



UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky

---

Analýza signálov akustickej emisie a ultrazvukového  
prežarovania zaťažovaných horninových vzoriek

Analysis of acoustic emission and ultrasound  
radiation of loaded rock samples

DIPLOMOVÁ PRÁCA

**Tomáš Svitek**

---

Vedúci diplomovej práce: RNDr. Tomáš Fischer, PhD.

Praha 2008

Prehlasujem, že som diplomovú prácu napísal samostatne pod vedením Dr. Tomáša Fischera a s prispením citovanej literatúry. Použité dáta boli získané vďaka grantu Grantové agentury ČR, číslo 205/06/0906.

Na tomto mieste by som chcel podľakovať všetkým, ktorí mi pri vypracovávaní tejto práce pomáhali. Moja vďaka patrí obzvlášť Dr. Tomášovi Fischerovi, PhD., za jeho odborné vedenie a pomoc pri vypracovávaní tejto práce, Doc. Jánovi Vilhelmovi, CSc., za jeho rady pri tvorbe aplikácie, v ktorej boli dátá spracovávané. Ďalej by som chcel podľakovať Ing. Tomášovi Lokajíčkovi, CSc., za zasvätenie do aplikácie Vallen systeme a tiež pracovníkom Geologického ústavu AV ČR za obstaranie dát zo zaťažovacích experimentov.

V neposlednej rade moja vďaka patrí rodičom, priateľom a všetkým zainteresovaným osobám, ktorých pričinením mohla táto práca vzniknúť.

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaobrá procesom určovania času príchodu signálu a následnou lokalizáciou javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania. Jej cieľom bolo vytvoriť programové prostredie k porovaniu časov príchodov určených manuálne a komerčným softwarom Vallen a vytvoriť vlastný algoritmus k automatickému určovaniu časov príchodov. Vytvorený program Pick\_Tester je založený na výpočte pomeru STA/LTA, pričom interval hľadania času príchodu je vymedzený veľkosťou analyzovanej horninovej vzorky. Program bol aplikovaný na jeden dátový súbor ultrazvukového prežarovania a na dva dátové súbory akustickej emisie. Získané odčítania časov nasadení sú vyhodnotené v porovnaní s manuálnymi odčítaniami, ktoré sú považované za správne. Boli porovnávané rozdiely časov nasadení, rozdiely polôh ohnísk a sumy rezíduí lokalizácií. Ukázalo sa, že vytvorený algoritmus dáva oveľa lepšie výsledky ako komerčne predávaný software Vallen. Pre 75 % spracovaných javov sú rozdiely manuálnych časov nasadení od automatických do 10 vzoriek a vzájomných polôh ohnísk z nich určených do 8 mm. Ďalšie testy ukázali, že vytvorený algoritmus dáva konzistentné výsledky na rôznych dátových súboroch.

**Kľúčové slová:** lokalizácia, čas príchodu, STA/LTA, automatické spracovanie dát.

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the determination of signal arrival times and consequent localization of events of acoustic emission and ultrasonic transmission. Its aim was to create a software for the comparison of arrival times, determined manually and by commercial software Vallen and to create our own algorithm for automatic determination of arrival times. The created Pick\_Tester program is based on the calculation of the STA/LTA ratio, while the interval of arrival time detection is defined by the size of the analysed rock sample. The program was applied to one ultrasonic transmission data file and to two acoustic emission data files. The quality of the obtained arrival time picks was assessed by comparison with the picks obtained manually, which are regarded to be correct. Differences in arrival time picks and hypocentre positions and the residual sums of localizations were compared. It was shown that the created algorithm gives much better results than the commercial Vallen software. For 75% of the processed events, the difference between the manual and automatic picks is smaller than 10 samples, as well as the mutual differences of corresponding hypocentre locations is below 8 mm. Further tests have shown that the created algorithm gives consistent results at various data files.

**Key words:** location, picking, STA/LTA, grid search

## OBSAH:

<b>1.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>LABORATÓRNY VÝSKUM PORUŠOVANIA HORNINOVÝCH VZORIEK .....</b>	<b>2</b>
2.1.	Mechanické zaťažovanie .....	2
2.2.	Javy akustickej emisie .....	2
2.3.	Metódy lokalizácie akustickej emisie .....	3
<b>3.</b>	<b>SPRACOVÁVANÉ DÁTA - POPIS EXPERIMENTU .....</b>	<b>5</b>
3.1.	Skúmaný horninový materiál .....	5
3.2.	Proces zaťažovania a priebeh experimentu.....	6
3.2.1.	<i>Nastavenie aparátury pred začatím merania.....</i>	9
3.2.2.	<i>Zaznamenávanie údajov .....</i>	12
3.3.	Analyzované vzorky .....	13
<b>4.</b>	<b>METODIKA URČOVANIA ČASU PRÍCHODU A LOKALIZÁCIE JAVOV.....</b>	<b>20</b>
4.1.	Popis procesu spracovania a možnosti softwaru Vallen .....	20
4.2.	Faktory vplývajúce na presnosť lokalizácie javov.....	22
4.3.	Ocenenie kvality lokalizácií.....	25
<b>5.</b>	<b>ÚPRAVY METODIKY SPRACOVANIA DÁT .....</b>	<b>27</b>
5.1.	AView .....	27
5.2.	Program pre automatické určovanie prvého nasadenia .....	30
5.3.	POPIS DETEKTORU PROGRAMU PICK_TESTER .....	32
<b>6.</b>	<b>DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A ICH DISKUSIA.....</b>	<b>38</b>
6.1.	Ultrazvukové prežarovanie (UT) .....	38
6.2.	Akustická emisia (AE).....	45
<b>7.</b>	<b>DISKUSIA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV .....</b>	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>57</b>
<b>9.</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>58</b>
9.1.	Príloha 1: Algoritmus výpočtu STA, LTA .....	58
9.2.	Príloha 2: Algoritmus určovania času príchodu signálu .....	59
<b>10.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATÚRA: .....</b>	<b>61</b>

