

# **Risk Based Inspection (RBI) - moderní efektivní přístup k zajištění bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí - začlenění a role metody akustické emise (AE) v rámci přístupu RBI.**

M.Přibán, <sup>2</sup>F.Žemlička, <sup>3</sup>P.Hora, <sup>1</sup>J.Vlach

<sup>1</sup>ACES, 5.května 641, 38701 Volyně, aces.priban@iol.cz

<sup>2</sup>Preditest s.r.o., Novodvorská 1010/14, 142 00 Praha 4, Lhotka, preditest@mbox.vol.cz

<sup>3</sup>UT AV ČR - CDM Veveřská 11, 30114 Plzeň, hora@cdm.it.cas.cz

Risk Based Inspection (RBI) představuje moderní rychle se rozvíjející efektivní přístup k plánování a volbě prostředků inspekce konstrukcí v chemickém průmyslu. Sjednocuje na jedné straně zvyšující se požadavky na bezpečnost a spolehlivost provozu konstrukcí a na druhé straně ekonomicky oprávněný požadavek provozovatelů na efektivní plánování, úspory nákladů, ekonomiku v oblasti inspekce konstrukcí.

Tradiční přístup provozních inspekce se dosud řídí pevně předepsanými postupy, které určují lokality, frekvenci a metody inspekce především na základě zobecněné průmyslové praxe resp.zobecněné zkušenosti pro daný typ konstrukce. Omezují však využití konkrétní analýzy rizika provozu konkrétní konstrukce či uzlu pro optimalizaci nákladů odstávek a inspekce. Omezují využití monitorování, zkušenosti bezproblémového provozu a dobré znalosti stavu konkrétní konstrukce na snížení nákladů inspekce. Současně tím též znemožňují možnost zaměření/přesunu omezených zdrojů na oblasti zvýšeného potenciálního rizika. Tyto klasické postupy se osvědčili a poskytují adekvátní bezpečnost a spolehlivost. Nicméně požadavky na bezpečnost a spolehlivost se zvyšují při současné snaze provozovatelů o zachování ekonomicky rozumných nákladů inspekce. To vytváří tlak na zavádění nových přístupů (RBI). RBI přístup umožňuje provozovatelům („Duty Holders“) řídit úlohu bezpečnosti-integrity konstrukce podniku a plánu inspekce dle ohodnocení rizika havárie konkrétních konstrukcí. Musí být však přitom schopni prokázat, že ohodnocení rizika a způsob plánování inspekce jsou implementovány účelným a přiměřeným způsobem.

Moderní trend směřující k „risk based“ přístupu je podporován rozsáhlou provozní zkušeností, pokroky v poznacích o degradaci materiálu, novými výpočetními programy, FFS procedurami, rozvojem a zdokonalením NDT metod inspekce současně se započtením limitů analýz a informací jež do hodnocení vstupují. RBI přístup podporuje přesnější zaměření a načasování inspekce a nabízí průmyslové praxi nový potenciál v oblastech :

- Zlepšení řízení v oblasti ochrany zdraví, bezpečnosti a rizik poruch konstrukce
- Včasnou identifikaci a opravu nebo výměnu poškozeného zařízení
- Snížení nákladů omezením neefektivních inspekce, prodloužením intervalu inspekce a vyšší provozuschopnost podniku

Předkládaný příspěvek se skládá ze dvou částí.

První část je věnována základnímu představení přístupu RBI s důrazem na problematiku hodnocení pravděpodobnosti porušení (POF), volby a plánování postupů inspekce z hlediska včasné detekce iniciace a rozvoje porušení integrity konstrukce, tzn. z pohledu současných poznatků a zkušeností z oblastí degradace materiálu, lomové mechaniky a stávajících možností/omezení NDT metod.

Druhá část ukazuje na možnosti, roli a začlenění metody akustické emise (AE) v rámci přístupu RBI. Ukazuje na potenciál AE především jako neinvazivní metody inspekce nevyžadující odstavení, nákladnou přípravu/zpřístupnění konstrukce na provedení inspekce (jež bývá obvykle mnohem nákladnější, než cena vlastních inspekce). Ukazuje přednosti a omezení metody AE z pohledu RBI, tzn.na jedné straně z pohledu spolehlivosti metody na druhé straně z pohledu potenciálu ekonomického přínosu aplikace metody AE.

# 1. Risk Based Inspection – spojení ekonomického a technického pohledu.

Provozní prohlídky a inspekce tlakových systémů se tradičně řídí předepsanými postupy. Předepsané postupy určují lokality, frekvenci a metody inspekci především na základě zobecněné průmyslové praxe a zkušeností pro daný typ konstrukce. Tyto předepsané postupy poskytují adekvátní bezpečnost a spolehlivost tlakových zařízení již mnohá desetiletí. Nicméně zvyšující se požadavky na bezpečnost provozu konstrukcí a výrobních celků současně s tlakem na ekonomickou efektivnost a snižování nákladů na provoz stále více naráží na limity a omezení tohoto klasického „prescriptive“ přístupu. Vytváří se tak tlak na zavádění nových moderních konceptů zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu tlakových zařízení – výrobních celků.

Již několik let lze sledovat trend posuvu od konkrétně předepsaných zkoušek k definování obecných bezpečnostních požadavků a cílů. Jedná se o možnost ekonomicky efektivní volby prostředků pokrytí rizika provozu nebezpečných konstrukcí, ovšem současně s povinnostmi doložit, že přijatá opatření rizika provozu skutečně pokrývají. Důležitou součástí tohoto trendu je Risk Based Inspection přístup. Jako doklad lze připomenout API standardy API 580 a API 581, resp. úsilí EU v rámci projektu RIMAP (Risk Based Inspection and Maintenance Procedures), a další... [3,5,6]. Přesnější zaměření a načasování inspekci, které RBI poskytuje, provozovateli přináší:

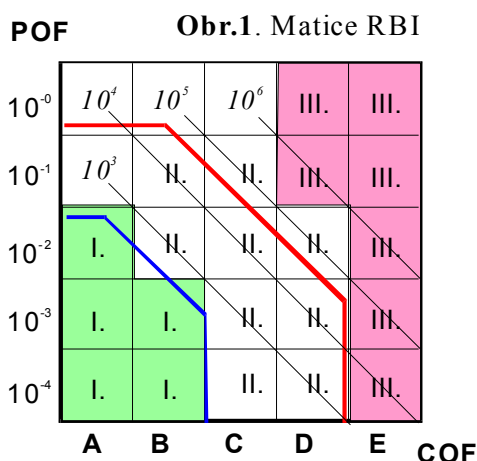
- Zlepšení řízení/managementu v oblasti rizik poruch konstrukcí bezpečnosti a ochrany zdraví
- Včasnou identifikaci a opravu poškozeného zařízení – redukcí nákladů neplánovaných odstávek
- Snižování nákladů omezením neefektivních inspekci, prodloužením intervalu inspekci při vyšší provozuschopnosti a efektivnosti provozu.

## Základní pojmy konceptu RBI.

**Risk** (Riziko) je definováno jako součin pravděpodobnosti poruchy **POF** (Probability of Failure) a následků poruchy **COF** (Consequence of Failure), matematicky **Risk=POF x COF**.

Tuto definici lze prezentovat pomocí RBI matice, obr.1, kdy pravděpodobnost poruchy POF rozdělíme do pěti stupňů např.  $10^{-0}$  až  $10^{-4}$  a následky též do pěti stupňů A až E. Riziko roste z levého dolního rohu přípustného (zeleného) rizika do pravého horního rohu nepřípustného (červeného) rizika. Na pozadí RBI matice na obr.1. jsou orientačně vyznačeny linie konstantního rizika od  $10^3$  do  $10^6$  Kč za rok, a to z levého horního rohu – v důsledku častých nezávažných poruch k pravému dolnímu rohu velmi nepravděpodobných katastrofických havárií s velkými následky. Konečně označení I.,II.,III. kategorizují konstrukce dle přípustnosti poruchy.

**I.** Porucha za provozu přípustná (Run To Failure). **II.** Maximální technicky rozumná opatření proti vzniku mezního stavu porušení konstrukce (ALARP - As Low As Possible Reasonably Possible) **III.** Porucha za provozu nepřijatelná (Unacceptable).



