by mohlo u systému dojít k poruše, součástí a jejich způsoby poruch, které by mohly způsobit poruchu systému, a příčina (příčiny) výskytu každého jednotlivého způsobu poruch.

Úsilí vynaložené na analýzu FMEA složitých produktů může být velmi značné. Toto úsilí může být někdy sníženo tím, že se bere v úvahu, že návrh některých dílčích montážních sestav nebo jejich dílů nemusí být zcela nový, a identifikují se ty části návrhu produktu, které se opakují nebo jsou modifikací předchozího návrhu produktu. V nově zpracovávané analýze FMEA se mají pokud možno co nejvíce použít informace o těchto existujících dílčích montážních sestavách. Analýza má též poukázat na potřebu případné zkoušky nebo úplné analýzy nových význačných rysů a objektů. Jakmile je vypracována podrobná analýza FMEA nějakého návrhu, může být aktualizována a zlepšena pro následující generace tohoto návrhu, na což se vynaloží značně menší úsilí než na zcela novou analýzu.

Při použití existující analýzy FMEA předchozí verze produktu je zásadně důležité se ujistit, že je opakovaný návrh skutečně použit stejným způsobem a při stejném namáhání jako předchozí návrh. Nová provozní namáhání vlivy prostředí mohou vyžadovat, aby se přezkoumala dříve dokončená analýza FMEA. Odlišná provozní namáhání nebo namáhání vlivy prostředí mohou vyžadovat, aby se vypracovala zcela nová analýza FMEA, při které se vezmou v úvahu nové provozní podmínky.

Postup analýzy FMEA se skládá z následujících čtyř hlavních etap:

- a) stanovení základních pravidel provádění analýzy FMEA a plánování a vypracování harmonogramu, aby bylo zajištěno, že je k provedení analýzy k dispozici dostatečná doba a odborná kvalifikace
- b) provedení analýzy FMEA s použitím vhodného pracovního listu či jiných prostředků, jako jsou logické diagramy nebo stromy poruchových stavů
- c) shrnutí a vypracování zprávy o analýze, která bude obsahovat závěry a příslušná doporučení
- d) aktualizace analýzy FMEA, jakmile pokročí vývojové činnosti

## 5.2 Předběžné úkoly

### 5.2.1 Plánování analýzy

Do celkového plánu programu mají být začleněny činnosti prováděné při analýze FMEA, která se použije. Tento popis může být uveden jako souhrnný popis nebo to může být odkaz na zdrojový dokument, který obsahuje popis metody.

Plán má obsahovat tyto body:

- jasné vymezení specifických účelů analýzy a očekávaných výsledků
- rozsah platnosti nynější analýzy v podobě toho, jak se má FMEA soustředit na určité prvky návrhu. Rozsah platnosti má odrážet vyzrálost návrhu a prvky návrhu, které mohou být považovány za rizikové, protože provádějí kritickou funkci nebo protože použitá technologie není vyzrálá.
- popis toho, jak nynější analýzy zajišťuje celkovou spolehlivost projektu
- identifikovaná opatření použitá k řízení revizí analýzy FMEA a příslušné dokumentace. Má být specifikováno řízení revizí dokumentů a pracovních listů analýzy a metody jejich archivace
- účast konstruktérů na analýze tak, aby byli k dispozici, když jsou zapotřebí
- jasně vyznačené klíčové milníky harmonogramu projektu, aby bylo zajištěno, že bude analýza provedena včas
- způsob uzavření všech opatření identifikovaných v procesu zmírňování zjištěných způsobů poruch, na něž je nutné se zaměřit

Plán má odrážet konsenzus všech účastníků a má být schválen vrcholovým vedením projektu. Při konečném přezkoumání dokončené analýzy FMEA v závěrečné etapě návrhu produktu nebo analýzy FMEA jeho výrobního procesu (FMEA procesu) se identifikují všechna zaznamenaná opatření pro zmírnění dotyčných způsobů poruch a stanoví se způsob jejich uzavření.

### 5.2.2 Struktura systému

#### 5.2.2.1 Informace o struktuře systému

Do informace o struktuře systému mají být zahrnuty následující položky:

- a) různé prvky systému s jejich charakteristikami, technickými parametry, rolami a funkcemi
- b) logická spojení a povaha záloh
- c) úroveň zálohování a povaha záloh

- d) pozice a důležitost systému v celém funkčním celku (pokud možno)
- e) vstupy a výstupy systému
- f) změny struktury systému pro měnící se provozní režimy

Pro všechny uvažované stupně rozčlenění systému až do nejvyššího stupně je nutné mít informace týkající se funkcí, charakteristik a technických parametrů, aby se FMEA mohla řádně zaměřit na ty způsoby poruch, které znemožňují plnit jakoukoliv z těchto funkcí.

### 5.2.2.2 Vymezení hranice systému pro analýzu

Hranice systému tvoří fyzické a funkční rozhraní mezi systémem a jeho okolním prostředím včetně jiných systémů, které s analyzovaným systémem na sebe vzájemně působí. Vymezení hranice systému pro analýzu má odpovídat hranici, jak je vymezena pro návrh a údržbu. Tento postup se má aplikovat na systém na jakémkoliv stupni. Systémy a/nebo součásti, které se nacházejí mimo hranice, mají být explicitně specifikovány za účelem jejich vyloučení.

Vymezení hranice systému je pravděpodobně více ovlivněno návrhem, zamýšleným použitím, napájecím zdrojem nebo komerčními kritérii než optimálními požadavky na analýzu FMEA. Pokud je však možné vymezit hranice tak, aby se usnadnila analýza FMEA systému a její začlenění do jiných příbuzných studií v programu, je takové opatření výhodnější. Zejména tomu tak je, jestliže je systém funkčně složitý s mnoha vzájemnými propojeními mezi objekty uvnitř hranice a s mnoha výstupy překračujícími tuto hranici. V takových a softwaru, aby se omezil počet vstupních a výstupních spojů k jiným systémům. Tento postup by mohl vést ke snížení počtu důsledků poruch systému.

Má se věnovat pozornost zajištění, aby se zapomnělo na jiné systémy nebo součásti nacházející se mimo hranice daného systému tím, že nevýslovně vyjádří, že jsou tyto systémy nebo součásti z konkrétní studie vyloučeny.

### 5.2.2.3 Úrovně analýzy

Je důležité stanovit rozčlenění systému, který se bude používat pro analýzu. Systémy lze například rozložit podle funkce na subsystemy, výměnné jednotky nebo jednotlivé součásti. Základní pravidla volby stupňů rozčlenění systému závisí na požadovaných výsledcích a na dostupnosti informací o návrhu. Užitečné jsou následující směrnice.

- a) Nejvyšší stupeň rozčlenění v rámci systému se volí podle koncepce návrhu a specifikovaných požadavků na výstup.

- b) Nejnižší stupeň rozčlenění v rámci systému, na němž je analýza efektivní, je takový stupeň, pro nějž jsou k dispozici formace potřebné ke stanovení a popisu funkcí. Volbu vhodného stupně rozčlenění systému ovlivňují předchozí zkušenosti. Méně podrobná analýza může být oprávněná u systému založeného na vyzrálém návrhu s dobrou bezporuchovostí, udržovatelností a dobrým výkazem bezpečnosti. Naopak větší podrobnosti a příslušně nižší stupeň rozčlenění systému se doporučuje pro nově navržený systém nebo systém s neznámou bezporuchovostí v minulosti.
- c) Hodnotným vodítkem pro stanovení nejnižších stupňů rozčlenění systému může být specifikovaná nebo zamýšlená údržba a stupeň opravy.

V analýze FMEA závisí specifikace způsobů poruch, příčin poruch a důsledků poruch je způsob poruchy, který je zase příčinou důsledku na vyšším stupni, poruchy dílu. Porucha dílu je potom příčinou poruchy modulu (důsledku), který je sám příčinou poruchy subsystému. Důsledek příčiny na jednom stupni rozčlenění systému se tedy stává příčinou dalšího důsledku na vyšším stupni.

#### 5.2.2.4 Reprezentace struktury systému

Velmi užitečnými pomocnými prostředky analýzy jsou symbolické reprezentace struktury a provozu systému, zejména diagramy.

Mají se vytvářet jednoduché diagramy, ve kterých jsou zvýrazněny všechny funkce, které jsou pro systém zásadně důležité. V diagramu jsou bloky spojeny čarami, které představují vstupy a výstupy každé funkce. Obvykle není nutné přesně popsat povahu každé funkce a každého vstupu. Aby byly pokryty různé etapy provozu systému, může se použít několik diagramů.

Jak návrh systému pokračuje, může se vytvářet blokový diagram součástí s bloky představujícími skutečné součásti nebo díly. S těmito dodatečnými znalostmi je možné přesněji identifikovat potenciální způsoby a příčiny poruch.

Diagramy mají zobrazovat jakékoliv sériové a záložní vztahy mezi prvky a funkční vzájemné závislosti mezi nimi. To umožňuje sledovat funkční poruchy v celém systému. Je možné, že bude k zobrazení alternativních režimů provozu systému zapotřebí více než jeden diagram. Pro každý provozní režim může být zapotřebí samostatný diagram. Blokový diagram má přinejmenším obsahovat:

- a) rozčlenění systému na větší subsystémy včetně funkčních vztahů
- b) všechny vhodně označené vstupy a výstupy a identifikační čísla, pomocí kterých lze na každý subsystém odkazovat
- c) všechny zálohy, alternativní cesty signálu a jiné technické vlastnosti, které poskytují ochranu proti poruchám systému

### 5.2.2.5 Uvedení systému do provozu, provoz, řízení a údržba

Je třeba specifikovat stav různých provozních podmínek systému, jakož i změny konfigurace nebo pozice systému a jeho součástí během různých etap provozu. Mají se stanovit i minimální technické parametry požadované na systému tak, aby mohla být jasně pochopena kritéria jeho úspěchu a/nebo poruchy. Takové specifické požadavky, jako je pohotovost nebo bezpečnost, se mají uvážit v podobě specifikovaných minimálních úrovní technických parametrů/výkonnosti, které je nutné dosáhnout, a maximálních úrovní škod nebo újmy, které se budou akceptovat. Je nutné mít přesné znalosti o:

- a) době trvání každé funkce systému, k jejímuž provedení může být systém vyzván
- b) časovém intervalu mezi periodickými zkouškami
- c) době, která je k dispozici pro opatření k nápravě před výskytem závažných následků pro systém
- d) celém funkčním celku, okolním prostředí a/nebo personálu, včetně rozhraní a interakcí s obsluhou
- e) provozních postupech během náběhu, odstavení a jiných přechodných změn provozu systému
- f) řízení během těchto etap provozu
- g) preventivní údržbě a/nebo údržbě po poruše
- h) postupech rutinního zkoušení, pokud se používá

Bylo již uvedeno, že analýzu FMEA lze mimo jiné použít k tomu, aby napomáhala při vývoji strategie údržby. Jestliže však byla strategie údržby stanovena předem, mají být informace o pracovištích a zařízení údržby a o náhradních dílech známy jak u preventivní údržby, tak u údržby po poruše.