## **1. ÚVOD**

Táto práca pojednáva o vyšetrovaní signálov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania zatiaľovaných horninových vzoriek. Súčasťou nových aparátur slúžiacich na získavanie takýchto dát zvykne byť aj softwarové vybavenie, ktoré prináša nové možnosti ich spracovania, a ktoré v dnešnej dobe dokáže veľmi uľahčiť prácu. Tu sa však ponúka otázka, čo vlastne výsledky experimentov reprezentujú, pretože programy sú od výrobcu chránené a tak nie je možné overiť viero hodnosť výsledkov. Potom zakladat' vedecké závery na takýchto výsledkoch nie je veľmi vhodné. Jedným zo spomínaných zariadení je aj aparátura Vallen systém. Táto aparátura zaznamenáva vlnové obrazy dejov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania, ako aj hodnoty rôznych veličín, ktoré sú spojené s konkrétnymi signálmi jednotlivých dejov. Pre určovanie polohy ohniska prirodzených javov akustickej emisie je veľmi dôležité správne určenie času prvého nasadenia prichádzajúceho signálu. Aparátura Vallen systém dokáže tieto časy, po nastavení určitých parametrov, určovať aj sama, nie vždy však odpovedajú správnej hodnote príchodu signálu a tým teda dochádza k nesprávnemu určeniu polohy ohniska jednotlivého deja.

Cieľom tejto práce je analýza procesu spracovania dát akustickej emisie, ktoré boli získané touto aparátúrou, navrhnuté programové prostredie, v ktorom bude možné porovnať nasadenia vln určené aparátúrou Vallen systém s manuálnymi nasadeniami a zistené chyby ďalej analyzovať. Ďalším cieľom je vyvinutý algoritmus, ktorý by umožňoval automatické určovanie miest časov príchodov signálov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania, ktorý bude porovnaný s inou aplikáciou pracujúcou na princípe vyšších štatistických momentov. Ako kritéria ohodnotenia kvality nameraných výsledkov budú využívané presnosť určenia časov prvého nasadenia prichádzajúcich signálov, z nich potom presnosť lokalizácie, veľkosť rezídua lokalizácie, odhad lokalizačnej chyby a prípadne ďalšie veličiny akustickej emisie a prežarovania.

Výsledkom by mala byť modifikácia procesu spracovania dát tak, aby nedochádzalo k prípadným skresleniam výsledkov interpretácie.

## **2. LABORATÓRNY VÝSKUM PORUŠOVANIA HORNINOVÝCH VZORIEK**

### **2.1. MECHANICKÉ ZAŤAŽOVANIE**

Mechanické zaťažovanie horninových vzoriek môže prebiehať za rôznych podmienok. Typy experimentov môžeme deliť napríklad podľa smeru pôsobiaceho tlaku, ktorým skúmanú vzorku zaťažujeme na jednoosové a viacosové, podľa režimu zaťažovania na plynulé, skokovité alebo cyklické a podľa dĺžky trvania na krátkodobé (desiatky minút), strednodobé (stovky až tisícky minút) a dlhodobé (až desiatky tisíc minút). Taktiež sa môže brať ohľad na to, či bude pokus prebiehať s konštantným prírastkom pôsobiacej sily, alebo deformácie. Tieto veličiny sa môžu počas experimentu zapisovať a pri spracovávaní a následnej interpretácii sa v závislosti na nich môžu usudzovať rôzne závery.

### **2.2. JAVY AKUSTICKEJ EMISIE**

Najdôležitejšie informácie však obsahujú dátá akustickej emisie. Pri procese zaťažovania dochádza k lokálnemu prekročeniu medze pevnosti materiálu, ktorého následkom je vyžiarenie energie v podobe elastickej vlny, ktorá odráža mechanické vlastnosti prostredia, v ktorom sa šíri, ako aj mechanizmus vzniknutého javu. Javy akustickej emisie zahŕňajú dej o frekvenciach od stoviek Hz až po prvé jednotky MHz (javy ultrazvukovej emisie), pričom frekvencia vlnenia závisí nepriamo úmerne od rozmerov zdroja vlnenia (Vilhelm, 2003). V laboratórnych podmienkach je emisia zaznamenaná sietou najčastejšie piezokeramických snímačov, ktoré sú prilepené na povrchu vzorky. Z takto zaregistrovaného signálu vieme vyčítať rôzne parametre, ako napríklad znamienko a čas prvého nasadenia, veľkosť maximálnej amplitúdy, energie, prevládajúcu frekvenciu apod., ktoré sa počas experimentu môžu meniť v závislosti od veľkosti pôsobiaceho napäťia a stavu porušenia vzorky. Spracovaním zaznamenaných údajov sme potom schopní určiť ohnisko javu, v ktorom došlo k uvoľneniu energie. Následným vyhodnotením zón s najväčšou aktivitou potom môžeme usudzovať na mechanických vlastnostiach skúmanej horniny. Napriek tomu, že k jednoosovému zaťažovaniu hornín v prírode nedochádza tak často, snažíme sa laboratórnymi skúškami simulať procesy podobné tým, ku ktorým bežne dochádza v ich prirodzenom prostredí. Keďže skúmaný materiál vykazoval značnú anizotropiu, ktorá sa jednoosovým zaťažovaním dá ľahko zachytiť, snažili sme sa túto vlastnosť vystihnúť