**POF** - roční pravděpodobnost poruchy/havárie

**COF** - stupeň následků poruchy/havárie

- E:** katastrofické následky - cena  $10^8$  Kč - mnoho mrtvých dlouhodobé závažné ekologické škody
- D:** velmi vážné následky - cena  $10^7$  Kč - mrtví, těžce zranění krátkodobé závažné ekologické škody
- C:** závažné následky - cena  $10^6$  Kč - těžce zranění krátkodobé významné ekologické škody
- B:** méně důležité následky -  $10^5$  Kč - lehce zranění krátkodobé méně významné ekologické následky
- A:** nevýznamné následky -  $10^4$  Kč - velmi lehká zranění nevýznamné úniky látek

**Pozn.1:** Při vyčíslení možných následků (COF) nelze uvažovat pouze náklady vlastní havárie. Nutno započítat ohrožení zdraví a životů lidí pracujících v provozu či žijících v okolí podniku, dopady na životní prostředí, ekonomické ztráty v důsledku přerušení provozu či poklesu hodnoty akcií, ale též dopady v oblasti „public relation“ – negativní publicita ve sdělovacích prostředcích...

Je též nutno zvážit různé scénáře důsledků, mimo jiné možnost, kdy jedna porucha může vést k iniciaci dalších poruch resp. havárií... i vážnějších sekundárních havárií než je prvotní porucha.

Konečně je zde otázka nákladů v souvislosti s nečekaným výskytem poruchy jak za provozu, tak též při detekce významnějšího porušení při inspekci při odstávce, které znemožní na jistý čas výrobu.

Úloha RBI není nová. Provozovatele vědí, že „20%“ konstrukcí/uzlů způsobuje „80% problémů“. Snaží se proto přirozeně soustředit prostředky (i bez RBI) právě na ty konstrukce a uzly, kde vidí potenciální možnosti problémů a ušetřit na konstrukcích/uzlech, kde jim zkušenost ukazuje spolehlivý provoz a bezproblémový stav. Přístup RBI přináší této strategii nové dimenze na jedné straně v oblasti návaznosti na úlohy managementu, finančního plánování, ekonomiky, bezpečnosti práce... a současně na straně druhé nové možnosti v oblasti technických řešení a strategií inspekci.

V obecném slova smyslu lze RBI pojmut jako nový komplexní přístup s novými vazbami, resp. obecným začleněním úlohy inspekci do ekonomiky-efektivnosti provozu podniku, finančního plánování a managementu údržby, bezpečnosti práce... [3,4,5]

V užším slova smyslu lze RBI definovat jako úlohu optimalizace nákladů na včasné spolehlivé odhalení iniciace a rozvoje porušení konstrukce, resp. jako technicko inženýrskou úlohu minimalizace pravděpodobnosti porušení POF konstrukce při zohlednění klasifikace následků COF.

### **Zaměření tohoto příspěvku je orientováno na technickou stránku, na efektivitu a spolehlivost různých přístupů k hodnocení pravděpodobnosti iniciace a rozvoje porušení konstrukcí.**

Na obr.2 vidíme základní schéma vztahu/vazby mezi hodnocením POF a podkladů pro hodnocení COF z hlediska technického pohledu na problematiku iniciace a rozvoje porušení konstrukcí. Schéma na obr.2 ukazuje komplexnost této úlohy :

- A)** Základem je správné určení mechanismů a scénářů možné iniciace a rozvoje porušení.
- B)** Je nutno znát vlastnosti materiálu a parametry jeho odolnosti vůči definovaným mechanismům porušení v bodě A (a to nejen základního materiálu, ale především svarových spojů).
- C)** Neméně důležité je znát provozní podmínky od úrovně zatížení, přes cyklickou složku zatížení, též teplotu, teplotní gradienty a teplotní cykly, v neposlední řadě složení média a korozní podmínky.
- D)** Konečně z hlediska RBI je velmi důležité identifikovat možné mezní havarijní stavy konstrukce. Tzn.zda lze předpokládat porušení celistvosti ve formě malého úniku přes vlasovou trhlinu, či velký únik při natržení stěny konstrukce, zda jsou splněny podmínky LBB s požadavkem na včasnou detekci úniku či zda hrozí nebezpečí křehkého lomu.

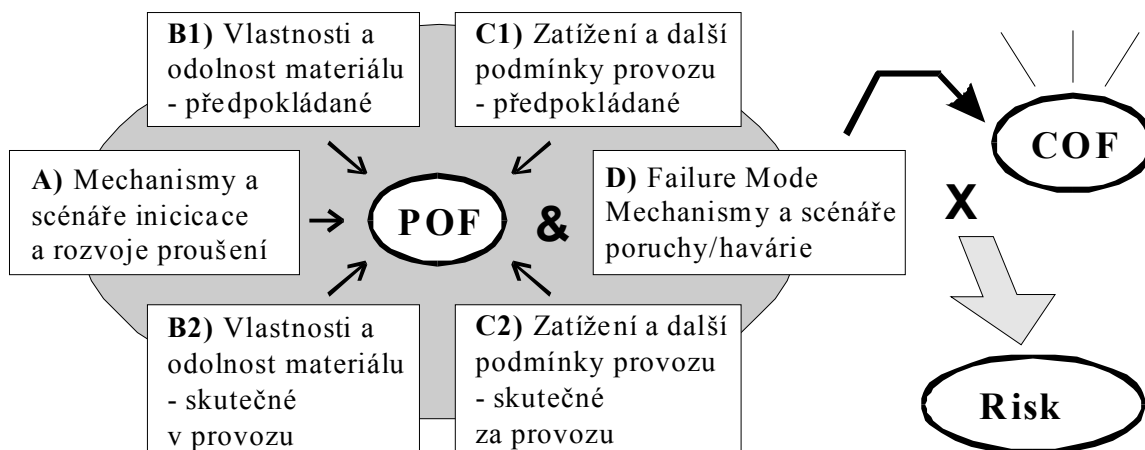
Bod **D)** má zásadní význam pro posouzení následků porušení celistvosti (COF) a pro posouzení :

- I) zda je porušení za provozu přípustné s následnou opravou či výměnou (**Run to Failure**)
- II) zda je nutno učinit maximální technicky rozumná opatření proti vzniku mezního stavu porušení konstrukce (**ALARP** - As Low As Possible Reasonably Possible)
- III) zda je mezní stav-porušení vzhledem k důsledkům nepřijatelný (**Unacceptable** – v chemickém průmyslu pravděpodobnost poruchy nižší než  $10^{-4}$  za rok, v jaderné energetice  $<10^{-6}$  za rok)

Klasifikace I) až III) odpovídá rostoucímu riziku na obr.1. Konstrukce s nízkým rizikem a malými následky (zelené) mohou být zařazeny do kategorie konstrukcí s přípustným porušením I.

Konstrukce s vysokým rizikem a především možnými katastrofickými následky (červené) jsou zařazeny do kategorie konstrukcí s nepřijatelným porušením III.

**Obr.2** Blokové schéma "technické části" RBI analýzy ústící do pravděpodobnosti POF a scénářů poruchy/havárie jež je vstupem pro určení COF (a následně též rizika).



## 2. Kvantitativní hodnocení POF v rámci FFS analýzy.

Pravděpodobnostní přístup v oblasti tlakových nádob a potrubí byl původně zaveden v rámci jaderné energetiky s cílovou bezpečností POF nižší než  $10^{-6}$  za rok pro závažné havárie. Výpočet POF je postaven na FFS analýze. Výpočet odvozujeme od určení velikosti maximálního defektu  $\Delta 2$  odpovídajícího meznímu stavu/havárii. Dále do výpočtu vstupuje odhad pravděpodobnosti detekce defektu velikosti  $\Delta 1$  či korozního úbytku POD( $\Delta 1$ ). Vstupem jsou též informace pro výpočet rychlosti růstu porušení daného materiálu v daných provozních podmínkách zatížení materiálu. Tyto informace/hodnoty vstupují do výpočtu ve formě rozdělení pravděpodobnosti marginálních-konzervativních hodnot vstupních parametrů (vyjádřených např. jako „partial safety factors“). Vstupní parametry se zadají výkonné výpočetní technice, jež provede výpočet pravděpodobnosti porušení konstrukce v závislosti na vstupních parametrech. Z těchto výpočtů je pak odvozena optimální strategie zajištění bezpečnosti (nepřekročení požadované úrovně POF). V současné době lze nalézt řadu příkladů využití výpočetní FFS analýzy pro posouzení rizika havarijního stavu POF.