### 5.2.2.6 Prostředí systému

Podmínky prostředí systému mají být specifikovány včetně podmínek okolí a podmínek vytvářených jinými systémy v jeho blízkosti. Systém má být podrobně popsán s ohledem na vztahy, závislosti nebo vzájemná propojení s pomocnými nebo jinými systémy a s rozhraními s lidmi.

V etapě návrhu nejdou obvykle všechny tyto skutečnosti známy, a tudíž bývá zapotřebí použít aproximace a předpoklady. Jak projekt pokračuje, dat zpravidla narůstají a analýzy FMEA se modifikuje, přičemž se v ní berou v úvahu nové informace nebo změněné předpoklady či aproximace. FMEA bývá často užitečná při vymezení požadovaných podmínek.

### 5.2.3 Stanovení způsobu poruchy

Úspěšný provoz daného systému je závislý na technických parametrech určitých kritických prvků systému. Klíčem k vyhodnocení technických parametrů systému je zjištění těchto kritických prvků. Postupy zjišťování způsobů poruch, jejich příčin a důsledků mohou být efektivně zdokonaleny tím, že se vypracuje seznam způsobů poruch, které lze předvídat z hlediska:

- a) použití systému
- b) konkrétních použitých prvků systému
- c) režimu provozu
- d) patřičných provozních specifikací
- e) časových omezení
- f) namáhání vlivy prostředí
- g) namáhání vlivy provozu

Příklad seznamu obecných způsobů poruch je uvedený v tabulce P5-1.

*Tabulka P5-1: Příklad seznamu obecných způsobů poruch.*

1	Porucha během provozu
2	Porucha zahájení provozu v předepsaném čase
3	Porucha ukončení provozu v předepsaném čase
4	Předčasný provoz

Poznámka: Tento seznam je pouze příklad. Pro odlišné typy systémů by mohly být požadovány jiné seznamy.

Prakticky každý typ způsobu poruchy lze zařadit do jedné či více těchto kategorií. Tyto obecné kategorie způsobů poruch však mají pro definitivní analýzu příliš široký rozsah platnosti; v důsledku toho je zapotřebí tento seznam rozšířit, aby se vytvořily specifitější kategorie. Když se seznam používá spolu se specifikacemi technických parametrů pokrývajících vstupy a výstupy v blokovém diagramu bezporuchovosti, lze identifikovat a popsat všechny potenciální způsoby poruch. Je třeba poznamenat, že daný způsob poruchy může mít několik příčin.

Je důležité, aby se provedlo vyhodnocení všech objektů v hranicích systému na nejnižším stupni rozčlenění odpovídajícím cílům analýzy, aby se zjistily všechny potenciální způsoby poruch. Poté lze zkoumat, jaké jsou možné příčiny poruch a také důsledky poruch pro funkci subsystému a systému.

Dodavatelé objektů mají ve svých produktech identifikovat potencionální způsoby poruch. Data o typických způsobech poruch funkce, která by se při této identifikaci pomáhala, lze hledat v těchto oblastech:

- a) u nových objektů lze odkázat na jiné objekty s obdobnou funkcí a strukturou a na výsledky zkoušek provedených na těchto objektech při vhodných úrovních namáhání;
- b) potencionální způsoby poruch nových objektů a jejich příčiny poskytuje analýzy záměru návrhu a podrobná funkční analýzy těchto objektů. Tato metoda se přednostně doporučuje před metodou uvedenou v bodě a), protože namáhání a samotný provoz mohou být odlišné od namáhání a provozu obdobných objektů. Příkladem této situace může být použití signálního procesoru odlišného od procesoru použitého v obdobném návrhu;
- c) u objektů, které jsou v provozu, lze nahlédnout do provozních záznamů a dat o poruchách;
- d) potencionální způsoby poruch lze odvodit z funkčních a fyzických parametrů typických pro provoz objektu.

Je důležité, aby z důvodu nedostatku dat nebyly některé způsoby poruch objektu vynechány a aby byly počáteční odhady zlepšovány podle výsledků zkoušek a pokroku návrhu. Stav takových odhadů se má v analýze FMEA zaznamenávat.

Vrcholně důležité je zjišťování způsobů poruch a, pokud je to nutné, stanovení nápravných opatření v návrhu, preventivních opatření zjišťování kvality nebo preventivních opatření údržby. Důležitější než znát pravděpodobnost výskytu způsobů poruch je zjistit a pokud možno zmírnit jejich následky pomocí návrhových opatření. Když je obtížné přiřadit těmto opatřením priority, může být nutné provést analýzu kritičnosti.

#### **5.2.4 Příčiny poruch**

Je třeba zajistit a popsat nejpravděpodobnější příčiny každého potencionálního způsobu poruch. Jelikož může mít způsob poruchy více než jednu příčinu, je zapotřebí zjistit a popsat nejpravděpodobnější potencionální nezávislé příčiny každého způsobu poruchy.

Zjistit a popsat příčin poruch není vždy u všech způsobů poruch zjištěných při analýze nutné. Zjišťování a popis příčin poruch, jakož i návrhů na jejich zmírnění, se má provádět na základě důsledků poruch a jejich závažnosti. Čím závažnější jsou důsledky způsobu poruch, tím přesněji mají být zjištěny a popsány příčiny poruch. Jinak může pracovník provádějící analýzu věnovat zbytečné úsilí na zjišťování příčin poruch takových způsobů poruch, které nemají žádný nebo mají jen velmi malý vliv na funkčnost systému.



Příčiny poruch mohou být stanoveny na základě analýzy poruch v provozu nebo poruch ve zkušebních vzorcích. Když je návrh nový a neexistuje žádný předchozí návrh, mohou být příčiny poruch stanoveny na základě vyžádání názoru odborníků.

Když se zjistí příčiny každého způsobu poruch, vyhodnotí se doporučená opatření založená na jejich odhadované pravděpodobnosti výskytu a závažnosti jejich důsledků.

## **5.2.5 Důsledky poruch**

### **5.2.5.1 Stanovení důsledků poruch**

Důsledek poruch je následek způsobu poruch pro provoz, funkcí nebo stav objektu. Důsledek poruchy může být způsoben jedním či více způsoby poruch jednoho nebo více objektů.

Následky každého způsobu poruch pro provoz, funkci nebo stav prvku systému je nutné zjistit, vyhodnotit a zaznamenat. Vždy když je to vhodné, se mají též uvážit činnosti údržby a cíle systému. Důsledek poruchy též může ovlivnit následující vyšší stupeň nakonec i nejvyšší analyzovaný stupeň rozčlenění. Na každém stupni se tudíž má vyhodnotit důsledek poruch pro vyšší stupeň.

### **5.2.5.2 Místní důsledky poruch**

Výraz „místní důsledek“ se vztahuje k důsledkům způsobu poruch pro uvažovaný prvek systému. Mají být popsány následky každé možné poruchy pro výstup objektu. Účelem zjišťování místních důsledků je poskytnout základ pro posuzování při hodnocení existujících alternativních dodávek nebo při navrhování doporučených opatření k nápravě. V určitých případech nemusí mít místní důsledek mimo samotný způsobu poruch žádný vliv.

### **5.2.5.3 Důsledky poruch na úrovni systému**

Při zjišťování konečných důsledků se stanoví a vyhodnotí dopad možné poruchy na nejvyšším stupni rozčlenění, na úrovni systému, pomocí analýzy všech mezilehlých stupňů. Popsaný konečný důsledek může být výsledkem několika poruch. (Například porucha bezpečnostního zařízení vede ke katastrofickému konečnému důsledku pouze v případě, že bude mít bezpečnostní zařízení poruchu a základní funkce, pro kterou je bezpečnostní zařízení navrženo, překročí přípustné meze). Tyto konečné důsledky vyplývající z vícenásobné poruchy mají být uvedeny v pracovních listech.

## **5.2.6 Metoda detekce poruch**

U každého způsobu poruchy má pracovník provádějící analýzu stanovit způsob, jakým se porucha detekuje, a prostředky, jejichž pomocí je uživatel nebo údržbář

informován o poruše. Detekci (zjišťování) poruch je možné realizovat pomocí automatické význačné vlastnosti návrhu (zabudovaného testu), zavedením speciálního kontrolního postupu před provozem systému nebo kontrolu během činností údržby. Detekce může být prováděna při spuštění systému nepřetržitě během provozu či v předepsaných intervalech. V každém případě má detekce poruchy a její signalizace zabránit vzniku nebezpečného provozního stavu.

Jiné způsoby poruch než uvažovaný způsob poruchy, které vyvolávají stejné projevy, se mají analyzovat a zařadit do seznamu. Má se uvážit potřebnost samostatné detekce poruchy záložních prvků během provozu.

V analýze FMEA návrhu se u detekce poruch uvažuje, s jakou pravděpodobností, kdy a kde bude nějaký nedostatek v návrhu identifikován (přezkoumáním, analýzou, simulací, zkouškou atd.). Při analýze FMEA procesu se u detekce poruch uvažuje, jak asi a kde v procesu lze nějaký nedostatek zjistit a s jakou pravděpodobností+ např. zda jej zjistí obsluha, zda se zjistí pomocí statistické regulace procesu, při postupu kontroly kvality nebo při pozdějších krocích v procesu.

### **5.2.7 Opatření pro kompenzaci poruch**

Zjišťování jakýchkoliv význačných vlastností návrhu na daném stupni rozčlenění systému nebo jiných opatření, která mají schopnost zabránit nebo snížit důsledek daného způsobu poruchy, je mimořádně důležité. Při analýze FMEA se má tedy jasně ukázat skutečné chování takových vlastností za přítomnosti tohoto způsobu poruchy. Mezi jiná opatření proti poruše, která mají být při analýze FMEA zaznamenána, se zahrnují:

- a) záložní objekty, které umožňují pokračovat v provozu, jestliže má jeden či více prvků poruchu
- b) alternativní způsoby provozu
- c) monitorovací či poplachová zařízení
- d) jakékoliv jiné prostředky umožňující efektivní provoz nebo omezující škody

Během procesu návrhu mohou být funkční prvky (hardware či software) objektu opakovaně nově uspořádány či rekonfigurovány nebo může být změněna jejich způsobilost. V každé etapě má být významnost zjištěných způsobů poruch a analýza FMEA aktualizována nebo dokonce zopakována.