zaťažovaním horninových vzoriek vyvŕtaných z bloku horniny v rôznych smeroch. Získané poznatky sa tak dajú využiť pri riešení rôznych úloh, či už v seizmológii, inžinierskej geológii alebo iných vedeckých odvetviach.

### 2.3. METÓDY LOKALIZÁCIE AKUSTICKEJ EMISIE

Problematika určovania ohniska je daná štyrmi neznámymi, a sice sú to súradnice ohniska  $x, y, z$ , a čas vzniku javu akustickej emisie  $t$ . Vstupnými parametrami pre výpočet lokalizácie sú časy nasadení signálu namerané snímačmi. Ďalej je počítaný rýchlosť model šírenia elastického vlnenia vzorkou, ktorý namerané časy koriguje (Petružálek et al., 2007a).

Problematika lokalizácie je rozoberaná v mnohých prácach (Vilhelm et al., 2006, Lockner, 1993) a existujú rozličné spôsoby spracovania získaných dát, ktoré vo svojich výpočtoch zahŕňajú zjednodušenia, či už o homogénnosti a izotropnosti materiálu alebo predpokladajú znalosť o rýchlosti šírenia elastických vín vo vnútri vzorky. Takéto podmienky následne negatívne ovplyvňujú výsledky. Niektorí autori do výpočtu polohy ohniska zavádzajú výpočet elipsoidu anizotropie rýchlosť šírenia P-vín (Petružálek et al., 2007b), ktoré by malo lokalizáciu značne spresniť. Určenie polohy ohniska je realizovateľné pomocou rôznych postupov. Detailnejšie sa tým zaoberal napríklad Veverka (2000), ktorý popisuje numerické metódy lokalizácie niekoľkými spôsobmi. Vo všeobecnosti platí, že problém lokalizácie ultrazvukovej emisie je inverzná úloha. To znamená, že parametre modelu určujeme iteratívne porovnávaním meraných dát a dát vypočítaných z modelu. V našom prípade lokalizácie namerané časy predstavujú dátá a poloha ohniska predstavuje model.

Výsledky interpretované v tejto práci sú dosiahnuté použitím mriežkovej metódy (tiež grid search). Tento výpočet je založený na úvahe o rozdelení objemu valcovej vzorky na elementárne bunky objemu, ktoré sú dostatočne malé na to, aby sme napríklad ich stred mohli s postačujúcou presnosťou stotožniť s polohou ohniska dej. Problém nájdenia polohy ohniska tak redukujeme na problém určenia, ktorá z týchto objemových buniek najlepšie odpovedá nameraným časom príchodov. Z rozmerov vzorky, na základe jej delenia, vieme určiť polohu každého takého elementu, a teda aj jeho vzdialosť ku každému snímaču. Za predpokladu homogénneho rýchlosťného modelu je  $FS_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$ , kde  $FS$  je vzdialosť

element - snímač,  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  sú súradnice snímačov  $i = 1, 2, 3 \dots N$  (počet snímačov),  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  predstavujú súradnice jednotlivých elementov. Z každej takejto častice je spočítaný teoretický čas, ktorý seismický lúč potrebuje k tomu, aby dorazil k jednému snímaču. Takto získanú maticu dát rozšírime o časy pre všetky snímače a potom ich porovnáme s časmi nameranými. Ohnisko nastáva v elemente, ktorý spĺňa podmienky rovnice

$$R_0 = \sum_{i=1}^M \left( \frac{FS_i}{v} - tm_i - a \right)^2 = \min, \quad (2.1)$$

kde  $F = (x_0, y_0, z_0)$  je objemová častica,  $S_i$  sú snímače,  $v$  je rýchlosť šírenia vlny prostredím,  $tm_i$  sú namerané časy príchodu, ktoré sú vztiahnuté k neznámemu času vzniku deju v ohnisku  $a$  (Vilhelm et al., 2006). V seismológii je zvykom počítať s kladným časom vzniku deju  $a$ , potom má daná rovnica tvar  $R_0 = \sum_{i=1}^M \left( \frac{FS_i}{v} - tm_i + a \right)^2 = \min$ . V tejto práci bola použitá upravená metóda lokalizácie, ktorá používa normu L1, t.j. na miesto sumy štvorcov sa hľadá minimum sumy absolútnych hodnôt časových rezíduí.