Máme-li dokladovat výpočtem pravděpodobnost porušení POF  $10^{-6}$  ale např. i jen  $10^{-4}$  za rok, musí tomu odpovídat spolehlivost vstupních informací. Tak jako nelze z chybných vstupů vytvářet správné závěry, nelze očekávat spolehlivost výstupů výpočtů POF vyšší než to umožňuje spolehlivost vstupních informací.

Zde je na místě připomenout, že existuje velký rozdíl mezi hodnocením pravděpodobnosti porušení POF v jaderné energetice a v chemickém průmyslu. Čistota a znalost vlastností materiálu, monitorování provozních podmínek, testování spolehlivosti NDT metod, analýza možných havarijních scénářů... jsou v jaderné energetice analyzovány velmi detailně a spolehlivě s podporou vysokých finančních prostředků na zajištění bezpečnosti omezeného počtu typově blízkých konstrukcí/uzlů. Oproti tomu se v chemickém průmyslu setkáváme s velkou variabilitou různých konstrukcí, typů a složení ocelí, svarů, provozních podmínek, teplot, korozního působení, působení vodíku..., a to při omezeném množství financí, jež jsou k dispozici (omezených prostředků jak celkově o to víc pak na jednotlivé konstrukce). Tzn. informace, jež máme k dispozici jako vstupy do exaktní FFS analýzy, jsou v chemickém průmyslu zatíženy významně vyšší nejistotou-neznalostí než v jaderné energetice. To je též základní limit využití výpočetní FFS analýzy v této oblasti.

Poukazem na limity určení POF na základě FFS analýzy nezpochybňujeme FFS analýzu jako takovou. Pouze upozorňujeme na riziko, jež vyplývá z přesvědčení některých teoretiků (či výrobců), že lze „vše spočítat“ (resp. změřit v laboratoři) bez zpětné vazby zkušenosti reálného provozu.

### 3.Kvalitativní klasifikace POF.

POF určuje celá řada vstupních informací. Hodnota různých informací může být z hlediska jejich váhy pro hodnocení výsledné celkové pravděpodobnosti porušení POF více či méně závažná. Dále platí, že každá informace vnáší do hodnocení POF vyšší či nižší stupeň „zbytkové nejistoty“ dané

*a) statistickým rozptylem vstupních hodnot* resp *b) nejistotou znalostí vstupních hodnot.*

V jaderné energetice se jedná o úlohu, jak optimalizovat rozhodnutí vzhledem ke spolehlivě známým pravděpodobnostním rozdělením vstupních informací.

V chemickém průmyslu se však častěji setkáme s úlohou optimalizovat rozhodnutí v podmínkách neúplných informací. Proto je např. ve studii [3] jako první krok tvorby RBI uvedena klasifikace úrovně naší znalosti/neznalosti významných faktorů hodnocení pravděpodobnosti porušení POF.

**III)** Na jedné straně je úplná znalost provozní historie na základe provozního monitorování, dobrá znalost vlastností materiálu, znalost potenciálních degradačních mechanismu, rychlosti rozvoje porušení, kompletní záznamy relevantních výsledku předchozích inspekci,...

*- spolehlivý soubor všech relevantních vstupních informací – jež k dispozici obvykle není.*

**I)** Na druhém konci je stav, kdy máme velmi nedostatečné znalosti a informace o provozních podmínkách a zatěžovací historii, vlastnostech materiálu máme jen velmi omezené znalosti především vzhledem k možnosti iniciace rychlosti rozvoje porušení. Provozní inspekce se dosud neprováděly - *v podstatě nemáme informace pro posouzení pravděpodobnosti porušení.*

**II)** Mezi těmito dvěma limitními stavy je pak potřeba hledat především ty faktory, které jsou slabými místy neznalosti v našem hodnocení možnosti-pravděpodobnosti porušení POF.

**Pozn:** Označení I,II,III není náhodné a ukazuje na souvislost s kategorizací poruch z kapitoly I. Případ III) by měl odpovídat konstrukcím u nichž je porušení nepřijatelné (III - Unacceptable). Případ I) je přípustný jen v případě s povolenou poruchou za provozu (I – Run to Failure). Případ II) odpovídá požadavku nejnižší rozumné pravděpodobnosti ((II - ALARP - As Low...)

Prvním krokem RBI analýzy je tudíž dle [3] určit faktory, jejichž neznalost může být z hlediska možnosti nežádoucího porušení závažná a klasifikovat stupeň naší neznalosti těchto faktorů :

*Stupeň 1 odpovídá úplné znalosti všech podstatných informací pro hodnocení.*

*Stupeň 5 odpovídá situaci, kdy něco podstatného závažného a zásadního nevíme.*

*Mezistupně 2),3),4) odpovídají rostoucímu stupni závažnosti naší neznalosti.*

Druhým krokem RBI analýzy je z dostupných informací klasifikovat hrozbu porušení opět stupněm:

*Stupeň 1 říká, že z dostupných informací nic neukazuje na možnost porušení celistvosti konstrukce.*

*Stupeň 5 říká, že byl identifikován závažný rozvoj porušení hrozící reálně havarijním stavem.*

*Mezistupně 2),3),4) – odpovídají rostoucí závažnosti hodnocení pravděpodobnosti porušení.*

Třetím krokem je dle [3] je určení výsledné klasifikace POF jako maxima klasifikace z obou prvních kroků. Tzn.např.celkovým stupněm POF „5 velmi vysoká“ klasifikujeme nejen případ, kdy máme informace o tom, že pravděpodobnost POF je „5 velmi vysoká“ ale též v případ, kdy nemůžeme doložit, že pravděpodobnost POF není „5 velmi vysoká“.

Předchozí postup dle [3] ukazuje kvalitativní klasifikaci hodnocení POF na základe matice

Stupeň neznalosti pravděpodobnosti porušení **X** Stupeň pravděpodobnosti porušení

dle principu, „**když něco nevíme, musíme počítat s nejhorším případem**“

## 4. Diskuse různých strategií inspekcí v rámci RBI.

Inspekce není schopna ovlivnit stupeň pravděpodobnosti porušení POF (ten lze ovlivnit např. změnou provozních parametrů). Inspekce má za úkol provozními kontrolami efektivně doplňovat informace s cílem minimalizovat stupeň naší neznalosti pravděpodobnosti porušení POF. V rámci RBI je úlohou inspekcí především efektivně zaplňovat slabá místa neznalosti, jež významně ovlivňují výsledné hodnocení možnosti porušení\*. Není efektivní investovat do inspekcí, jejichž informace neumožňují významnější upřesnění celkového hodnocení POF. Je neefektivní investovat do vyšší spolehlivosti informací, jejichž znalost je již tak na dobré úrovni a současně ponechávat v jiném směru otevřenu neznalost či nízkou spolehlivost informace. Efektivní je postupovat ve směru vyhledávání a zaplňování nejslabších míst hodnocení POF spolu s rozvahou, zda hodnota získané informace odpovídá ceně nákladů vložených do získání této informace.

*Pozn\*:* Pro posouzení závažnosti znalosti/neznalosti různých vstupních faktorů- informací-hodnot je vhodné provést orientační citlivostní FFS analýzu (viz. kapitola 2).

### 4.1 Správná identifikace hlavních rizikových faktorů jako vstup RBI analýzy.

Vstupem vývojového diagramu hodnocení POF v rámci RBI je bod A) na obr.2, tzn. identifikace mechanismů a scénářů iniciace a rozvoje porušení společně s bodem D), tzn. identifikací módů mezního stavu-havárie konstrukce. Současně by základní vstupní expertní analýza měla navrhnout efektivní strategii inspekcí, jež by s požadovanou garancí poskytly informace a identifikovaly příznaky hrozícího nebezpečí iniciace porušení či havárie. Např. zcela odlišná řešení je nutno volit v případě nebezpečí globálního oslabení konstrukce v důsledku pomalu predikovatelně rostoucích korozních úbytků s jednoduchým režimem zatížení a jiná v případě nebezpečí iniciace a rychlého rozvoje lokálního korozního praskání z TOZ svaru technologického celku s komplexním režimem zatížení. Pokud v bodě A) uděláme chybu, pak všechny následné práce a investované prostředky budou vynaloženy velmi pravděpodobně neefektivně a zbytečně.

Pokud si nejsme jisti či nemáme úplné informace v otázce identifikace hlavních rizikových faktorů, je prvořadým úkolem získat informace vedoucí k žádoucímu doplnění právě těchto informací.