### **5.2.8 Klasifikace závažnosti**

Závažnost je posouzení významnosti důsledku způsobu poruchy pro provoz objektu. Klasifikace závažnosti důsledků silně závisí na aplikaci analýzy FMEA a je nutné uvážit několik faktorů:

- povahu systému ve vztahu k možným důsledkům pro uživatele nebo životní prostředí vyplývajícím z poruchy
- funkční výkonnost (technické charakteristiky) systému nebo procesu
- smluvní požadavky kladené zákazníkem
- obecné bezpečnostní požadavky vyplývající z vládních nařízení nebo oborové bezpečnostní požadavky platné v určitých průmyslových odvětvích
- požadavky vyplývající ze záruky

V tabulce P5-2 je uveden názorný příklad souboru kvalitativní klasifikace závažnosti pro produkt u jednoho typu analýzy FMEA.

*Tabulka P5-2: Názorný příklad kvalitativní klasifikace závažnosti konečných důsledků.*

Třída	Úroveň závažnosti	Následek pro osoby nebo životní prostředí
IV	Katastrofická	Způsob poruchy, který by mohl potenciálně vést k poruše základních funkcí systému a tudíž způsobit vážnou škodu systému a jeho prostředí a/nebo zranění osob.
III	Kritická	Způsob poruchy, který by mohl potenciálně vést k poruše základních funkcí systému a tudíž způsobit značnou škodu systému a jeho prostředí, ale není vážnou hrozbou pro život nebo zranění.
II	Okrajová	Způsob poruchy, který by mohl potenciálně zhoršit technické parametry (výkonnost) funkce (funkcí) bez znatelné škody pro systém nebo hrozby pro život nebo zranění.
I	Bezvýznamná	Způsob poruchy, který by mohl potenciálně zhoršit funkce systému, ale nezpůsobí žádné škody systému a není hrozbou pro život nebo zranění.

### 5.2.9 Četnost či pravděpodobnost výskytu

Za účelem přiměřeného posouzení důsledku či kritičnosti daného způsobu poruch se má stanovit četnost či pravděpodobnost výskytu každého způsobu poruch.

Pro stanovení pravděpodobnosti výskytu způsobu poruchy je vedle publikovaných informací o intenzitě poruch velmi důležité uvážit profil provozu (působící prostředí, mechanická a/nebo elektrická namáhání) každé součásti, která přispívá k pravděpodobnosti výskytu způsobu poruchy, a to z toho důvodu, že se intenzity poruch součástí a následná intenzita poruch uvažovaného způsobu poruchy ve většině případů zvyšují s mocninnou závislostí či exponenciálně se zvýšeným působících namáhání. Pravděpodobnost výskytu způsobů poruch může být u návrhu odhadnuta z těchto údajů:

- z dat ze zkoušek životnosti součástí
- z dostupné databáze intenzit poruch
- z dat o poruchách v provozu
- u dat o poruchách obdobných objektů nebo součástí dané třídy

Když se odhadne pravděpodobnost výskytu, musí se FMEA zaměřit na časové období, pro které se učinily odhady. Obvykle to je záruční doba nebo předem stanovené období života tohoto objektu či produktu.

Použití četnosti a pravděpodobnosti výskytu bude dále objasněno v popisu analýzy kritičnosti.

### 5.3. Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA)

#### 5.3.1 Účel analýzy

Písmeno C přidané do zkratky FMEA vyznačuje, že se do analýzy způsobů poruch zahrnuje též analýza kritičnosti. Stanovení kritičnosti znamená přidání kvalitativního ukazatele velikosti důsledku způsobu poruch. Kritičnost má velký počet definic a ukazatelů, většina z nich má podobný význam: dopad nebo významnost způsobu poruchy, která by mohla vyžadovat, aby se na tento způsob poruch zaměřila pozornost a aby se zmírnil. Některé z těchto ukazatelů jsou vysvětleny v článcích 5.3.2 a 5.3.4 normy. Účelem analýzy kritičnosti je kvantifikovat relativní velikost každého důsledku poruchy jako prostředek pomáhající při rozhodování tak, aby mohla být pomocí kombinace kritičnosti a závažnosti stanovena priorita opatření ke zmírnění nebo minimalizaci důsledků určitých poruch.

#### 5.3.2 Riziko $R$ a číslo priority rizika ( $RPN$ )

Jednou z metod kvantitativního stanovení kritičnosti je číslo priority riziky  $RPN$  (risk priority numer). Riziko je zde hodnoceno subjektivním ukazatelem závažnosti důsledku a odhadem očekávané pravděpodobnosti jeho výskytu v předem stanoveném časovém období předpokládaném pro analýzu. V některých případech, kdy nejsou tyto ukazatele k dispozici, může být nezbytné se odkázat na jednodušší formu nenumerické analýzy FMEA.

Obecný vztah týkající se ukazatele potencionálního rizika  $R$  v analýze FMECA se v některých typech analýzy vyjadřuje takto:

$$R = S \times P,$$

kde

- S* je bezrozměrné číslo, které klasifikuje závažnost, tj. odhad, jak silně budou důsledky poruchy ovlivňovat systém nebo uživatele,
- P* je též bezrozměrné číslo, které vyznačuje pravděpodobnost výskytu. Když je menší než 0,2, může být nahrazeno číslem kritičnosti *C*, které se používá v některých kvantitativních metodách analýzy FMEA a které je vysvětleno v 5.3.4, tj. odhadem pravděpodobnosti, že nastane daný důsledek poruchy.

V některých aplikacích analýzy FMEA nebo FMECA se dodatečně rozlišuje úroveň detekce poruchy na úrovni systému. V těchto aplikacích se používá další kategorie pro detekci poruchy *D* (což je rovněž bezrozměrné číslo) pro vytvoření čísla priority rizika *RPN*:

$$RPN = S \times O \times D,$$

kde

- O* klasifikuje pravděpodobnost výskytu nějakého způsobu poruch v předem stanoveném nebo určeném časovém období – ačkoliv tato veličina může být definována spíše jako číslo třídy (klasifikační číslo) pravděpodobnosti výskytu než skutečná pravděpodobnost,
- D* klasifikuje detekci, tj. je to odhad naděje, že se porucha zjistí a eliminuje před tím, než bude mít vliv na systém nebo zákazníka. Tato čísla se zpravidla klasifikuje v obráceném pořadí než číslo závažnosti či výskytu: čím vyšší je detekční číslo, tím méně je pravděpodobné, že dojde k detekci. Nižší pravděpodobnost detekce v důsledku toho vede k vyššímu číslu *RPN* a vyšší prioritě řešení daného způsobu poruch.

Číslo priority rizika se potom může použít ke stanovení priority při zaměřování se na zmírnění způsobů poruch. Kromě velikosti čísla priority rizika má na rozhodování o zmírňování vliv především závažnost způsobu poruch, což znamená, že existují způsoby poruch s podobným nebo totožným číslem *RPN*, má se pozornost zaměřit na ty způsoby poruch, které mají vyšší čísla závažnosti.

Tyto vztahy mohou být číselně vyhodnoceny buď na spojité, nebo diskrétní stupnici (konečném počtu stanovených hodnot).

Způsoby poruch se potom seřadí podle svých čísel *RPN* a vysokému číslu *RPN* se přiřadí vysoká priorita. V některých aplikacích nejsou přijatelné důsledky s číslem *RPN* převyšujícím stanovenou prahovou hodnotu, zatím co v jiných aplikacích je dáována vysoká důležitost vysokým číslům závažnosti bez ohledu na hodnotu čísla *RPN*.

V různých typech analýzy FMECA se hodnotám *S*, *O* a *D* přiřazují různé stupnice. V některých analýzách se používají stupnice od 1 do 4 či 5, v některých, jako například

v analýze FMECA široce používané v automobilovém průmyslu k analýze návrhu známé jako DFMECA (Design FMEA) a analýze výrobního procesu známe jako PFNECA (Proces FMEA), se používají stupnice pro všechny tři atributy od 1 do 10.

### 5.3.3 Vztah mezi analýzou FMECA a analýzou rizika

Kritičnost spolu se závažností je ukazatelem rizika, který se liší od obvykle přijímaných ukazatelů rizika pouze v tom, že přístup k jeho vyhodnocení méně důsledný a tudíž často méně nákladný. Rozdíl je patrný nejen ve způsobu předpovědi závažnosti důsledku poruchy, ale též v tom, že je možné v typickém postupu zdola nahoru aplikovaném v analýze FMECA modelovat daleko méně složitou interakci mezi přispívajícími faktory. Analýzy FMECA také obvykle vede k relativní klasifikaci příspěvků k celkovému riziku, zatímco analýzy rizika u vysoce rizikových systému obecně směřuje k přijatelnosti rizika. U málo rizikových a málo složitých systémů však může být analýza FMECA velmi nákladově efektivní a vhodnou metodou. Kdekoliv se během analýzy FMECA rozpozná pravděpodobná možnost vzniku analýza rizika (PRA – Probabilistic risk analysis).

FMECA se tudíž nemá používat jako jediný základ pro posouzení, zda je riziko určitého důsledku vysoce rizikového nebo velmi složitého systému přijatelně malé či nikoliv, dokonce když je odhad četnosti a závažnosti založen na důvěryhodných datech. Toto by mělo být úkolem pravděpodobnostní analýzy rizika, kde lze brát v úvahu též parametry (a jejich interakce), které mají větší vliv, např. dobu vystavení riziku, pravděpodobnost zabránění rizika, latenci poruchy, mechanismy detekce poruchových stavů.

Při používání důsledků poruch zjištěných při analýze FMEA se každý důsledek zařadí do vhodné třídy závažnosti. Četnost této události se vypočítá z dat o poruchách nebo z odhadů pro dotyčný díl. Po vynásobení příslušnou dobou úkolu dává tato četnost číslo kritičnosti, které je potom možné použít na stupnici buď podle své vlastní hodnoty, nebo jestliže tato stupnice představuje pravděpodobnost výskytu události, potom se tato pravděpodobnost výskytu změní na stupnici. Třída závažnosti a třída kritičnosti (či pravděpodobnosti výskytu) každého důsledku společně tvoří velikost důsledku. Lze rozlišovat dva hlavní přístupy k posuzování kritičnosti: přístup pomocí matice kritičnosti a pojetí s použitím čísla priority rizika (*RPN*).