Druhou z možných metód určovania ohniska je riešenie pomocou linearizácie problému lokalizácie ohniska s využitím Gaussovej zovšeobecnenej inverzie. V tejto metóde dostávame preurčenú sústavu rovníc,

$$\mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{d}},$$

kde  $\mathbf{G}$  je matica typu  $N \times m$ , a kde  $N$  je počet rovníc odpovedajúci počtu snímačov a  $m$  je počet modelových parametrov, tomto prípade súradníc ohniska,  $\bar{\mathbf{m}}$  je vektor modelových parametrov a  $\bar{\mathbf{d}}$  je vektor pravých strán sústavy. Tým, že  $N > m$ , je sústava rovníc preurčená a rieši sa napríklad pomocou Gaussovej zovšeobecnenej inverzie metódou najmenších štvorcov, pričom sa snažíme minimalizovať veľkosť vektoru chyb. Ďalším spôsobom ako hľadať ohnisko deju akustickej emisie môže byť pomocou riešenia lokalizácie ohniska postupnou aproximáciou. V tejto metóde je potreba pri začatí výpočtu zadať počiatočné podmienky modelu (súradnice ohniska), ktoré však musia byť vhodne určené, inak by výpočet divergoval. To znamená, že najprv je potrebné urobiť lokalizáciu pomocou jedného z predchádzajúcich postupov a následne je možné urobiť výpočet touto metódou, kde iteračným postupom nájdeme riešenie (Veverka, 2000).

### **3. SPRACOVÁVANÉ DÁTA - POPIS EXPERIMENTU**

Experimenty zaťažovania horninových vzoriek boli uskutočňované na detašovanom pracovisku Geologického ústavu Akadémie vied ČR, v laboratóriu fyzikálno-mechanických vlastností hornín na Puškinovom námestí.

Pokusy boli vykonané na zaťažovacom zariadení MTS 815 – Rock Mechanics Test System (USA), registrácia akustickej emisie využívala osemkanálový transient recorder AMSY5 od nemeckej firmy Vallen-Systeme GmbH, The Acoustic Emission Company. Zariadenie pre registráciu akustickej emisie je komerčne predávané a obsahuje veľké softwarové vybavenie, ktoré ponúka široké možnosti spracovania nameraných dát.

#### **3.1. SKÚMANÝ HORNINOVÝ MATERIÁL**

Pre účely experimentu boli zvolené horninové vzorky migmatitu odobraté z lokality Skalka nachádzajúcej sa na katastrálnom území obce Střítež, 5 km jv. od Dolní Rožínky. Územie geologicky leží na styku strážeckého moldanubika so svrateckým kryštalínikom. V horninách je výrazná foliácia, ktorá má na lokalite generelný smer SSV – JJZ s úklonom 50 - 60° k západu. Tá v hornine spôsobuje významnú anizotropiu fyzikálnych vlastností. Táto anizotropia bola stanovená pomocou metódy ultrazvukového prežarovania guľovej vzorky v mnohých smeroch v podmienkach pôsobiaceho všeobecného tlaku do 400 Mpa.

Po odobratí bloku horniny z lokality, bola najprv vytvorená guľovitá vzorka o priemere 50 mm, s presnosťou na desatinu mm, ktorá je orientované zviazaná s blokom horniny. Počas experimentu je vzorka ponorená v oleji, ktorý môže byť stlačovaný, aby vyvolal všeobecné tlakové pôsobenie na horninu (používaný bol transformátorový olej, vzorka je nalakovaná, aby sa zabránilo prenikaniu oleja do trhlín v hornine). Vzorka je umiestnená v držiaku, ktorý ju umožňuje nastaviť do ľubovoľnej pozície. Ultrazvukové prežarovanie sa uskutočňuje s krokom po 15° v smere rovnobežiek aj poludníkov, čím je postupne dosiahnutých 132 nezávislých smerov, v ktorých je vzorka prežarovaná metódou Time of flight (doba preletu) (Pros, Lokajíček, and Klíma, 1998). Prežarovať sa začína pri atmosférickom tlaku, ktorý sa postupne skokovito zvyšuje v závislosti od štruktúry horniny, pričom pri každej úrovni tlaku je vzorka prežiarená vo všetkých smeroch. Ak sa jedná o puklinatý typ, sú stupne zaťažovania na začiatku volené

s menším krokom, aby bolo vidieť ako sa trhliny uzatvárajú. Pre náš typ horniny (migmatit) boli volené následné stupne zaťaženia: 0, 10, 20, 50, 100, 200 a 400 MPa. Výsledkom analýzy je aj určenie smerov a veľkostí maximálnej a minimálnej rýchlosťi šírenia pozdĺžneho vlnenia.

Druhým spôsobom vyšetrovania, ktorého sa týka táto práca, je použitie valcových vzoriek pre jednoosové zaťažovacie skúšky. Zistená orientácia anizotropie rýchlosťí tak poslúžila k ich objektívnej orientácii. V požadovaných smeroch, či už to je v smere maximálnej alebo minimálnej rýchlosťi šírenia, alebo v smere šikmom, boli potom z pôvodne odobraného bloku horniny vyvrtané valcové vzorky. Tieto sú ďalej upravené do tvaru valca o priemere 50 mm a výške 100 mm. Podstavy valca sú kolmé na jeho výšku. Takto upravená vzorka je pred experimentom vysušená vo vákuu pri teplote 50°C, nalakovaná a potom zaťažovaná v jednom osom tlaku.