*Pozn:* V této prvotní fázi RBI analýzy se rozhoduje o tom, zda naplníme požadavek na smysluplnost následných opatření vyjádřeno citátem „Nejde jen o to dělat věci správně, především jde o to, dělat věci správné“. Klasickým příkladem může být tlaková zkouška – rozhodnutí, kdy a za jakých okolností má smysl a kdy nemá smysl a pouze spotřebuje finanční prostředky na svoji realizaci.

Uveďme neúplný souhrn nejobvyklejších rizikových faktorů a připomeňme, že nejhorší situace vznikají při současném výskytu několika negativních faktorů v jednom místě konstrukce.

**Z hlediska provozních režimů jsou hlavními rizikovými etapami :**

- první náběh a počáteční fáze provozu konstrukce
- přechodové stavy zatížení, především spojené s teplotními změnami a pnutími
- poruchové stavy provozu konstrukcí

**Z hlediska odolnosti materiálu jsou rizikovými faktory:**

- svary, především pak svary nežíhané či svary po opravách
- strukturně slabá místa materiálu především vycezeniny s vysokým obsahem nečistot
- přítomnost technologických defektů působících jako koncentrátoři napětí

**Z hlediska uzlů či lokalit konstrukce jsou rizikovými místy :**

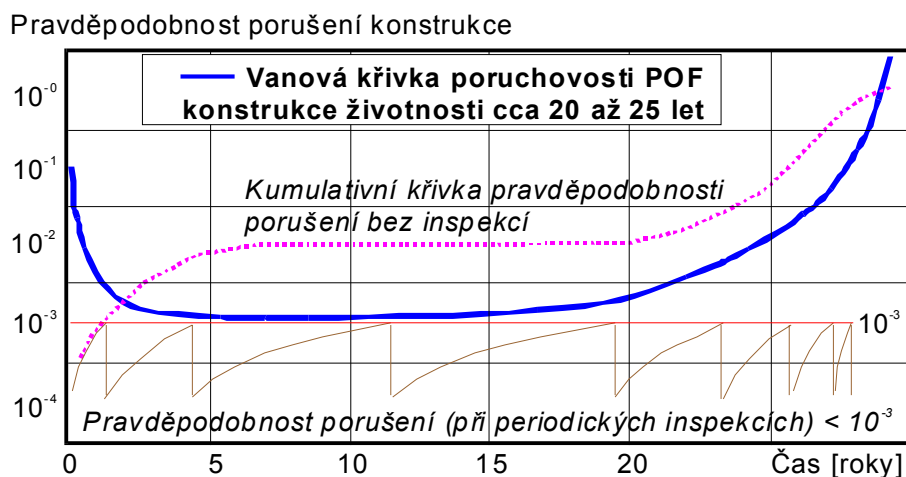
- nejzatíženější uzly a geometrická místa působící jako koncentrátoři napětí
- vyústění hrdel tlakových nádob či T kusy potrubí zesilující vliv teplotních pnutí a vibrací
- oblast hladiny kapaliny v nádobě

## 4.2 První zatížení, první náběh a počáteční fáze provozu.

První zatížení konstrukce, a to jak povýrobní tlaková zkouška, tak především první náběh provozu a počáteční fáze provozu mají veliký význam. Přes kvalitu návrhu a výroby, přes velmi citlivé výrobní NDT zkoušky prováděné v podmínkách optimální přístupnosti, přes další opatření garantující kvalitu, je to teprve zkušenost z provozu, která ukáže, zda konstrukce splňuje požadavky na ní kladené. Zda neobsahuje skryté vady či lokality s nepředpokládaně vysokým stupněm zatížení... Tomu odpovídá obecná vanová křivka pravděpodobnosti poruch v průběhu provozního života konstrukcí. Obdobím zvýšené pravděpodobnosti jsou počátek po uvedení do provozu a dále etapa po vyčerpání životnosti konstrukce. Řada organizací (včetně např. API) [3] považuje počáteční fázi provozu za natolik závažnou, že doporučuje klasifikovat konstrukci v této fázi jako konstrukci s vysokou pravděpodobností porušení (přesto že výrobci a teorie tvrdí, že porušení je prakticky nemožné). Toto hodnocení není v matici

*Stupeň neznalosti pravděpodobnosti porušení* **X** *Stupeň pravděpodobnosti porušení* dáno tím, že existují konkrétní informace, že konstrukci hrozí nebezpečí, ale proto, že musíme předpokládat vysoký stupeň neznalosti faktorů, jež případné porušení může iniciovat viz. kapitola 3, a to do té doby, než zjistíme, že takové faktory neexistují. Z toho vyplývá doporučení [3], že první inspekce po spuštění konstrukce do provozu by měla být provedena rok maximálně dva roky po spuštění do provozu a měla by být důkladná. Pokud je to možné je žádoucí minimálně na první tapu provozu nasadit On-line monitorování rozvoje porušení.

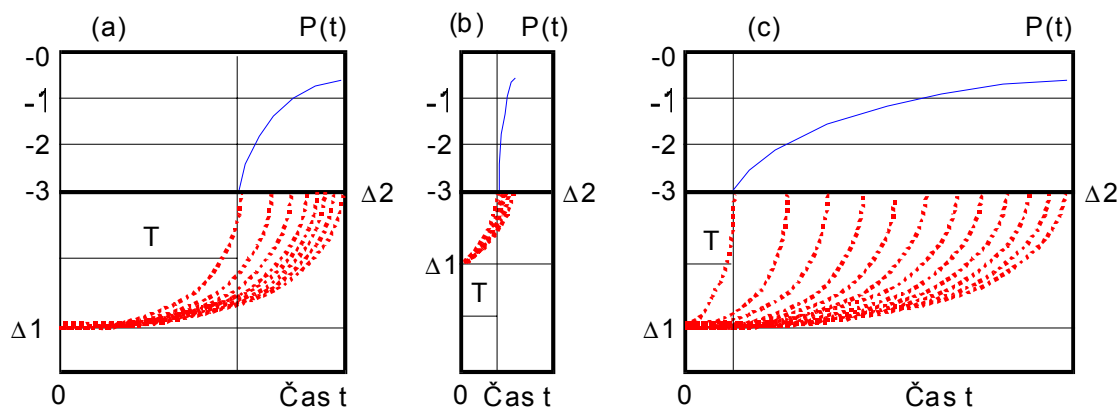
Obr.3. Příklad vanové křivky pravděpodobnosti poruchy konstrukce v průběhu její životnosti



## 4.3 Periodické NDT kontroly.

Většina konstrukcí v chemickém průmyslu pracuje v režimu nízkocyklové únavy (kombinované s korozí, vodíkem, korozním praskáním, creepem-tečením)\*. Ve všech těchto případech platí, že existuje dlouhá inkubační doba iniciace trhliny s následným relativně rychlým a výrazně se urychlujícím rozvojem porušení. Obecným cílem periodických NDT kontrol je proto provádět zkoušky dostatečně často a tak citlivě, aby byl případný rozvíjející se defekt detekován v pokud možno raném stádiu rozvoje, kdy vykazuje ještě nízkou rychlost růstu. V okamžiku existence většího defektu je již doba růstu do havarijního porušení mnohem kratší. Proto detekce i relativně malého nového defektu vede obvykle k odstavení konstrukce z provozu, aniž by to bylo vždy nezbytně nutné (pravděpodobnost poruchy  $10^{-1}$  resp.  $10^{-2}$  za rok je považována za vysokou).

**Pozn\*:** *Iniciaci porušení může urychlit, koroze – zvýšené korozní úbytky, resp. pitting, lokálně slabší struktura materiálu (svar, vycezenina), lokální koncentrace napětí či přídavná teplotní pnutí... resp. kombinace výše uvedených faktorů. Proto by měla být z tohoto pohledu podezřelá místa předmětem zvýšené pozornosti NDT kontrol.*



Obr.4: Tři příklady růstu porušení  $D$  v čase  $t$  (červená) se současným zobrazením růstu pravděpodobnosti s časem od poslední NDT inspekce (modrá).