### 5.3.4 Stanovení intenzity poruch, pravděpodobnosti a čísla kritičnosti způsobu poruch

Jestliže jsou k dispozici poruch u způsobů poruch podobných objektů a jestliže byly tyto intenzity stanoveny za obdobných podmínek namáhání vlivy prostředí a provozu, jako jsou podmínky předpokládané u analyzovaného systému, mohou být četnosti událostí těchto důsledků přímo přidány k analýze FMECA. Jestliže, a to je častější případ, jsou k dispozici intenzity poruch spíše pro objekty než pro způsoby poruch

a pro odlišné podmínky namáhání vlivy prostředí a provozu, je zapotřebí intenzity poruch způsobů poruch vypočítat. Obecně platí následující vztah:

$$\lambda_i = \lambda_j \times \alpha_i \times \beta_i,$$

kde

- $\lambda_i$  označuje odhad intenzity poruch pro způsob poruchy  $i$ ; předpokládá se, že je tato intenzita poruch konstantní
- $\lambda_j$  znamená intenzitu poruch součástí  $j$
- $\alpha_i$  je podíl způsobu poruch  $i$  ze všech způsobů poruch, tj. pravděpodobnost, že bude objekt mít způsob poruchy  $i$
- $\beta_i$  podmíněná pravděpodobnost důsledku poruch za předpokladu, že má objekt způsob poruchy  $i$

Hlavní nedostatky tohoto přístupu spočívají v implicitním předpokladu konstantní intenzity poruch a ve skutečnosti, že mnohé faktory jsou pouze předpovědi nebo nejlepší odhady. To je zejména případ, kdy součásti systému nemohou mít s nimi sdruženou intenzitu poruch a mají jen vypočtenou pravděpodobnost poruchy pro specifickou aplikaci, její dobu trvání a příslušná namáhání, jako tomu je u mechanických součástí a systémů.

Podmínky prostředí, zatížení a údržby, které se odlišují od podmínek vztahujících se k datům o intenzitě poruch, se zohledňují pomocí modifikujících faktorů. Návod pro vhodné hodnoty těchto modifikujících faktorů lze nalézt v publikacích zabývajících se daty o bezporuchovosti. Zvláštní péči je třeba věnovat zajištění, aby byly zvolené modifikátory správné a použitelné pro daný systém a jeho provozní podmínky.

V některých aplikacích, jako je kvantitativní přístup k analýze kritičnosti, se místo intenzity poruch způsobu poruch  $\lambda_i$  používá číslo kritičnosti  $C_i$  (které se nevztahuje k obecnému termínu „kritičnost“ a lze předpokládat, že má odlišný význam). Číslo kritičnosti vytváří vazbu mezi podmíněnou četností poruch a dobou provozu, což potom může pomoci obdržet realističtější odhad rizika nějakého způsobu poruch během předem stanoveného období používání produktu.

$$C_i = \lambda_i \times t_j$$

$$C_i = \lambda_j \times \alpha_i \times \beta_i \times t_j,$$

kde

- $t_j$  označuje dobu provozu součástí během celé předem stanovené doby použité při analýze FMECA, pro kterou se tato pravděpodobnost vyhodnocuje – dobu aktivního provozu součástí.

Číslo kritičnosti součástí, která má  $m$  způsobů poruch, je potom:

$$C_j = \sum_{i=1}^m \lambda_j \times \alpha_i \times \beta_i \times t_j$$

Je třeba si povšimnout, že se číslo kritičnosti nevztahuje k samostatnému termínu kritičnosti. Je to právě jen hodnota vypočtená pro určité typy analýzy FMECA v takovém kontextu, že to je relativní ukazatel následku způsobu poruchy a jeho pravděpodobnosti výskytu. Číslo kritičnosti je zde ukazatelem rizika a nikoliv ukazatelem pravděpodobnosti výskytu.

Ke stanovení pravděpodobnosti výskytu  $P_i$  způsobu poruch za dobu  $t_j$  z vypočtené kritičnosti se používá vztah.

$$P_i = 1 - e_i^{-c}$$

S použitím druhé aproximace, když jsou intenzity poruch způsobů poruch a výsledná čísla kritičnosti malá, lze říci, že pro pravděpodobnosti výskytu menší než 0,2 (kdy by se kritičnost rovnala 0,223) jsou hodnoty čísla kritičnosti a pravděpodobnosti poruchy velmi podobné.

V případě proměnných intenzit poruch nebo četností poruch se má vypočítat spíše pravděpodobnost výskytu než kritičnost, která je založena na předpokladu konstantní intenzity poruch (četnosti).

#### 5.3.4.1 Matice kritičnosti

Kritičnost lze prezentovat v matici kritičnosti, jak je ukázáno na obrázku P5-1. Je třeba poznamenat, že neexistuje žádná universální definice kritičnosti, ale že je nutné, aby kritičnost definoval pracovník provádějící analýzu a aby ji přijalo vrcholové vedení projektu nebo programu. V různých aplikačních odvětvích se tyto definice značně liší.

Z obrázku P5-1 vyplývá, že se závažnost zvyšuje s rostoucím pořadovým číslem, kde číslo IV má nejvyšší závažnost (ztrátu lidského života a/nebo úkolu/provozu, zranění). Rovněž z něho vyplývá, že je pravděpodobnost výskytu na ose Z též reprezentována ve zvyšujícím se pořadí. Jestliže nejvyšší pravděpodobnost dané kategorie výskytu nepřekračuje hodnotu 0,2, jsou si hodnoty pravděpodobnosti výskytu a kritičnosti přibližně rovny. Jedna z matic, které se často používají, má následující stupnici:



klasifikace pravděpodobnosti výskytu	5 (A)			vysoké riziko	
	4 (B)		způsob poruchy 1		
	3 (C)				
	2 (D)			způsob poruchy 2	
	1 (E)	nízké riziko			
		I	II	III	IV
		závažnost			

Obrázek P5-1: Matice kritičnosti podle FMECA.

- Číslo kritičnosti 1 nebo E, nepravděpodobná výskyt, pravděpodobnost výskytu:

$$0 \leq P_i < 0,001$$

- Číslo kritičnosti 2 nebo D, velmi slabý výskyt, pravděpodobnost výskytu:

$$0,001 \leq P_i < 0,01$$

- Číslo kritičnosti 3 nebo C, občasný výskyt, pravděpodobnost výskytu:

$$0,01 \leq P_i < 0,1$$

- Číslo kritičnosti 4 nebo B, pravděpodobný výskyt, pravděpodobnost výskytu:

$$0,1 \leq P_i < 0,2$$

- Číslo kritičnosti 5 nebo A, častý výskyt, pravděpodobnost výskytu:

$$P_i \geq 0,2$$

Obrázek P5-1 je uveden jako pouze příklad. Při jiných metodách může být kritičnost nebo závažnost prezentována s jiným označením a s odlišnými definicemi.

V příkladě uvedeném na obrázku P5-1 má způsob poruchy 1 vyšší pravděpodobnost výskytu než způsob poruchy 2, který má naopak vyšší závažnost. Rozhodování o tom, který způsob poruchy má vyšší prioritu, na kterou je nutné se zaměřit, závisí na způsobu stanovení stupnice závažnosti a tříd četnosti a na principech klasifikace.

Zatímco by v lineární stupnici mohl mít způsob poruchy 1 (jak se obvykle navrhuje v matici) vyšší kritičnost (nebo pravděpodobnost výskytu) než způsob poruch 2, mohou existovat aplikace, kdy má závažnost absolutní prioritu nad četností a způsob poruch 2 je tedy kritičtější způsob poruchy. Další zřejmý poznatek je, že s maticí kritičnosti mohou být smysluplně srovnány pouze ty způsoby poruch, které se vztahují ke stejnému stupni rozčlenění systému, protože způsoby poruch méně složitých systémů mají na nižším stupni rozčlenění obvykle rozčlenění obvykle sklon mít nižší četnost.

Matici kritičnosti (jak je uvedena na obrázku P5-1) lze aplikovat kvalitativně i kvantitativně, jak bylo vysvětleno výše.

### 5.3.5 Posouzení přijatelnosti rizika

Když je požadovaným koncovým produktem analýzy matice kritičnosti, lze ji vyhodnotit na základě přidělených závažností a četností událostí. Přijatelnost rizika se stanovuje subjektivně nebo se řídí profesionálními a finančními rozhodnutími a je odlišná v různých druzích průmyslu. V tabulce P5-3 jsou uvedeny některé příklady tříd přijatelnosti rizika a modifikované matice kritičnosti.

Tabulka P5-3: Matice rizika/kritičnosti.

Četnost výskytu důsledku poruchy	Úrovně závažnosti			
	1 Nevýznamná	2 Okrajová	3 Kritická	4 Katastrofická
5: Četný výskyt	Nežádoucí	Nepřípustné	Nepřípustné	Nepřípustné
4: Pravděpodobný výskyt	Přípustné	Nežádoucí	Nepřípustné	Nepřípustné
3: Občasný výskyt	Přípustné	Nežádoucí	Nežádoucí	Nepřípustné
2: Velice slabý výskyt	Zanedbatelné	Přípustné	Nežádoucí	Nežádoucí
1: Nepravděpodobný výskyt	Zanedbatelné	Zanedbatelné	Přípustné	Přípustné

### 5.3.6 Druhy analýzy FMECA s klasifikačními stupnicemi

Druhy analýzy FMECA popsané v článku 5.3.2 se velmi běžně používají v automobilovém průmyslu k analýze návrhu produktu, jakož i k analýze procesu výroby tohoto produktu.

Metodika analýzy je stejná, jak je popsáno u obecné formy analýzy FMEA/FMECA, s výjimkou definic, které jsou předem stanoveny ve třech tabulkách vypracovaných pro závažnost *S*, výskyt *O* a detekci *D*.

### 5.3.6.1 Alternativní stanovení závažnosti

V tabulce P5-4 je uveden příklad klasifikací závažnosti, které se užívají především v automobilovém průmyslu.

Třída závažnosti se přidělí důsledku poruchy pocházejícímu z každého způsobu poruchy na základě závažnosti důsledku pro celkové technické parametry (výkonnost)

Tabulka P5-4: Závažnost způsobu poruchy.