### **3.2. PROCES ZAŤAŽOVANIA A PRIEBEH EXPERIMENTU**

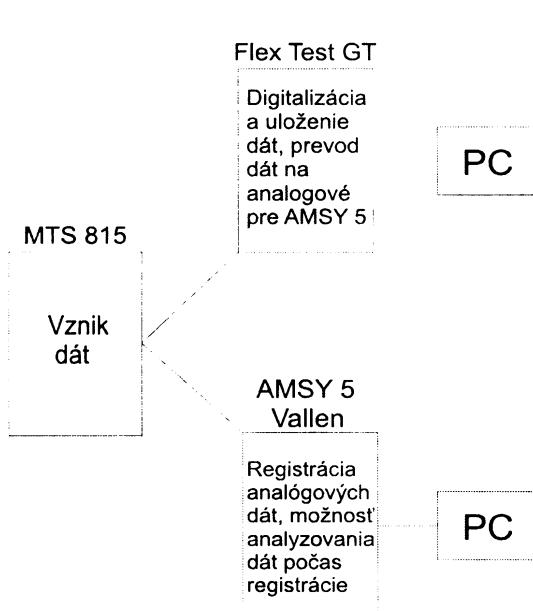
Upravené valcové vzorky boli zaťažované v rôznych režimoch, s rôznym časom trvania experimentu. Časť vzoriek bola zaťažovaná s lineárne vzrástajúcou silou, u ktorej bola konštantná rýchlosť zaťažovania a časť s riadenou deformáciou, u ktorej bola konštantná rýchlosť deformácie.

Vlastná realizácia experimentov spočíva v riadenom zaťažovaní vzoriek, pričom sa súčasne registruje pôsobiaca sila, deformácia vzorky a zaznamenané sú taktiež aj vlnové obrazy javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania.

Na Obr. 3. 1 je zobrazený blok diagram záznamovej aparátury, ktorá je zložená z dvoch počítačov. Prvý z nich je riadiaci, ktorý umožňuje riadenie a kontrolovanie lisu, ako aj ukladanie dát o zaťažovaní. Jedná sa o parametrické dátá z lisu ako sú: pôsobiaca sila, celková vzdialenosť tlačných plôch, relatívna pozdĺžna deformácia a obvodová deformácia. Na tento počítač je pripojená riadiaca jednotka Flex Test GT (číslovicový kontroler – riadiaci a kontrolný systém lisu MTS 815), ktorá všetky dátá zaznamenáva v digitálnej forme a následne ich prevádzda do formy analógovej, pre potreby druhého počítača.

Druhý, tzv. „vallenovský“ počítač, je počítač, ktorý riadi aparáturu Vallen AMSY 5 (registračný systém) (Obr. 3. 3). Ten obsahuje softwarové vybavenie, vďaka ktorému je možnosť prezerat'

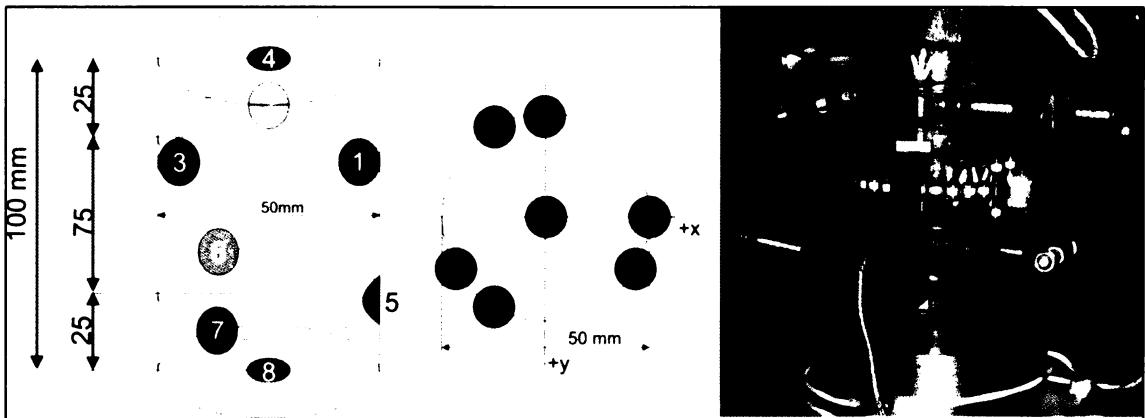
a analyzovať dátu aj počas registrácie. Systém má dve skupiny analógových vstupov s 16 bitovým rozlíšením. Prvú skupinu tvorí 8 vstupov pre dátu akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania, ktoré majú 10 MHz vzorkovanie. Ďalšiu skupinu tvoria 4 parametrické vstupy (teraz už 8 vstupov) určené pre meranie pomalých procesov. V súčasnosti sa pri meraní používajú k paralelnej registrácii niekoľkých veličín (pôsobiaca sila, celková vzdialenosť tlačných plôch, relatívna pozdĺžna a obvodová deformácia), ktoré súčasne registruje aj riadiaci počítač pre zaťažovanie. Výhodou tejto registrácie je úplne jednoznačné časové priradenie akustických a deformačných dát. Parametrické dátu pre potreby AMSY 5 sú v jednotke Flex Test GT prevádzané z digitálnej do analógovej formy.