Při výpočtu periody NDT kontrol se v rámci FFS (např. API 579) určí velikost porušení  $\Delta_2$  (velikost trhliny či korozní úbytek) odpovídající havarijnímu/meznímu stavu. Dále je určena minimální detekovatelnost porušení  $\Delta_1$  a rychlost růstu porušení mezi  $\Delta_1$  a  $\Delta_2$  (rychlost je daná vlastnostmi materiálu a podmínkami zatížení). Všechny tyto vstupy se zadají do výpočtu růstu velikosti porušení  $\Delta(t)$  v čase – červené linie na obr.4. Výpočet se provede např. dle metody Monte Carlo pro různé citlivosti detekce  $\Delta_1$ , mezní velikosti porušení  $\Delta_2$ , rychlosti šíření  $d\Delta/dt$  a určí se závislost pravděpodobnosti havarijního porušení na čase  $P(t)$  za podmínky, že v čase 0 nebylo detekováno porušení větší než  $\Delta_1$ .  $P(t)$  je zobrazena na obr.4 modrou linií. Obr.4 říká, že pokud nemá pravděpodobnost porušení překročit  $10^{-3}$  je zbytková životnost  $T$ . Perioda inspekce se pak určuje jako podíl této doby  $T$  – a neměla by být vyšší než 50% této doby, tzn. NDT kontroly by měly mít minimálně dvě možnosti detekce porušení v intervalu velikosti porušení  $\Delta_1$  až  $\Delta_2$ . Optimální příklad tohoto schématu ukazuje obrázek 4a). Obr.4b) ukazuje jak neblahé důsledky má snížení citlivosti detekce (nárůst  $\Delta_1$ ) na dobu  $T$  a tím zkrácení periody zkoušek. Na obr.4c) je pak ukázán příklad, kdy do výpočtu vstupuje velký rozptyl resp. neznalost rychlosti rozvoje porušení. Názorně řečeno s velkou pravděpodobností  $10^{-1}$  by doba  $T$  měla být minimálně 10 až 20 let, ale s malou pravděpodobností  $10^{-3}$  může být  $T$  též jen jeden až dva roky.

Výše uvedený výpočet konzervativně předpokládá, že v čase  $t=0$  je rozvoj porušení již iniciován a porušení se nadále rozvíjí. Pravděpodobnost iniciace však není 1. Vanová křivka není jen křivkou pravděpodobnosti konečného porušení ale též křivkou pravděpodobnosti iniciace porušení. Je-li pravděpodobnost iniciace porušení v době mezi druhým a 20-tým rokem (na obr.3) cca  $10^{-4}$ , pak pro dosažení pravděpodobnosti  $10^{-4}$  jsou inspekce téměř zbytečné. Na počátku provozu, kdy je POF iniciace např.  $10^{-2}$  je pro dosažení pravděpodobnosti  $10^{-4}$  nutno volit periodu inspekce, jež pokryje pravděpodobnost  $10^{-2}$  tzn.  $T$  cca 4 roky. Na obr.3 tak vidíme, jak vanová křivka ovlivní volbu periody inspekce v hypotetickém příkladu požadované bezpečnosti  $10^{-4}$ . První inspekce po prvním až druhém roce, druhá po 4 až 5 letech provozu, dále dvě inspekce po 8 letech, a po dvacátém roce provozu se perioda inspekce opět zkracuje na 4 resp. 2 až 1 rok.

Výše uvedené schéma je elegantní a názorné. Vyžaduje však dobrou znalost vstupních parametrů (viz. kapitola 2). Např. znalost vanové křivky vyžaduje zkušenost z porušení mnoha podobných konstrukcí s podobným provozem – což je zřídka k dispozici. Konec životnosti lze na vanové křivce určit např. z výpočtu Manson-Coffinovým vztahem. Ovšem opět je zde otázka znalosti vstupů. Např. chyba ve vstupní hodnotě rozkmitu plastické deformace řádu 2 krát způsobí chybu odhadu zbytkové životnosti 5 krát. Totéž platí o výpočtech rychlosti růstu trhliny.

*V každém případě je užitečné provést základní modelovou citlivostní analýzu dle výše uvedeného schématu, abychom získali základní představu o závažnosti znalostí/neznalostí jednotlivých faktorů.*



V případě,  
*kdy standardní NDT zkoušky jsou dostatečně spolehlivé (dobrá přístupnost a geometrie),  
kdy predikovatelnost mechanismů rozvoje porušení je ověřená (např. korozní úbytky),  
v případě jednoduchých či dobře známých podmínek zatížení a provozu,  
kdy perioda inspekci a jejich cena (včetně nákladů na odstavení a zpřístupnění míst NDT kontrol)  
jsou přijatelné*

pak za splnění těchto podmínek je efektivní provádět standardní periodické NDT kontroly jako základní a jedinou strategii inspekci. Nicméně pokud některá z výše uvedených podmínek není splněna, je vhodné minimálně zvážit a porovnat efektivnost i jiné strategie inspekci. Diskutujme tři takové strategie odlišné od periodických NDT kontrol a to :

**4.5. On-line monitorování neinvazivními metodami** a **4.4 Tlaková zkouška** a **4.6 Leak Before Break přístup.**

#### **4.4 Tlaková zkouška.**

Mezi významné povinné povýrobní zkoušky patří tlakové zkoušky, jež mají demonstrovat integritu (nepřítomnost úniku) a schopnost konstrukce odolat požadovanému zatížení. Totéž platí o tlakových zkouškách po opravách a při změnách provozních parametrů. Její význam je především ve snížení počáteční zvýšené pravděpodobnosti porušení vanové křivky. Nadto přináší tlaková zkouška užitek:

**Redistribuci lokálních špiček** napětí v důsledku lokální plastické deformace – především povýrobních špiček napětí v důsledku vnitřních pnutí u svaru, resp. v místech koncentrátoru napětí, ať již konstrukčních či technologických

**Otupení a vznik uzavírajících napětí** u případné trhliny iniciované za provozu jako významný prostředek zpomalení či dokonce zastavení malých trhlin v počáteční fázi rozvoje.

***Pozn:** Přínos těchto dvou bodů je vázán na houževnaté oceli s vyšší zásobou zpevnění. U oceli se sníženou houževnatostí a tažností, s nízkým stupněm zpevnění či dokonce u zkřehlých materiálu může tlaková zkouška naopak porušení iniciovat či urychlit. K této otázce plus otázce periody tlakových zkoušek se vrátíme v souvislosti s metodou akustické emise v kapitole 5.1.*

Pokud hodnotíme tlakovou zkoušku jako formu inspekce – jako zdroj informací potvrzující provozuschopnost konstrukce, je nutno řádně zvážit všechny souvislosti. Tlaková zkouška je integrální zkouškou celé konstrukce, zohledňuje reálný stav – pevnostní odolnost materiálu, zohledňuje skutečné rozložení zatížení v konstrukci, resp. výskyt defektů s jejich vliv na pevnost. Tlaková zkouška je vhodná pro konstrukce, kde hlavní roli stimulu porušení hraje statická pevnost vzhledem k vnitřnímu přetlaku média, kde počet zatěžovacích cyklů během životnosti dosahuje řádově stovky např. tlakové zásobníky. Je vhodná tam, kde hodnota informace získaná tlakovou zkouškou není omezena následnými faktory, a to :

- a) pokud za provozu existují zdroje zatížení převyšující byť lokálně zatížení vyvolané tlakovou zkouškou – obvykle se jedná o teplotní pnutí jak vlastní, tak vnesené souvisejícími komponentami*
- b) pokud mezní stav nelimituje statická pevnost materiálu za podmínek zkoušky, ale např. iniciace rychlého rozvoje defektu např. mechanismem vodíkového praskání, resp. za situace, kdy konstrukce pracuje za nízké teploty oproti teplotě zkoušky, apod...*

Tyto aspekty je nutno zvážit a rozhodnout jaké přetížení je akceptovatelné a jakou informaci o následné bezpečné provozuschopnosti poskytuje. Nezanedbatelnou otázkou efektivnosti tlakové zkoušky je její cena, jež může být nízká ale též velmi vysoká, ne pro vlastní provedení zkoušky ale pro nutnost odstavení a otevření konstrukce... jež může tlakovou zkoušku velmi prodražit.

#### 4.5 On-line monitorování neinvazivními metodami.

*Neinvazivní* NDT metody jsou takové, jež nevyžadují odstavení či otevření konstrukce – nevyžadují nákladné zpřístupnění míst kontrol. Tyto metody pak můžeme rozdělit na :

- a) Metody, jež vyžadují odstavení konstrukce z provozu (např. pro snížení teploty pro provedení zkoušky). Tyto metody mají zásadní význam v ušetření nákladů – ceny kontroly. Ve svém principu technickém jsou však obdobné standardním NDT kontrolám.
- b) Metody On-line monitorování umožňují kontrolu za provozu, bez nutnosti odstavení konstrukce z provozu.