Závažnost	Kritéria	Klasifikace
Žádná	Žádný zjistitelný důsledek.	1
Velmi málo významná	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozorují nároční zákazníci (méně než 25%).	2
Málo významná	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozoruje 50% zákazníků.	3
Velmi nízká	Skřípající a chrastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozoruje většina zákazníků (více než 75%).	4
Nízká	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí je provozuschopný (jsou provozuschopné) se sníženými technickými parametry. Zákazník je poněkud nespokojen.	5
Střední	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí není provozuschopný (nejsou provozuschopné). Zákazník je nespokojen.	6
Vysoká	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale se sníženou úrovní technických parametrů. Zákazník je velmi nespokojen.	7
Velmi vysoká	Vozidlo není provozuschopné/objekt není provozuschopný (ztráta základní funkce).	8
Nebezpečná s varováním	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe upozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními vyhláškami a nařízeními.	9
Nebezpečná bez varování	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe neupozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními vyhláškami a nařízeními.	10

a bezpečnost systému z hlediska požadavků, cílů a omezení kladených na systém se zřetelem na vozidlo jako systém. To se nejsnadněji provede na listu FMECA. Stanovení závažnosti podle tabulky 4 pro čísla závažnosti 6 a větší je zcela jasné. Stanovení závažnosti pro čísla od 3 do 5 může být subjektivní.

### 5.3.6.2 Alternativní stanovení výskytu

V tabulce P5-5 (též převzaté z automobilového průmyslu) jsou uvedeny příklady kvalitativních ukazatelů výskytu, které je možné použít v pojetí s použitím čísla *RPN*.

Tabulka P5-5: Výskyt způsobu poruchy ve vztahu k četnosti a pravděpodobnosti výskytu.

Výskyt způsobu poruchy	Klasifikace O	Četnost	Pravděpodobnost
Velice slabý: Porucha je nepravděpodobná	1	$\leq 0,010$ na 1000 vozidel/objektů	$\leq 1 \times 10^{-5}$
Nízký: Poměrně málo poruch	2	0,1 na 1000 vozidel/objektů	$1 \times 10^{-4}$
	3	0,5 na 1000 vozidel/objektů	$5 \times 10^{-4}$
Střední: Občasné poruchy	4	1 na 1000 vozidel/objektů	$1 \times 10^{-3}$
	5	2 na 1000 vozidel/objektů	$2 \times 10^{-3}$
	6	5 na 1000 vozidel/objektů	$5 \times 10^{-3}$
Vysoký: Opakující se poruchy	7	10 na 1000 vozidel/objektů	$1 \times 10^{-2}$
	8	20 na 1000 vozidel/objektů	$2 \times 10^{-2}$
Velmi vysoký: Porucha je téměř nevyhnutelná	9	50 na 1000 vozidel/objektů	$5 \times 10^{-2}$
	10	$\geq 100$ na 1000 vozidel/objektů	$\geq 1 \times 10^{-1}$

Poznámka: Pramen: AIAG: Analýza potencionálních způsobů a důsledků poruch FMEA, 3. vydání.

Je třeba si povšimnout, že v tabulce 5 termín „četnost“ používá jako poměrný výskyt v řadě příležitostí během úkolu nebo stanovené životnosti, což lze srovnat s „podílem objektů s poruchou“ nebo s pravděpodobností výskytu, a odpovídající pravděpodobnosti pouze odrážejí tento podíl. Například způsob poruchy, který je ohodnocen hodnotou O (výskyt) rovnou 9, by mohl během předem stanoveného období úkolu způsobit poruchu jednoho ze tří systémů. Zde se stanovení této pravděpodobnosti výskytu musí vztáhnout k časovému období, které je předmětem zájmu. Doporučuje se vyjádřit toto časové období v záhlaví analýzy.

Nejlepší praktický postup je, když se pravděpodobnost výskytu vypočítává pro součásti a jejich způsoby poruch na základě jejich vlastních specifických intenzit poruch při aplikaci očekávaného namáhání (vlivy prostředí a provozu). Když nejsou tyto informace k dispozici, může se použít odhad, ale když se použije, musí být prováděná analýza (záruční době, době života vozidla či jiné); je to vypočtená či odhadnutá pravděpodobnost výskytu tohoto způsobu poruch v časovém období, které je předmětem zájmu. Je nutné si též povšimnout, že na rozdíl od stupnice závažnosti není stupnice výskytu lineární a také není logaritmická. Tudíž je třeba mít na paměti, že je výsledné číslo *RPN* po vypočtení a vyhodnocení též nelineární a je nutné jej používat se zvláštní opatrností.

### 5.3.6.3 Klasifikace pravděpodobnosti zjištění poruchy

V pojetí s použitím čísla *RPN* se musí odhadnout pravděpodobnost, že bude porucha detekována; tj. pravděpodobnost, že se na základě význačných vlastností/pomůcek nebo pomocí postupů obsažených v návrhu zjistí potencionální způsoby poruch včas, aby se zabránilo poruše na úrovni systému. U aplikací zaměřených na proces (FMEA procesu neboli PFMEA) se to vztahuje k pravděpodobnosti, že bude soubor řídicích prvků procesu, který právě probíhá, schopen zjistit a izolovat poruchu před tím, než se tato porucha přenesení do následujících procesů nebo do konečného výstupu produktu.

Zejména u všeobecné použitelnosti produktů, které se mohou používat v několika rozličných systémech a aplikacích, může být obtížné pravděpodobnost detekce odhadnout.

V tabulce P5-6 jsou uvedeny metody stanovení kritérií detekce, jak se používají v automobilovém průmyslu.

### 5.3.6.4 Hodnocení rizika

Po tomto výše popsaném velmi intuitivním přístupu musí následovat klasifikace priority opatření, která se provedou, aby se zajistila nejlepší úroveň bezpečnosti pro zákazníka. Například způsoby poruchy s vysokou závažností (řekněme 10), nízkou intenzitou výskytu (3) a velmi vysokou detekcí (2) může mít mnohem nižší číslo *RPN* (zde 60) než způsob poruchy, který má všechny parametry průměrné (řekněme 5, což v tomto případě vede k hodnotě čísla *RPN* 125). Aby bylo zajištěno, že způsoby poruch s vysokou třídou závažnosti (řekněme 9 či 10) budou mít vysokou prioritu a budou zmírňovány jako první, se tedy často stanovují dodatečné postupy. V takovém případě se má rozhodnutí řídit spíše velikostí závažnosti než samotným číslem *RPN*. V každém případě je pro lepší proces rozhodování dobrou praxí, aby se společně s číslem *RPN* posuzovala i třída závažnosti způsobu poruch.

Čísla priority rizika se stanovují také v jiných metodách FMEA, zejména v těch, které jsou především kvalitativní.

Tabulka P5-6: Kritéria hodnocení detekce způsobu poruch.

Detekce	Kritéria: Pravděpodobnost detekce při řízení návrhu	Klasifikace
Téměř jistá	Při řízení návrhu se bude téměř jistě detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	1
Velmi vysoká	Je velmi vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	2
Vysoká	Je vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	3
Středně vysoká	Je středně vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	4
Střední	Je střední naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	5
Nízká	Je malá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	6
Velmi nízká	Je velmi malá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	7
Slabá	Je slabá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	8
Velice slabá	Je velice slabá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	9
Absolutně nejistá	Při řízení návrhu se nebude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy nebo žádné řízení návrhu neexistuje	10

S použitím výše uvedených tabulek se vypočítávají čísla *RPN* a často se používají jako vodítko pro zmírňování způsobu poruch. Je třeba si uvědomit varování uvedené v článku 5.3.2 a je nutné mít na paměti nedostatky *RPN*.

Některé nedostatky *RPN* jsou:

- mezery v rozsazích: 88% hodnot rozsahu je prázdných, generuje se pouze 120 z 1000 čísel;
- totožná čísla *RPN*: u některých kombinací vedou různé faktory ke stejnému číslu *RPN*;
- citlivost na malé změny: malá změna jednoho faktoru má mnohem větší vliv, když jsou jiné faktory větší, než když jsou malé (například:  $9 \times 9 \times 3 = 243$  a  $9 \times 9 \times 4 = 324$ , naproti tomu  $3 \times 4 \times 3 = 36$  a  $3 \times 4 \times 4 = 48$ );
- nepřiměřený převod jednotek: poměry v tabulce výskytů nejsou úměrné či lineární; např. mezi za sebou následujícími třídami může být poměr 2,5 nebo 2;

- nepříměřená stupnice *RPN*: rozdíly mezi čísly *RPN* by se mohly jevit jako zanedbatelné, zatímco jsou ve skutečnosti významné. Příkladem by mohlo být: hodnoty  $S = 6, O = 4, D = 2$  by dávaly číslo *RPN* = 48, zatímco hodnoty  $S = 6, O = 5, D = 2$  by dávaly číslo *RPN* 60. Toto druhé číslo *RPN* není dvojnásobkem prvního čísla, zatímco ve skutečnosti  $O = 5$  je dvojnásobkem pravděpodobnosti výskytu způsobu poruchy s číslem  $O = 4$ . Čísla *RPN* se tudíž nemají lineárně srovnávat;
- zavádějící závěry z porovnání čísel *RPN*, jelikož jsou stupnice pořadové a nikoliv poměrné;

Přezkoumání čísla *RPN* vyžaduje opatrnost a dobrý úsudek. Dobrou praxí by mohlo být, aby se před vytvořením názoru a provedením opatření k nápravě požadovalo zevrubné přezkoumání hodnot závažnosti, výskytu a detekce.

## 5.4. Zpráva o analýze

### 5.4.1 Rozsah platnosti a obsah zprávy

Zpráva o analýze FMEA může být začleněna do širší studie nebo může být samostatná. V každém případě má zpráva obsahovat souhrn a podrobný záznam analýzy a blokové či funkční diagramy, které vymezují strukturu systému. Zpráva má též obsahovat seznam výkresů (včetně stavu vydání), na nichž je analýza FMEA založena.

### 5.4.2 Souhrnný přehled důsledků

Má se vypracovat seznam důsledků poruch pro specifický systém, na který je analýza FMEA zaměřena. V tabulce P5-7 je uveden typický soubor důsledků poruch pro motor a obvod startéru motorového vozidla.

*Tabulka P5-7: Příklad souboru důsledků poruch (pro startér motor. vozidla).*

1	Motor startéru nefunguje
2	Rychlost motoru startéru je menší, než je specifikováno
3	Motor startéru nezapadl do ozubeného věnce
4	Motor startéru běží předčasně

Poznámka: Tento seznam je pouhý příklad. Každý analyzovaný systém nebo subsystém má svůj vlastní soubor důsledků poruch.