Spracovávané valcové vzorky, vložené medzi čeľuste lisu boli rovnomerne pokryté sieťou piezokeramických snímačov s optimálnym rozložením pre lokalizáciu javov akustickej emisie. Osem snímačov bolo rozmiestnených podľa Obr. 3. 2. Tri a tri snímače boli umiestnené v hornej (snímače 1, 2 a 3) a dolnej (snímače 5, 6 a 7) polovici vzorky. Na každej úrovni boli od seba snímače posunuté o  $120^\circ$  s tým, že posun medzi hornou a dolnou úrovňou bol  $30^\circ$ . Ďalšie dva snímače boli umiestnené v čeľustiach lisu (snímače 4 a 8).

**Obr. 3. 1 Blok diagram aparatúry**

Pri takomto usporiadaní snímačov sme schopní vzorku prežiarit' vysokonapäťovým ultrazvukovým impulzom v 28 nezávislých smeroch.



Obr. 3. 2 Usporiadanie snímačov pri experimente

Pre dosiahnutie lepšieho kontaktu snímačov s povrchom valcovej vzorky boli snímače na zvislých plochách potreté vazelinou a pripojené gumičkami.

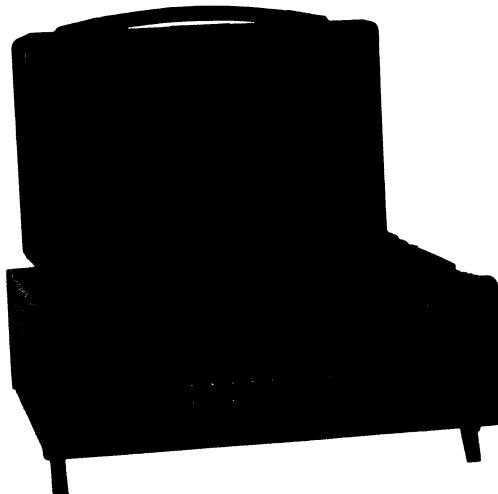
Jedná sa o piezokeramické snímače PAC - WD (Physical Acoustic Corporation – wide band), ktoré majú vo frekvenčnom rozmedzí 100 – 1000 kHz stálu citlivosť. Dotyková plocha snímača má priemer 18 mm a sú na nej dve piezokeramické plôšky. Jedna je uprostred snímača a druhá na obvode. Sú konštruované tak, aby ich plochy boli rovnaké a sú navzájom opačne zapojené.

Zo snímačov smeruje informácia do predzosilňovačov AEP 3 (Vallen – Systeme), ktoré majú nastaviteľné predzosilnenie. Používalo sa nastavenie 40 dB, čo odpovedá 100 násobnému zosilneniu. Prenosová charakteristika AEP 3 je 20kHz – 1,35 MHz. Toto zariadenie umožňuje realizovať aj prežarovanie vzorky. Má v sebe relé, ktoré pri prežarovani odpojí predzosilňovač, čím umožní prejsť požadovanému prežarovaciemu signálu priamo do snímača. Tým sa z neho stáva vysielač.

Počas jednoosového zaťažovania v smere najdlhšej osi vzorky sú registrované javy akustickej emisie a v pravidelných časových intervaloch je vykonávané ultrazvukové prežarovanie, meraná je celková, relatívna pozdĺžna a obvodová deformácia, veľkosť a rýchlosť zaťažovania a vzdialenosť tlakových plôch.

Softwarové vybavenie aparátury poskytuje široké možnosti nastavenia prístroja ako aj parametre registrácie.

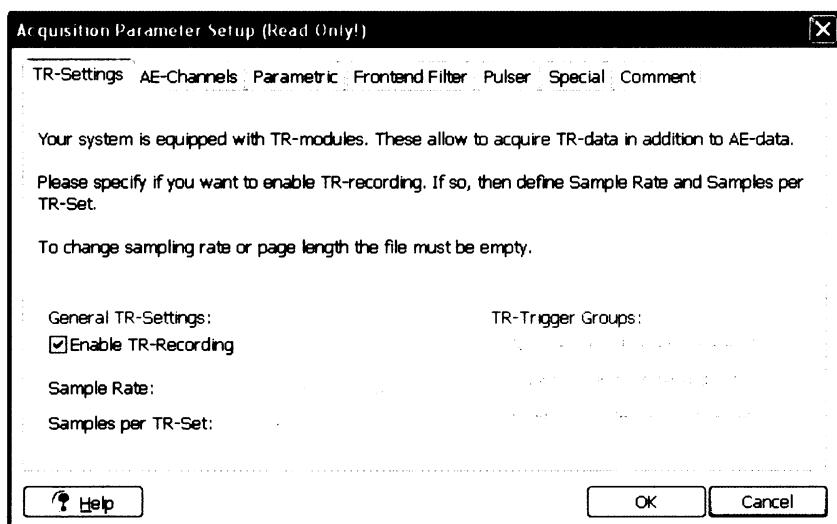
### 3.2.1. Nastavenie aparátúry pred začatím merania



Pred samotným zapnutím systému sa otestuje či je AMSY 5 pripojené, skontroluje sa počet pripojených parametrických aj AE vstupov. Software Vallen umožňuje vytvoriť konfiguračný súbor \*.vac, v ktorom sú nastavené jednotlivé parametre aparátúry. Základná karta nastavenia je zobrazená na Obr. 3. 4.