Neúplný výčet těchto metod zahrnuje :

*Thermography, Long range Ultrasonics (Guided Waves), Pulsed Eddy Current, Magnetic Flux Leakage, Acoustic Emission – již je věnována specializovaná kapitola 5.*

V souvislosti se systémy monitorování porušení konstrukce zdůrazněme též systémy poskytující informace o provozních podmínkách konstrukce, tlakových a teplotních cyklech, tenzometrická měření a měření teplot... (např. systém Dialife). Tyto informace jsou velmi významné pro hodnocení životnosti, plánování inspekci především výrobních celků s komplexnějším režimem zatížení a podmínkami provozu.

Význam těchto metod s RBI přístupem roste zásadním způsobem. Proč, když jsou tyto metody sami o sobě nákladnější, méně citlivé, méně universální oproti standardním NDT metodám. **Důvod je v ceně.** Přestože tyto metody mohou být sami o sobě nákladnější než zkoušky standardními NDT metodami, pak při započtení nákladů na umožnění zkoušky – náklady odstavení a zpřístupnění míst kontrol mohou prodražit standardní NDT kontroly až o několik řádů, (z  $10^4$  až  $10^5$  na  $10^6$  až  $10^7$  Kč).

#### 4.6 Monitorování a detekce úniků - Leak before Break (LBB).

V některých případech, kdy jsou inspekce s cílem včasné detekce iniciace a rozvoje porušení nákladné a problematické, lze zvolit strategii Leak Before Break (LBB) „Únik před lomem“ – je to tehdy kdy k porušení integrity stěny tlakového zařízení dojde formou úzké trhliny, jež způsobí nejprve malý přípustný únik před svým dalším rozvojem > růstem úniku > či dokonce lomem. V tomto případě je cílem inspekci včasná a citlivá detekce úniku. Tuto strategii lze zvolit v případě, kdy unikající médium nehrozí závažnými ekologickými následky, je vysoce hořlavé či dokonce výbušné.

Ale i těchto případech nebezpečných látek, kdy je únik nepřijatelný má inspekce v rámci RBI své jednoznačné místo. Včasná a spolehlivá detekce úniků může v rámci RBI sehrát roli významného snížení následků poruchy (COF) – ekologických následků minimalizací množství uniklého média, pravděpodobnosti vzniku požáru či výbuchu. V tomto případě monitorování uniku nesnižuje POF (jako standardní inspekce) ale snížení rizika poskytuje ve formě snížení COF.

#### 4.7 Kombinace jednotlivých metod a přístupů.

V částech 4.2. až 4.6. byla ukázány různé možnosti zajištění bezpečného provozu – tzn. „udržení“ pravděpodobnosti porušení pod požadovaným limitem. Při konkrétní RBI analýze se může ukázat jako optimální nasazení jedné metody, jedné strategie. Často je naopak vhodnější různé metody kombinovat. Pokud se metody svými informacemi nepřekrývají, pak pro nízký limit např.  $10^{-4}$  bývá levnější garantovat pravděpodobnost dvěma metodami s nižším limitem POF např.  $10^{-2}$  než jednou metodou, na které jako na jediné požadujeme limit  $10^{-4}$ . Kombinace metod má svůj význam i jako vzájemná nezávislá kontrola, kdy jedna metoda kontroluje metodu druhou.

## 5. Začlenění a role metody akustické emise (AE) v rámci přístupu RBI.

Mezi významné neinvazivní NDT metody s možností On-line monitorování rozvoje porušení konstrukce a současně detekce netěsností a úniků patří metoda Akustické emise. AE sice patří mezi NDT metody, ale svým principem se od typických NDT metod významně odlišuje. Metoda akustické emise a typické NDT metody se z podstaty svého principu poskytovanými informacemi a režimem nasazení nepřekrývají, ale vhodně doplňují. Uveďme tři základní přednosti a tři nedostatky metody AE z pohledu potenciálu a omezení jako metody inspekce v rámci RBI.

+1) Metoda AE je metoda integrální, objemová, neinvazivní. Detekuje rozvoj procesů „na dálku“ (typicky několika metrů) současně z celé monitorované oblasti konstrukce osazené snímači, včetně procesů z míst nepřístupných či nákladně zpřístupnitelných. Síť snímačů umožňuje více či méně přesnou lokalizaci detekovaného procesu.

+2) Metoda AE umožňuje On-line monitorování konstrukce za provozu (bez nutnosti odstavení konstrukce z provozu). On-line monitorování je žádoucí zaměřit především na režimy provozu, jež představují největší stimul rozvoje porušení (obvykle přechodové jevy, špičky zatížení, ...)

+3) Metoda AE detekuje proces porušení a monitoruje jeho rozvoj v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, skutečné místní úrovni napětí resp. deformací, při reálném stavu materiálu, při reálném působení korozního média... Metoda AE s přítomností defektu detekuje též přítomnost podmínek pro jeho rozvoj.

-1) Metoda AE odhaluje porušení pouze v jeho průběhu. Pokud k rozvoji porušení dojde a my jej nezaregistrujeme, pak je to stav nevratný. Zkoušku nelze opakovat a výsledky lze ověřit jen jinou NDT metodou.

-2) Metoda AE není universální. To za prvé znamená, že ne všechny mechanismy porušení (*intenzita signálu procesu*) jsou na všech konstrukcích (*podmínky akustického rušení*) metodou AE detekovatelné. Za druhé to znamená, že smysl má nasazení AE v etapách provozu s nejvyšší úrovní stimulu porušení. Jinými slovy metodu AE nelze aplikovat kdykoliv.

-3) Správné nasazení metody a vyhodnocení závěrů z výsledků měření není jednoduché. Při nedostatečné zkušenosti či komplexních znalostech může vést vyhodnocení k chybným závěrům. Správné vyhodnocení závěrů vyžaduje buď dobrou zkušenost z podobných konstrukcí a aplikací či kvalifikovaný rozbor možných mechanismů rozvoje porušení, znalost režimů provozu, v rámci nichž může k rozvoji porušení docházet, rozbor citlivosti a spolehlivosti detekce...

Podrobná diskuse a rozbor smysluplnosti a efektivnosti nasazení metody AE byla uvedena na předchozí konferenci Chisa 2001 [1]. Obecně lze konstatovat že nasazení AE má smysl a význam všude tam, kde lze s dostatečnou pravděpodobností konstatovat platnost tvrzení:

**Bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt =>  
pak bude metodou AE detekován a jako závažný vyhodnocen. :**

Příčemž posouzení platnosti tohoto tvrzení se skládá z kladné odpovědi na tři otázky:

- 1) Pokud k rozvoji porušení dojde, bude metodou AE detekovatelné z hlediska citlivosti/rušení ?
- 2) Aplikujeme metodu AE skutečně v době působení nejvyšších stimulů porušení konstrukce ?
- 3) Lze z výsledku, že rozvoj porušení nebyl detekován, vyvodit závěr, že v konstrukci závažný defekt není přítomen? Otázku 3 lze zformulovat též jako **Zobecněný princip tlakové zkoušky:**

*Pokud k rozvoji porušení nedochází v okamžicích a místech nejvyššího stimulu porušení, pak k rozvoji porušení nedochází vůbec.*

**Je-li odpověď na tři výše uvedené otázky kladná, má nasazení metody AE smysl.**

## 5.1 Nasazení metody Akustické emise při tlakových zkouškách

Aplikace metody AE v rámci tlakové zkoušky představuje prvotní a dosud nejrozšířenější aplikaci metody AE. Jsou k tomu dobré důvody.

**1) Aktivita rušivého akustického pozadí bývá při tlakových zkouškách minimální.** Jediným zdrojem rušivého akustického pozadí bývají netěsnosti či úniky. Současně lze však detekci netěsností při tlakové zkoušce považovat za užitečný výsledek nasazení metody AE při zkoušce.