Za účelem stanovení pravděpodobnosti poruchy systému, která vyplývá z důsledků poruch uvedených v seznamu, a ke stanovení priorit pro opatření k nápravě či preventivní opatření může být požadován souhrnný přehled důsledků poruch. Tento

souhrnný přehled důsledků poruch má být založen na seznamu konečných důsledků poruch a má obsahovat podrobnosti o způsobech poruch objektu přispívajících ke každému důsledku poruchy. Pravděpodobnost výskyt každého způsobu poruch se vypočte pro stanovenou předem určenou dobu používání objektu, jakož i pro očekávaný profil používání a namáhání při použití. Názorný příklad souhrnného přehledu důsledků poruch je uveden v tabulce P5-8.

*Tabulka P5-8: Příklady pravděpodobností důsledků poruch.*

Číslo	Důsledek	Odkaz na přispívající způsob poruchy	Pravděpodobnost výskytu důsledku poruchy
1	Motor startéru nefunguje	1, 3, 7, 8, 9, 16, 21, 22	$8 \times 10^{-3}$
2	Rychlost motoru startéru je menší, než je specifikováno	6, 11, 12, 19, 20	$6 \times 10^{-4}$
3	Motor startéru nezapadl do ozubeného věnce	2, 4, 5, 10, 13	$1,1 \times 10^{-5}$
4	Motor startéru běží předčasně	14, 15, 17, 18	$3,6 \times 10^{-7}$

Souhrnný přehled má též obsahovat stručný popis analýzy a stupně, do něhož byly analýzy provedeny, předpoklady a základní pravidla. Kromě toho má obsahovat seznamy následujících položek:

- a) způsoby poruch, které vedou k závažným důsledkům
- b) doporučení pro upozornění návrhářů, pracovníků držby, plánovačů a uživatelů
- c) změny návrhu, které již do něho byly začleněny jako výsledek analýzy FMEA
- d) důsledky, které byly zmírněny začleněnými změnami návrhu

## **Kapitola 6: Jiné závažné záležitosti**

### **6.1. Poruchy se společnou příčinou**

Při analýze bezporuchovosti nestačí uvažovat pouze náhodné a nezávislé poruchy. Mohou nastat některé poruchy „se společnou příčinou“ (CCF – Common Cause Failures), které způsobují zhoršení technických parametrů (výkonnosti) systému nebo poruchu kvůli současným nedostatkům v několika součástech systému způsobeným jediným zdrojem, jako je chyba návrhu (např. nevhodné dimenzování součástí), namáhání vlivy prostředí (např. blesk) nebo lidská chyba.



Poruchy se společnou příčinou (CCF) jsou poruchy, které jsou v rozporu se základním předpokladem, že jsou způsoby poruch uvažované v analýze FMEA nezávislé. Porucha CCF způsobí současně nebo v dostatečně krátké době poruchu u více než jednoho objektu, jako by to byl důsledek souběžných poruch.

Mezi zdroje poruch CCF se typicky zahrnuje:

- návrh: software, nesprávné jmenování zatížení
- výroba: závady součástí vztahující se k dávce
- prostředí: elektrické rušení, teplotní cykly, vibrace
- lidské faktory: nesprávné provozní nebo údržbářské zásahy

Při analýze FMEA systému, ve kterém se k udržení funkce používá zálohování nebo se ke zmírnění následků v případě poruchy používá více objektů, se tudíž musejí uvážit možné zdroje poruch CCF.

Porucha CCF je výsledkem události, která z důvodu logických závislostí způsobí současný výskyt poruchových stavů ve dvou či více součástech (s výjimkou závislých poruch způsobených důsledky primární nezávislé poruchy). Poruchy se společnou příčinou mohou nastat ve stejných dílech, které mají stejné způsoby poruch a stejná slabá místa a jsou používány v různých montážních sestavách systému – případně zálohovaných, pokud je záloha nefunkční.

Poruchy CCF lze kvalitativně analyzovat pomocí analýzy FMEA, ale schopnost FMEA plně analyzovat poruch CCF je dost omezená. FMEA je však postup, při kterém se zkoumají postupně všechny způsoby poruch a s nimi sdružené příčiny a zjišťují se též všechny periodické zkoušky, opatření preventivní údržby atd. Umožňuje studovat všechny příčiny, které mohou vyvolat potencionální poruchy CCF.

K zabránění nebo zmírnění poruch CCF je užitečné použít kombinaci několika metod (modelování systému, fyzikální analýzy součástí): funkční rozmanitost (kdy záložní větve nebo díly systému provádějící stejnou funkci nejsou totožné a mají odlišné způsoby poruch), fyzické oddělení, aby se vyloučilo namáhání vlivy prostředí nebo elektromagnetické interference (EMI) způsobující poruchy CCF, zkoušky atd. Obvykle se při analýze FMEA neuvažuje zkoumání preventivních opatření proti poruchám CCF. Tato opatření však mají být zahrnuta do sloupce „poznámky“, aby napomáhala k pochopení celé analýzy FMEA.

## 6.2 Lidské faktory

Některé systémy musejí být navrženy tak, aby se zabránilo některým lidským chybám nebo aby se tyto chyby zmírnily. Příkladem takových opatření by mohlo být zajištění mechanických vzájemných zablokování železničních signálů a používání hesel při

používání počítačů nebo vyjímání dat. Pokud taková opatření v systému existují, bude důsledek poruchy těchto opatření záviset na typu chyby. Některé způsoby lidských chyb se mají uvážit též u systémů, které jinak nemají poruchové stavy, aby se zkontrolovala účinnost těchto opatření. Po zajištění nedostatků návrhu a procedur je přínosem dokonce i částečný, jakkoliv neúplný seznam těchto faktorů; zjištění všech možných forem lidských chyb by bylo pravděpodobně nemožné.

Mnoho poruch CCF zahrnuje lidské chyby. Např. nesprávná údržba obdobných objektů může potlačit zálohování. Aby se tomu zabránilo, zavádí se často do záložních prvků materiálová různorodost.

### **6.3 Chyby softwaru**

Na analýzu FMEA prováděnou u hardwaru složitěho systému může mít vliv software v systému. Rozhodnutí o důsledcích, kritičnosti a podmíněných pravděpodobnostech, které vyplývají z analýzy FMEA, tedy mohou záviset na softwarových prvcích a jejich povaze, posloupnosti a časování. Je-li tomu tak, je zapotřebí, aby byly vzájemné vztahy mezi hardwarem a softwarem jasně identifikovány, protože jakákoliv následná změna nebo zlepšení softwaru může modifikovat analýzu FMEA a z ní odvozená hodnocení. Schválení vývoje a změny softwaru může záviset na revizi analýzy FMEA a na souvisejících hodnoceních, např. se může změnit softwarová logika, aby se zlepšila bezpečnost na úkor provozní bezporuchovosti.

Nesprávné funkce v důsledku softwarových chyb nebo nepřiměřeností mívají důsledky, jejichž významnost bývá stanovena při návrhu hardwaru a softwaru. Předpokládat takové chyby nebo nepřiměřenosti a analyzovat jejich důsledky je možné pouze v omezeném rozsahu. Při takové analýze je možné odhadnout důsledky možných chyb softwaru pro přidružený hardware a často lze navrhnout nouzová opatření buď softwaru, nebo hardwaru.

### **6.4. FMEA týkající se následků poruchy systému**

Analýzu FMEA systému lze provádět bez odkazu na jakoukoliv konkrétní aplikaci a potom by ji bylo možné následně přizpůsobit pro použití u nějakého projektu. To se uplatňuje u relativně malých montážních sestav, které by mohly být samy považovány za všeobecně použitelné součásti (jako je například elektronický zesilovač, elektrický motor či mechanický ventil).

Obvyklejší je však vypracovat analýzu FMEA specifickou pro daný projekt a brát ohled na konkrétní následky poruchy systému. Důsledky poruch pro systém by mohlo být nutné kategorizovat podle následků těchto poruch, například jako následky typu bezpečný při poruše, opravitelná porucha, neopravitelná porucha, zhoršený úkol, neúspěšný úkol, důsledky pro jednotlivé osoby, skupiny osob či obecně společnost.

Zabude nutné do vztahu analýzu FMEA a konečný následek poruchy systému, bude záviset na projektu a na vztahu mezi analýzou FMEA a jinými formami analýzy, jako jsou stromy poruch, Markovovy diagramy, Petriho sítě atd.

## **Kapitola 7: Aplikace**

### **7.1 Použití analýzy FMEA/FMECA**

FMEA je metoda, která je přizpůsobena především ke studii poruch materiálu a zařízení a kterou lze aplikovat na různé kategorie systémů založené na různých technologiích (elektrických, mechanických, hydraulických atd.) a na kombinacích technologií, nebo může být specifická pro konkrétní kusy zařízení, pro systémy nebo projekty jako celky.

Do analýzy FMEA se mají též zahrnout úvahy o softwaru a výkonnosti lidí, pokud mají význam pro spolehlivost systému. FMEA může být studií pro všeobecné použití k prostudování různých procesů (zdravotnických, laboratorních, výrobních, vývojových, vzdělávacích atd.), kdy se obvykle předpokládá její název FMEA procesu neboli PFMEA. Když se provádí FMEA procesu, vždy se zpracovává s ohledem na konečný cíl procesu a potom při ní uvažuje krok v tomto procesu jako potenciální možnost produkování nežádoucího výsledku jiných kroků v procesu nebo konečného cíle procesu.

#### **7.1.1 Aplikace projektu**

Uživatel má stanovit, jak a za jakým účelem se analýza FMEA používá v jeho vlastní technické disciplíně. Může se použít samostatná nebo jako doplněk a podpora jiných metod analýzy bezporuchovosti. Požadavky na analýzu FMEA vycházejí z potřeby pochopit chování hardwaru a jeho důsledky pro provoz systému nebo zařízení. Potřebnost analýzy FMEA se může značně měnit od jednoho projektu k jinému.

FMEA podporuje koncepci přezkoumání návrhu a má se začít používat co nejdříve v etapě návrhu systému a subsystému. FMEA je použitelná ve všech stupních rozčlenění návrhu systému, ale nejvhodnější je její použití na nižších stupních, kde je velký počet objektů a/nebo velká funkční složitost. Zásadně důležitý je speciální výcvik pracovníků provádějících analýzu FMEA a tyto pracovníci potřebují úzce spolupracovat se systémovými inženýry a návrháři. Jak projekt postupuje a pokud se návrhy modifikují, má se FMEA aktualizovat. Na konci projektu se FMEA používá ke kontrole návrhu a může být zásadně důležitá pro prokázání shody navrženého systému s požadovanými normami, předpisy a nařízeními a s požadavky uživatele.