Obr. 3. 3 AMSY 5; elipsa označuje parametrické vstupy, obdĺžnik AE vstupy

### Acquisition parameter setup:



Obr. 3. 4 Nastavenie aparátúry v software Vallen

Karty:

#### *TR – settings*

umožňuje nastaviť volbu záznamu vlnových obrazov a ich vlastnosti

- ⇒ vzorkovaciu frekvenciu: 0,625 MHz (1,6 µs) – 10 MHz (0,1 µs)
- ⇒ počet vzoriek na záznam: 256 – 524288

## *AE – Channels*

každý kanál sa dá nezávisle nastaviť (kartu nastavenia snímača číslo 1 zobrazuje Obr. 3. 5)

spúšťanie snímačov:

Normal – každý kanál ide podľa seba

⇒ ako náhle sa prekročí prahová úroveň tak sa spustí registrácia

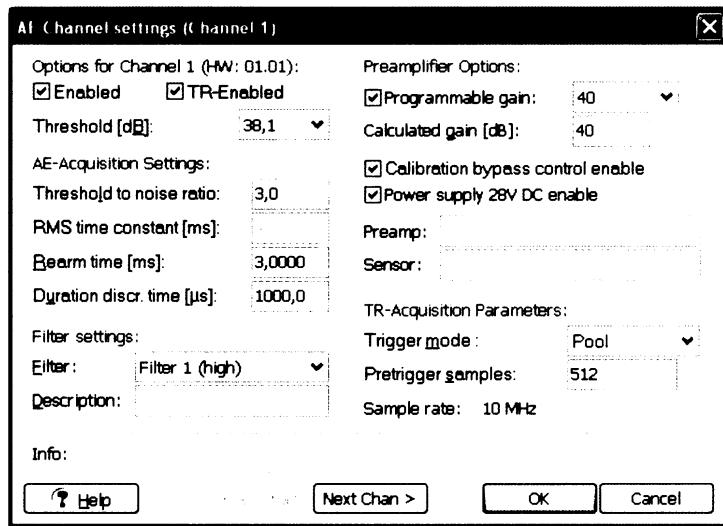
Master/Slave – jeden kanál nastavený ako master, ostatné ako slave;

⇒ po prekročení prahovej úrovne na master sa spustí registrácia na všetkých snímačoch

Pool

⇒ keď je prahová úroveň prekročená na ktoromkoľvek kanáli, spustí sa registrácia na všetkých snímačoch (toto nastavenie je používané pri experimentoch)

- dá sa zapnúť/vypnúť každý snímač a určiť, či má registrovať aj vlnové obrazy
- dá sa nastaviť prahová úroveň spúšťania (3,9 – 93,9 dB), pri pokusoch bola nastavená prahová úroveň 38,1 dB
- úroveň sa počíta od 1 µV (referenčná úroveň) → 1 µV ~ 0 dB, 40 dB ~ 100 µV  
→ keď impulz prekročí úroveň 100 µV, spustí sa registrácia
- možnosť spúšťať registráciu pri porovnaní úrovne šumu - dá sa nastaviť kol'konásobne sa musí prekročiť úroveň šumu, nastavený bol 3-oj násobok úrovne šumu
- nastavenie predzosilňovača na úroveň 40 dB
- možnosť povolenia prežarovania (Calibration bypass control enable) a určenie spôsobu napájania (Power supply 28 V DC enable) určí, že prežarovací signál bude napájaný zo systému Vallen, keby nie, tak by muselo byť externé napájanie



Obr. 3. 5 Nastavenie kanálov (snímačov)

#### *Parametric*

nastavenie meracích intervalov parametrických veličín (ako často sa budú merat parametrické vstupy)

#### *Pulser*

nastavenie napäťového pulzu – maximálne napätie až 450 V

pokusy boli robené s pulzom o napäti 100 V a frekvencii 150 kHz

#### *Special*

možnosť voľby akou formou má byť zaznamenávaná energia signálu

- a) True energy – integrácia 2. mocniny signálu
- b) Signal strength – integrácia absolútnej hodnoty signálu

Po nastavení acquisition settings je ďalším krokom „Go to data acquisition“ kde sa nastaví meno súboru, do ktorého budú dátá zaznamenávané. Jedná sa o *primary file* (\*.pri), určený k uloženiu parametrov javov, ako aj o súbor, ktorý bude obsahovať vlnové záznamy javov, *transient recorder data file* (\*.tra, tzv. tra-file). Kapacita jedného primary file je 4 GB, jedného tra-file je 16 GB. Po naplnení kapacity treba prerušíť registráciu a vytvoriť nový súbor, do ktorého bude registrácia pokračovať. Väčšinou sa súbory nachystajú dopredu a samotná výmena súborov trvá cca 10 – 15 sekúnd, podľa zručnosti operátora. Táto doba, by sa tak dala označiť ako “mŕtva doba”, v skutočnosti však nejde o mŕtvu dobu ako takú, ale len o prerušenie registrácie. Zvyčajne

sa primary file ani nestihne celý naplniť pretože tra-file sa naplní skôr. Po výmene súborov (po načítaní nového súboru) sa registruje do nového primary aj tra file. Po skončení experimentu je možné všetky dátu pospájať do jediného súboru, ktorého veľkosť je obmedzená (až 64 GB u primary file). Jeden primary file môže maximálne obsahovať 2 000 000 000 dátových setov (riadkov), pričom v jedom riadku sú obsiahnuté informácie o zázname z jedného kanálu (snímaču)  $\Rightarrow$  číslo kanálu, veľkosť amplitúdy, energie, dátum a čas javu, TRAI index, časový posun príchodu signálu na jednotlivé snímače v rámci jedného javu, nábehový čas, dĺžka signálu, označenie o aký jav sa jedná a iné.