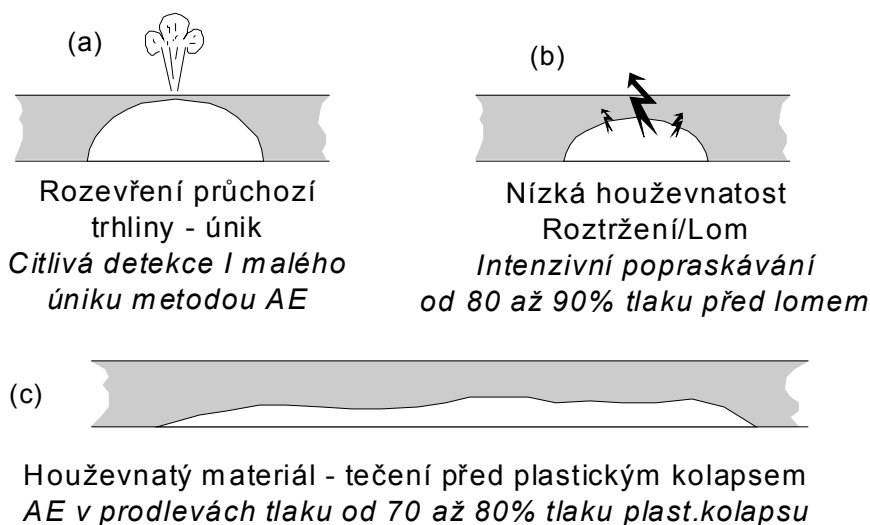
**2) Pokud má tlaková zkouška smysl, má smysl též nasazení metody AE.** Tlaková zkouška má smysl pokud přetlak vnitřního média za podmínek (např. teploty) zkoušky představuje nejvyšší stimul porušení konstrukce – přesahující stimuly provozní (viz. kapitola 4.4). Pokud toto platí pro tlakovou zkoušku, platí to též pro metodu AE.

**3) Metoda AE významně zhodnocuje informaci o stavu konstrukce** oproti tlakové zkoušce bez aplikace AE. K prvotní iniciaci porušení konstrukce dochází cca při 0.6 až 0.9 zatížení/tlaku, při kterém dochází k destrukci. Čím vyšší je tento poměr (0.85 až 0.9) tím vyšší je intenzita signálu při iniciaci porušení (viz. bod 4). Průměrná hodnota detekce porušení metodou AE je cca 0.8 tlaku destrukce. Efektivní hodnota tlakové zkoušky s přetížením 10% oproti tlaku provoznímu tak roste díky AE na hodnotu informace přetížení 30 až 40%. Přetížením tlakové zkoušky o 30% roste hodnota informace tak, jako by přetížení činilo 50% až 70% provozního zatížení.

**4) Porušení konstrukce metodou AE je při tlakové zkoušce dobře detekovatelné.** V případě houževnatého materiálu s dostatečnou zásobou zpevnění má tlaková zkouška pozitivní vliv na zpomalení či dokonce zastavení růstu defektů. Nebezpečí vznikají (obr.5b) v oblastech se *sníženou houževnatostí, s nízkým stupněm zpevnění a tažnosti, v lokalitách s víceosou tahovou napjatostí či dokonce u zkřehlých materiálů*, kdy může tlaková zkouška naopak porušení iniciovat či urychlit. Současně však všechny výše kurzivou uvedené faktory jsou faktory výrazně zesilující intenzitu signálu AE generovaného v okamžiku rozvoje porušení. Tzn. náhlý výskyt signálů AE vysoké intenzity při vysoké úrovni zatížení je závažným příznakem porušení konstrukce.

**Obr.5:** Tři varianty projevu porušení či trhliny při tlakové zkoušce :

- a)** únik v důsledku rozevření průchozí trhliny - **b)** Nízká houževnatost – roztržení/lom konstrukce  
**c)** dlouhá trhlina v houževnatém materiálu – plastický kolaps.



**Pokud se tlaková zkouška provádí, je efektivní nasadit současně metodu AE.  
Hodnota informace poskytovaná tlakové zkouškou díky nasazení AE výrazně narůstá.**

Nejsou-li v konstrukci přítomny podmínky pro výrazné snížení houževnatosti, pak ani průchozí trhlina (ne příliš dlouhá) nehrozí nebezpečím roztržení ani silnostěnné konstrukce. K porušení stěny dojde rozevřením průchozí trhliny obr.5a). Nebezpečí roztržení konstrukce vzniká v případě snížené houževnatosti obr.5b) resp. velké šířky trhliny obr.5c). Všechny tři varianty metoda AE pokrývá.

a) *Jak ve velmi citlivé detekci i velmi malého úniku*

b) *Tak ve formě intenzitního kritéria – výskyt intenzivních událostí AE v nejvyšších úrovních tlaku*

c) *V detekci plastického tečení - AE v prodlevách růstu tlaku, aktivita v druhém cyklu tlakování.*

### 5.1.1. Povýrobní tlaková zkouška.

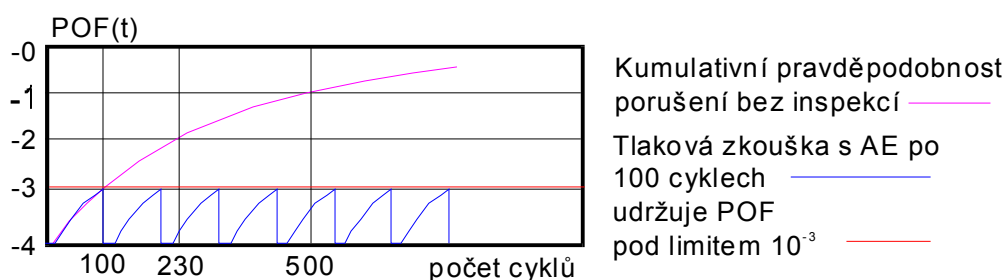
Tlaková zkouška má velký význam především při prvním zatížení konstrukce po výrobě (viz.4.4). Též nasazení AE má při první povýrobní tlakové zkoušce obzvláštní význam. Jedná se o první zatížení konstrukce, kdy AE detekuje procesy relaxace vnitřních pnutí, „popraskávání“ technologických defektů resp. velkých inkluzí v místech vysokých napětí. Poskytuje doklad, že se materiál při tlakové zkoušce „usadil“ a procesy „utichly“. Upozorňuje na místa, kde byla zaznamenána aktivita v materiálu tlakové nádoby či potrubí. Na místa směřuje následnou kontrolu NDT. Současně se jedná o místa zvýšené pravděpodobnosti rozvoje porušení za následného provozu konstrukce.

### 5.1.2 Snížení pravděpodobnosti POF tlakovou zkouškou s AE.

Konkrétní hodnoty snížení POF v důsledku tlakové zkoušky s nasazením AE závisí na konkrétní konstrukci a podmínkách provozu. Nicméně uveďme hypotetický ukázkový příklad vycházející pouze z nízkocyklové únavy materiálu bez vlivů koroze, vodíku... Předpokládejme, že pro „významnější“ rozvoj porušení při zatížení 0.8-0.9 meze pevnosti (či lomové houževnatosti) je potřeba řádově sto zatěžovacích cyklů. Pro 0.7-0.8 meze pevnosti (či lomové houževnatosti) již tisíc cyklů. Pak zohledněním pravděpodobnosti výše uvedených hodnot můžeme dospět např. k výsledku, kdy při požadované pravděpodobnosti  $POF < 10^{-3}$  nám tuto pravděpodobnost garantuje tlaková zkouška s AE dobu provozu odpovídající cca 100 cyklům zatížení, pro pravděpodobnost  $10^{-2}$  dobu odpovídající cca 230 cyklům a s pravděpodobností  $10^{-1}$  dobu odpovídající 500 cyklům zatížení – poklesu tlaku na nulu a nárůstu tlaku zpět na provozní tlak – viz. obr.6.

Porovnáním s tlakovou zkouškou bez AE dospějeme k závěru, že na ty samé pravděpodobnosti POF je počet přípustných cyklů několikanásobně nižší a nadto zůstává neznámá odpověď na otázku, zda při tlakové zkoušce nedošlo ke skrytému „natržení“ konstrukce, které by POF výrazně navýšilo.

Obr.6: Schématické znázornění periodického snižování POF v důsledku tlakové zkoušky s AE.