V informacích z analýzy FMEA se uvádějí priority pro statistickou regulaci procesu, vzorkování a kontrolní zkoušky během výroby a instalace a pro kvalifikační,

schvalovací a přejímací a náběhové zkoušky. FMEA poskytuje zásadní informace pro diagnostické a údržbářské postupy, které se začleňují do příruček.

Při rozhodování o rozsahu a způsobu, jakým se má FMEA aplikovat u nějakého objektu nebo návrhu, je důležité uvážit specifické účely, pro něž jsou výsledky analýzy FMEA potřebné, časové sfázování s jinými činnostmi a důležitost stanovení předem určeného stupně informovanosti a kontroly nad nežádoucími způsoby a důsledky poruch. To vede k plánování analýzy FMEA prováděné kvalitativně na specifikovaných úrovních (systém, subsystém, součást, objekt) tak, aby se vztahovala k iterativnímu procesu návrhu a vývoje.

K zajištění, aby byla FMEA efektivní, se má v programu spolehlivost jasně stanovit místo jejího provádění společně s dobou, pracovními silami a jinými potřebnými zdroji. Je zásadně důležité, aby se kvůli ušetření času a peněz FMEA nezkracovala. Jestliže je nedostatek času a peněz, má se FMEA soustředit na ty části návrhu, které jsou nové nebo se používají novými způsoby. Analýzu FMEA lze ekonomicky směřovat do oblastí, o nichž bylo jinými metodami analýzy zjištěno, že jsou zásadní.

### **7.1.2 Aplikace na proces**

Při přípravě analýzy FMEA procesu (PFMEA) se pro provedení analýzy vyžaduje:

- a) jasné vymezení cíle procesu. Když je proces složitý, lze cíl procesu rozdělit na celkový cíl nebo výsledek procesu, cíl nebo výsledek souboru posloupností či kroků procesu a na výsledek jednotlivého kroku procesu
- b) pochopení jednotlivých kroků v procesu
- c) pochopení potencionálních závad v každém kroku procesu
- d) pochopení důsledku, který může každá jednotlivá závada (potencionální porucha) mít na výsledek procesu
- e) pochopení potencionálních příčin každé závady nebo potencionálních poruch/poruchových stavů procesu

Jestliže má proces více výsledků než jeden, potom může být analyzován tak, že se při něm bere v úvahu specifický výsledek, tj. analýzy PFMEA se provádí pojednotlivé výsledky. Proces lze též analyzovat na základě jeho kroků a potencionálních nežádoucích výsledků, což by vedlo k zobecněné analýze PFMEA daného procesu bez ohledu na typy jednotlivých výsledků (produktů) procesu.

## 7.2 Přínosy analýzy FMEA

Některé dále uvedené podrobné aplikace a přínosy analýzy FMEA mají za cíl:

- a) zabránit nákladným modifikacím včasným zjištěním nedostatků návrhu;
- b) zjistit poruchy, které ať již nastanou samotné, nebo v kombinaci, mají přijatelné nebo významné důsledky, a stanovit způsoby poruch, které mohou významně ovlivňovat očekávaný či požadovaný provoz;
- c) stanovit potřebnost návrhových metod používaných pro zlepšení bezporuchovosti (zálohování, provozní namáhání, bezpečnost při poruše, volba součástí a odlehčení atd.);
- d) sestavit při přípravě analýzy kritičnosti logický modul nutný k vyhodnocení pravděpodobnosti nebo intenzity výskytu abnormálních provozních podmínek systému;
- e) odhalit oblasti s problémy, které se vztahují k bezpečnosti nebo odpovědnosti za škody způsobené produktem, nebo zjistit neshody s požadavky nařízení a předpisů;
- f) zajistit, aby bylo možné v programu vývojových zkoušek detekovat potenciální způsob poruch;
- g) soustředit se na klíčové oblasti, na které se má zaměřit řízení kvality, kontrola a řízení procesu výroby;
- h) pomoci při vymezení rozmanitých aspektů obecné strategie preventivní údržby a harmonogramu;
- i) usnadnit nebo podpořit stanovení kritérií zkoušek, zkušebních plánů a diagnostických postupů, například provádění zkoušek výkonnosti, zkoušek bezporuchovosti;
- j) podpořit návrh posloupností izolování poruchových stavů a podpořit plánování alternativních režimů provozu a rekonfigurace;
- k) umožnit návrhářům pochopení faktorů, které ovlivňují bezporuchovost systému;
- l) vypracovat konečný dokument, který je faktickým důkazem, že (a do jakého rozsahu) byla věnována pozornost zjištění, že bude návrh v provozu splňovat svou specifikaci. (To je zvláště důležité v případě odpovědnosti za škody způsobené produktem).

### 7.3 Omezení a nedostatky analýzy FMEA

FMEA je mimořádně efektivní, když se používá k analýze prvků, které způsobují poruchu celého systému nebo hlavní funkce systému. V případě složitých systémů, které mají mnoho funkcí, do nichž jsou zapojeny různé soubory součástí systému, však může být FMEA obtížná a zdoluhavá. Je to dáno velkým množstvím podrobných informací o systému, které je při ní nutné uvažovat. Tuto potíž může zvýšit existence řady možných provozních režimů, jakož i uvažování politik oprav a údržby.

FMEA, pokud se neaplikuje uvážlivě, může být pracným a neefektivním procesem. Mají se vymežit použití, k nimž se mají výsledky následně vztahovat, a FMEA nemá být nekriticky zahrnována do specifikací požadavků.

Jestliže se v návrhu systému používá zálohování, mohou se při pokusech, aby FMEA obsáhla několik stupňů v hierarchické struktuře, vyskytnout komplikace, nedorozumění a chyby.

Mezi jednotlivými způsoby poruch nebo jejich skupinami nebo příčinami způsobu poruch nelze v analýze FMEA efektivně prezentovat žádné vztahy, jelikož hlavním předpokladem takové analýzy je nezávislost způsobů poruch. Vzhledem k interakcím software/hardware, kde předpoklad nezávislosti neplatí, se tento nedostatek stává ještě zřetelnějším. Se stejným typem obtíží se lze setkat, když se přidají interakce člověka s hardwarem a modelování jejich vzájemných závislostí. Předpoklad nezávislosti může zakrýt způsob poruchy, který může mít drastické následky, když je výsledkem nějakého jiného způsobu poruchy, i když by každý z nich samostatně mohl mít malou pravděpodobnost výskytu. Scénáře takových vzájemných vztahů jsou mnohem lépe modelovány pomocí přístupu používaného při analýze způsobů poruch s nástrojem FTA (IEC 60300-3-1, druhé vydání).

Je tudíž vhodnější, aby se analýzy FMEA omezila pouze na dva stupně v hierarchické struktuře. Například zjistit způsoby poruch objektů a stanovit jejich důsledky pro montážní sestavu je relativně jednoduchý úkol. Tyto důsledky se potom stávají způsoby poruch na příštím vyšším stupni rozčlenění, např. v modulu, atd. Často se však provádějí úspěšné analýzy FMEA pro více stupňů.

Další nedostatek analýzy FMEA spočívá v její neschopnosti poskytnout nějaký ukazatel celkové bezporuchovosti systému a ze stejných důvodů není tato analýza způsobilá poskytnout jakýkoliv ukazatel zlepšení návrhu nebo optimalizace jeho přínosů a nákladů.

### 7.4 Vztahy k jiným metodám

Analýzu FMEA (nebo FMECA) lze použít samostatně. Jakožto systematická induktivní metoda analýzy se FMEA nejčastěji používá jako doplněk jiných přístupů, zejména deduktivních, jako je FTA. V etapě návrhu je často obtížné rozhodnout, zda

převládá induktivní či deduktivní přístup, jelikož se oba v procesech myšlení a analýzy kombinují. Pokud jsou v průmyslových funkčních celcích a systémech zjištěny úrovně rizika, dává se přednost deduktivnímu přístupu, ale FMEA stále zůstává užitečným nástrojem návrhu. Má se však doplnit jinými metodami. To platí zejména v případě, když je nutné zjistit problémy a nalézt řešení za situací, kdy je zapotřebí studovat více poruch a následných důsledků. Která metoda se použije první, obvykle závisí na programu projektu.

Během časných etap, kdy byly pouze stanoveny funkce, obecná struktura systému a subsystémy, lze úspěšný provoz systému nakreslit pomocí blokového diagramu bezporuchovosti nebo pomocí cesty poruchy ve stromu poruchových stavů. Aby však induktivní proces analýzy FMEA pomohl při kreslení těchto diagramů, má se aplikovat na subsystémy ještě před jejich návrhem. Za těchto okolností nemůže být přístup FMEA vyčerpávajícím postupem, ale stává se místo toho myšlenkovým procesem, který nelze snadno vyjádřit v přesné tabulkové formě. Obecně, když se analyzuje složitý systém, který má několik funkcí, řadu objektů a vzájemné vztahy mezi těmito objekty, osvědčila se FMEA jako zásadně důležitá, ale nikoliv dostatečná metoda.

Analýza stromu poruchových stavů (FTA – Fault tree analysis) je doplňková deduktivní metoda analýzy způsobů poruch a jejich příslušných příčin. Při ní se na nízkém stupni rozčlenění sledují příčiny předpokládané poruchy na vysokém stupni. Ačkoliv tato logická analýza může být použita a někdy se používá pro čistě kvalitativní analýzu posloupnosti poruchových stavů, obvykle je předběžnou analýzou pro odhad četnosti výskytu předpokládané poruchy na vysokém stupni rozčlenění. FTA je způsobilá modelovat vzájemnou závislost rozmanitých způsobů poruch, pokud by tyto interakce mohly vést k události značných rozměrů a případně s vysokou závažností. To je zvláště důležité tam, kde by výskyt jednoho způsobu poruch především vyvolal výskyt dalšího poruchového stavu s vysokou pravděpodobností a velkou závažností. Tento scénář by nemohl být úspěšně modelován pomocí analýzy FMEA, ve které se každý způsob poruchy uvažuje nezávisle a jednotlivě. Jedním z nedostatků analýzy FMEA je neschopnost posuzovat interakci a dynamiku výskytu způsobů poruch v systému.