### 5.1.3 Přetěžovací provozní zkoušky AE.

Mezistupeň mezi tlakovými zkouškami a On-line monitorováním AE tvoří přetěžovací zkoušky s měřením AE za provozu - obvykle s přetížením 10% provozního tlaku. Hodnota informace, že při této zkoušce nebyl detekován příznak porušení je ekvivalentní tlakové zkoušce, při které nedošlo k porušení s přetížením 30-40%, přičemž zkouška nevyžaduje odstavení konstrukce z provozu. Pravděpodobnost, že by při přetížení 10% došlo k destrukci je minimální. Pokud by však i rozsah porušení byl takový, že by při přetížení 10% hrozilo porušení stěny, pak je dobře, že jsme tuto zkoušku provedli za kontrolovaných podmínek a že jsme na poslední chvíli předešli nečekanému porušení za provozu. Metoda AE by hrozbu porušení (obr.5b), 5c) resp. únik obr.5a) detekovala.

### 5.3. Nasazení metody Akustické emise při provozním On-line monitorování konstrukcí.

On-line monitorování rozvoje porušení za provozu poskytuje oproti periodickým inspekcím ať NDT či formou tlakových zkoušek (s nasazením AE), několik významných přínosů:

- a) Lze výrazně zkrátit periodu inspekcí limitně při trvalém monitorování až k nule a pokrýt tak významnou část pravděpodobnosti POF. Tím se snižují požadavky na následné NDT kontroly - což může vést k prodloužení periody odstávek.*
- b) On-line monitorování je prakticky jediným způsobem limitu POF na požadovanou hodnotu v případě, kdy existuje zvýšená pravděpodobnost náhlého rychlého rozvoje porušení (např. vodíkové praskání), tzn. kdy by jinak byla nutná nepřijatelně krátká perioda inspekcí.*
- c) Umožňuje zefektivnit plánování prací a činností před odstávkami tím, že za provozu před odstávkou vytipuje riziková místa a zaměří na ně standardní NDT kontroly či plán opravy/výměny během odstávky (viz. nečekané „nadnáklady“ při náhlém nečekaném zjištění porušení konstrukce při NDT kontrolách za odstávky – kapitola 1).*
- d) V případě výskytu závažnějšího porušení NDT inspekcí při odstávce, kdy pravděpodobnost POF následného provozu bez kontroly by byla příliš vysoká (např.  $10^{-1}$  za rok) umožní On-line monitorování tuto konstrukci pod kontrolou provozovat do doby, než je naplánována a připravena oprava či výměna komponenty).*

Růst pravděpodobnosti detekce rozvoje defektu výrazně narůstá se závažností defektu. Proto z hlediska RBI a požadavku na omezení/limitaci pravděpodobnosti POF je optimální použít provozní On-line monitorování AE v druhé polovině periody mezi odstávkami a při „pozitivním“ výsledku provozního monitorování či zkoušky periodu inspekcí prodloužit. Při „negativním“ výsledku ponechat konstrukci pod zvýšenou kontrolou On-line monitorování do plánované odstávky a na přítomnost porušení detekovaného za provozu se při plánování odstávky připravit.

Metodu AE nasazujeme v případě On-line monitorování ve dvou režimech

*trvalé On-line monitorování resp.  
monitorování ve vybraných etapách nejvyššího stimulu porušení konstrukce.*

V obou případech jsou nejprve připravena měřicí místa sítě AE (např. instalovány vlnovody), případně nainstalovány snímače AE – pokud by byla za provozu instalace snímačů problematická. A následně připojíme měřicí systém AE a to buď na trvalé monitorování, či postupně přesouváme měřicí systém mezi konstrukce a připojujeme na předinstalovaná měřicí místa v etapách provozu nejvyšších stimulů porušení.

Zdůrazněme velký potenciál bodů **a)** až **d)** a výše uvedené diskuse z pohledu RBI a přidejme k těmto bodům i potenciál metody AE jako prostředku okamžité citlivé detekce úniků (5.3).

### 5.3 Nasazení metody AE jako metody monitorování a detekce úniků.

Schopnost metody AE detekovat velmi citlivě úniky poskytuje v rámci On-line monitorování AE též okamžitou On-line detekci výskytu případné netěsnosti či úniku za provozu konstrukce. Tzn. metoda AE je schopna na jedné straně současně „hlídat“ přítomnost rozvoje porušení na straně druhé detekovat případnou netěsnost průchozí trhliny. Metoda AE tak může plnit funkci automatizovaného monitorovacího systému okamžité detekce výskytu úniku jak v rámci přístupu LBB, tak jako opatření snižující razantním způsobem pravděpodobnost výskytu závažných následků výskytu úniku (COF – viz. 4.6) – jak ekologických následků minimalizací množství uniklého média, tak následků snížením pravděpodobnosti vzniku požáru či výbuchu..

## 6.Závěry

RBI představuje posuv od konkrétně předepsaných zkoušek k definování obecných bezpečnostních požadavků a cílů. Poskytuje provozovatelům možnost ekonomicky efektivní volby prostředků pokrytí rizika provozu nebezpečných konstrukcí. Současně však musí provozovatel doložit, že pro konstrukci s daným stupněm závažnosti následků havarijního porušení COF nepřekračuje pravděpodobnost havarijního porušení jistou limitní maximální pravděpodobnost porušení POF:

Příspěvek zdůrazňuje, že pravděpodobnostní hodnocení není jen otázkou teoretického výpočtu POF, pravděpodobnosti porušení na základě známého pravděpodobnostního rozdělení vstupních hodnot. Zdůrazňuje, že musí zahrnovat též zhodnocení naší neznalosti důležitých faktorů ovlivňujících pravděpodobnost porušení a zpětnou vazbu znalosti reálného stavu konstrukce a zkušenosti z provozu danou provozními inspekcemi a kontrolami.

V rámci RBI má inspekce za úkol provozními kontrolami efektivně doplňovat informace s cílem minimalizovat stupeň naší neznalosti skutečného stavu konstrukce vzhledem k hodnocení pravděpodobnosti porušení POF. Příspěvek považuje za základ standardní periodické NDT kontroly. Současně však poukazuje, že existuje celá řada jiných přístupů, strategií, možností pokrytí limitu POF, jež mohou být v rámci přístupu RBI finančně efektivnější. Především poukazuje na případy vysoké ceny NDT inspekcí z důvodu rozsahu kontrol, přístupnosti resp.zpřístupnění míst kontrol. Příspěvek ukazuje vybrané alternativní možnosti spojené s nasazením metody akustické emise z pohledu RBI a hodnocení pravděpodobnosti porušení POF v souvislosti s aplikací AE.

Příspěvek názorně dokládá tvrzení, že hodnota informace poskytovaná tlakovou zkouškou díky nasazení AE výrazně narůstá. Dále příspěvek ukazuje, jak započítat výsledek tlakové zkoušky s nasazením AE do hodnocení pravděpodobnosti porušení konstrukce.

Příspěvek zdůrazňuje velký význam neinvazivních NDT metod s možností On-line provozního monitorování rozvoje porušení konstrukce, mezi něž patří též AE. Příspěvek ukazuje na velký potenciál metody AE jako metody provozního monitorování rozvoje porušení v rámci přístupu RBI.

V rámci provozního monitorování umožňuje AE současně detekci rozvoje porušení též citlivou detekci případného úniku. To umožňuje nasazení AE jak v rámci přístupu LBB, tak jako prostředku snížení rizika snížením následků havarijního porušení- jak ekologických následků minimalizací množství uniklého média, tak následků snížením pravděpodobnosti vzniku požáru či výbuchu

*Závěrem je naší milou povinností vyjádřit poděkování mimo jiné za podporu pilotnímu projektu PP51012, který je řešen v rámci záměru Ústavu termomechaniky AVOZ 2076919.*

## 6.Literatura

- [1] M.Příbáň, P-Hora,J.Vlach : „*Hodnocení a klasifikace závažnosti zdrojů akustické emise z hlediska zajištění bezpečnosti provozu tlakových nádob a potrubí v chemickém průmyslu.*“ Chisa 2001, Srní, říjen 2001
- [2] M.Příbáň, P-Hora,J.Vlach : „*Akustická emise jako efektivní prostředek provozní inspekce tlakových nádob a potrubí*“ Chisa 1999, Srní, říjen 1999
- [3] “*Best Practice for Risk Based Inspection as Part of Plant Integrity Management*“ TWI Contract Research Report 363/2001.
- [4] Sims.B.: „*The Use of Risk Anylysis in Decision Making*“ Lyondell/Equistar Reliability Forum 2003
- [5] “*Risk Based Inspection and Maintenance Procedures – project RIMAP* “ Internet Intorduction and Presetation
- [6] M.J.Kallen : „*Risk Based Inspection in Process and Refinig Industry*“ Delft, December.2002