FTA se soustřeďuje na logiku současně (či postupně) probíhajících a alternativních událostí způsobujících nežádoucí následky. Může poskytovat správný model analyzovaného systému, jakož i odhad jeho pravděpodobnosti bezporuchového provozu (nebo pravděpodobnosti poruchy), a může se při ní též vyhodnotit vliv zlepšení návrhu a mírnění způsobu poruch na celkovou bezporuchovost systému, což může být výhodné. Formát analýzy FMEA může být popisnější. Obě metody mají své použití při úplné analýze bezpečnosti a spolehlivosti složitého systému. Jestliže je však systém založen většinou na sériové logice s několika zálohami a několika funkcemi, potom je analýza FTA zbytečně komplikovaný způsob prezentace logiky a identifikace způsobů poruch. V takových případech je adekvátní použít analýzu FMEA a blokové diagramy bezporuchovosti. V ostatních případech se preferuje analýza FTA, kterou je třeba ještě rozšířit o popisy způsobů a důsledků poruch.

Hlavní úvahy týkající se volby metody analýzy mají záviset na konkrétních požadavcích na projekt nejen s ohledem na technické požadavky, ale též na čas, náklady, efektivitu a použití výsledků. Obecné směrnice jsou tyto:

- FMEA je vhodná, když se požadují zevrubné znalosti charakteristik poruch objektu;
- FMEA je vhodnější pro menší systémy, moduly nebo montážní sestavy;
- FMEA je základní nástroj v etapě výzkumu a vývoje nebo návrhu, když je zapotřebí zjistit nepříjemné důsledky poruch a nalézt řešení;
- FMEA může být nezbytná pro objekty, které mají inovační návrh a jejichž charakteristiky poruch nemohou být známy z předchozích provozních zkušeností;
- FMEA je obvykle použitelnější u systémů, které mají velké počty součástí považovaných za součásti, jež spolu souvisejí s převažující sériovou logikou poruch;
- FTA je obecně vhodnější pro analýzu mnoha způsobů poruch a analýzu závislosti se složitou logikou poruch a zálohováním. Analýzu FTA lze použít na vyšších stupních rozčlenění ve struktuře systému brzy v etapě návrhu a tato analýza může pomoci při zjišťování potřebnosti podrobné analýzy FMEA a na nižších stupních během podrobného návrhu.

## **Příloha A: Normy**

Souhrnný přehled postupů při analýzách FMEA a FMECA

### **A.1 Kroky při provádění analýzy**

Kroky při postupu provádění analýzy jsou následující:

- Rozhodne se, zda je nutné použít analýzy FMEA nebo FMECA
- Vymezí se hranice systému pro analýzu
- Pochopí se požadavky na systém a funkce systému
- Stanoví se kritéria poruchy/úspěchu
- Určí se všechny způsoby poruch objektu a jejich důsledky poruch a vše se zaznamená
- Všechny důsledky poruch se sumarizují
- Podá se zpráva o nálezech



Dodatečné kroky prováděné u analýzy FMECA jsou tyto:

- Určí se třídy závažnosti poruch systému
- Stanoví se závažnost způsobu poruch objektu
- Určí se způsob poruchy objektu a četnosti jeho důsledků
- Určí se četnosti způsobů poruch
- Sestaví se matice kritičnosti pro způsoby poruch objektu
- Sumarizuje se kritičnost důsledků poruch z matice kritičnosti
- Sestaví se matice kritičnosti pro důsledky poruch systému
- Podá se zpráva o nálezech na všech úrovních analýzy

Poznámka: Na konci analýzy FMEA může být provedena kvantifikace četností způsobů a důsledků poruch v analýze FMEA.

## **A.2 Pracovní list FMEA**

### **A.2.1 Rozsah pracovního listu**

Pracovní list FMEA zachycuje podrobnosti analýzy v tabulkové formě (viz tabulka P5-9). Ačkoliv je obecný postup analýzy FMEA normalizován, může se návrh konkrétního pracovního listu přizpůsobit aplikaci a požadavkům projektu. Příklad formátu pracovního listu FMEA je uveden níže.

### **A.2.2 Záhloví pracovního listu**

V záhlavní části formuláře se uvádějí následující informace:

- systém jako koncový objekt identifikuje objekt, pro nějž se zjišťují koncové důsledky; tento identifikátor má být ve shodě s terminologií používanou v blokových diagramech, schématech nebo jiných výkresech;
- provozní režim předpokládaná pro analýzu;
- objekt, který se vztahuje k objektu (modulu, součásti či dílu) analyzovanému na tomto pracovním listu;
- úroveň revize, datum a jméno pracovníka provádějící analýzu, který koordinuje úsilí při analýze FMEA, jakož i jména hlavních členů týmu, kteří poskytují dodatečné informace pro účely řízení dokumentů.

Tabulka P5-9: FMEA části automobilové elektroniky s výpočtem RPN

Koncový objekt: Období provozu:			Objekt: Revize:				Vypracoval: Datum:				
Odkaz na objekt	Popis a funkce objektu	Způsob poruchy	Kód způsobu poruchy	Možné příčiny poruchy	Místní důsledek	Konečný důsledek	Metoda detekce	Opatření na kompenzaci poruchy	Třída závažnosti	Četnost nebo pravděpodobnost výskytu	Poznámky

### A.2.3 Zápisy do pracovního listu

Zápisy do sloupců „Odkaz na objekt“ a „Popis a funkce objektu“ mají identifikovat předmět analýzy. Odkaz se má vztahovat k blokovému diagramu nebo k jiným doprovodným dokumentům. Do druhého sloupce se zapíše stručný popis objektu a jeho funkce.

Do sloupce „Způsob poruchy“ se zapíše způsob, jakým by tu u objektu mohlo dojít k poruše. Návod pro zjišťování potencionálních způsobů poruch je uveden v článku 5.2.3. Zapsáním jedinečného identifikátoru („Kód způsobu poruchy“) pro každý jedinečný způsob poruchy objektu se usnadní vytváření souhrnného přehledu výsledků analýzy.

Nejpravděpodobnější příčiny daného způsobu poruch se uvedou ve sloupci „Možné příčiny poruchy“.

Do sloupce „Místní důsledek“ se zapíše stručný popis důsledků daného způsobu poruchy analyzovaného objektu. Obdobné informace se zapíší do sloupce „Konečný důsledek“, aby se vyznačily důsledky daného způsobu poruch pro koncový objekt. U některých analýz FMEA je žádoucí vyhodnotit důsledek poruchy na mezilehlém stupni rozčlenění. V takovém případě se do dodatečného sloupce zanesou „Důsledek pro montážní sestavu na příštím stupni“. Zjišťování důsledků způsobů poruch je blíže rozebráno v článku 5.2.5 normy.

Ve sloupci „Opatření na kompenzaci poruchy“ se mají uvést význačné rysy návrhu, které zmírňují konkrétní způsob poruch, jako je zálohování. Zde se má uvést též kompenzace poruch prováděná specifickým zásahem údržby nebo pracovníka obsluhy.

Ve sloupci „Třída závažnosti“ se uvádí úroveň závažnosti, jak ji stanovil pracovník provádějící analýzu FMEA.

Ve sloupci „Četnost nebo pravděpodobnost výskytu“ se uvádí intenzita výskytu konkrétního způsobu poruchy. Stupnice četností se přizpůsobí tak, aby vyhovovala aplikaci (např. počet poruch na milion hodin, počet poruch na ujetou vzdálenost, tj. 1000 km, atd.).

Do sloupce „Poznámky“ se zapíší připomínky a doporučení pracovníka provádějícího analýzu, jak je psáno v článku 5.3.4 normy.

### A.2.4 Poznámky v pracovním listu

V posledním sloupci pracovního listu se uvádějí příslušné poznámky k objasnění ostatních zápisů. Zde mohou být zaznamenána budoucí opatření, jako jsou doporu-

čení pro zlepšení návrhu, která mohou být potom rozvedena ve zprávě. Tento sloupec může též obsahovat:

- a) jakékoliv neobvyklé podmínky
- b) důsledky poruch záložních prvků
- c) rozpoznání zvláště kritických rysů návrhů
- d) jakékoliv poznámky, které rozvádějí daný záznam
- e) odkazy na jiné záznamy pro analýzu po sobě jdoucích poruch
- f) významné požadavky na údržbu
- g) převažující příčiny poruch
- h) převažující důsledky poruch
- i) učiněná rozhodnutí, např. v přezkoumání návrhu

Obrázek P5-2: FMEA části automobilové elektroniky s výpočtem RPN

Sub-sys-tém	Objekt / funkce	Potenciální způsob poruchy		Potenciální důsledky poruchy		Třída Závaznosti	Potenciální příčina (příčiny) / mechanismu (mechanizmy) poruchy	Podrobná příčina (příčiny) / mechanismus (mechanizmy) poruchy	Vyskyt	Aktuální řízení návrhu ohledně prevence	Aktuální řízení návrhu ohledně detekce	RPN Detekce	Doporučené/á opatření	Odpovídá Cílové datum	Výsledky opatření			
		Místní důsledek	Konečný důsledek	M	S										O	D	Provedená opatření	Závaznosti
	Napájecí zdroj V1								O			D						
	D1	Zkrat	Zkrat+pólu baterie na -zem	Výbití baterie, „vrat se domů pěšky“	Vnitřní vada součástky	10	Vnitřní vada součástky	Průraz materiálu	3	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	1	30					
	D1	Přerušeni	Žádána ochrana proti přepólování	Nezasluhuje pozornost	Vnitřní vada součástky	2	Vnitřní vada součástky	Vada kontaktování nebo prasklina v polovodiči	3	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	2	12					
	C9	Zkrat	Zkrat+pólu baterie na -zem	Výbití baterie, „vrat se domů pěšky“	Vnitřní vada součástky	10	Vnitřní vada součástky	Průraz dielektrika nebo prasklina	3	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	1	30					
	C9	Přerušeni	Žádána filtrace proti elmg. rušení	Provoz objektu mimo specifikaci	Vnitřní vada součástky	2	Vnitřní vada součástky	Přerušeni kontaktu mezi přívodem a polepem, nečistot, dutina či prasklina	2	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	1	4					
	L1	Přerušeni	Žádné napětí -V1	Objekt je nefunkční. Žádné varování	Vnitřní vada součástky	9	Vnitřní vada součástky	Prasknutí materiálu	2	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	1	18					
	R91	Přerušeni	Žádné napětí pro spínač obvod	Objekt je nefunkční. Žádné varování	Vnitřní vada součástky	9	Vnitřní vada součástky	Přerušeni vodivého spojení nebo materiálu	2	Volba kvalitnější součástky s vyšším jmenovitým zatžením	Hodnocení a validaci zkoušky bez-poruchovosti	1	18					