U tra-file je taktiež možnosť zapísat až 2 000 000 000 dátových setov, jeho veľkosť po spojení sa však odvíja od nastavení vlnového obrazu. Napríklad pre najmenšie možné nastavenie počtu vzoriek záznamu 256 vychádza výsledná veľkosť na 1024 GB (1 TB), bez zahrnutia hlavičiek záznamov.

Za každým kanálom nasleduje 1 Mbit buffer (vyrovnávacia pamäť), ktorého rýchlosť je 30 000 dátových setov za sekundu, takže bez problémov stíha zaznamenávať dátu do primary file. Jeho maximálny dátový tok je 2,5 MB/s. Pri veľkej aktivite javov akustickej emisie je táto kapacita naplnená, čo spôsobuje, že nie všetky vlnové obrazy sú zaznamenané.

### 3.2.2. Zaznamenávanie údajov

Pri zaznamenaní javu na jednom snímači, ktorého energia prekračuje limitnú úroveň, je automaticky spustená registrácia aj na ostatných snímačoch.

Experimenty boli zaznamenané so vzorkovacou frekvenciou 10 MHz. Záznam má dĺžku 2048 bodov. V priebehu experimentu je možné vzorku prežiaríť ultrazvukovým vysokonapäťovým impulzom. Deje sa to tak, že jeden snímač je spúšťiací (triggrovací) a ostatné sú prijímacie. V jednom cykle prežarovania je pritom každý snímač triggrovací 2 - 4 krát.

Takýmto prežarováním je možné určovať rýchlosť šírenia vlny vo vzorke v rôznych fázach pokusu (pri rozličnom zaťažení).

Registrované údaje sú uložené v dvoch typoch súborov: *primary file (\*.pri)* a *transient recorder data file (\*.tra)*. Oba typy dát sú navzájom previazané tzv. TRAI indexom. Je to číslo automaticky priradené javom, ktoré obsahujú oba, navzájom si odpovedajúce, typy dát, resp.

dátam z primary file, ktoré majú svoj vlnový obraz. Problém môže nastať pri preťažení systému, v dobe vysokej aktivity akustickej emisie, keď k javom dochádza tak rýchlo, že aparatúra nestíha zaznamenávať všetky vlnové obrazy signálov. V tomto prípade ku každému záznamu v primary file neexistuje odpovedajúci vlnový záznam. Druhou možnosťou nekompletnosti dát, je situácia, keď sa jedná o slabý jav a jeho parametre tak nie sú zaznamenané všetkými snímačmi. Ide o javy, ktoré na jednom snímači prekročia nastavenú prahovú úroveň, a teda spustia registráciu vlnových obrazov na všetkých snímačoch, avšak šírením sa vo vzorke stratia na svojej veľkosti tak, že na niektorých snímačoch signál neprekročí nastavenú prahovú úroveň a snímače ich preto nezaregistrovajú. K takýmto javom teda existujú vlnové obrazy z každého snímača, ale neexistujú im odpovedajúce záznamy v primary file. Týmto spôsobom registrácie teda nedochádza k takzvanej „mŕtvej dobe“. K „strateným“ vlnovým obrazom existujú aspoň ich parametre v \*.pri súbore, naopak k slabým javom zas existujú vlnové obrazy v \*.tra súbore.

### 3.3. ANALYZOVANÉ VZORKY

Pre účely tejto práce boli analyzované vzorky hornín s označením vv01, vv02, vv03 a vv10. Všetky vzorky boli rovnakého horninového typu. Priebeh zaťažovacích skúšok bol rozdielny.

Prehľad dát analyzovaných vzoriek uvádza Tab. 3. 1.

**Tab. 3. 1 Všeobecné údaje o experimentoch**

		súbor			
		vv01	vv02	vv03	vv10
začiatok	dátum čas	21.6.06 8:53:04	18.7.06 11:13:41	6.3.07 10:07:18	9.11.06 9:29:13
koniec	dátum čas	21.6.06 16:47:29	18.7.06 23:13:24	12.3.07 13:52:30	9.11.06 19:16:38
celkový experimentu [s]	čas trvania	<b>28465</b>	<b>43183</b>	<b>531912</b>	<b>35245</b>
počet	údajov lokalizovaných dejov	1475754	4602546	1800140	1281212
	prežarovaní	1470158	4593190	1794276	1278081
	prežarovaní(8)	6033	15393	34316	8836
	javov	4824	10664	34088	7752
	použité stopy	603	1333	4261	969
	určené javy	2128	2120	2464	7512
		266	265	308	939

Vysvetlenie záznamov o počtoch:

*údaje* – celkový počet zaznamenaných údajov (počet dátových setov) počas trvania experimentu;

*lokalizovaných dejov* – počet dátových setov po zavedení lokalizačného procesoru;

*prežarovanie* – počet dátových setov zaznamenaných pri prežarovane;

*prežarovanie(8)* – počet kompletnejších osmíc z prežarovacích dát;

*javov* – počet osmíc prežarovania (*prežarovanie (8) / 8 => 7752 / 8 = 969*), jedna osmica odpovedá jednému javu;

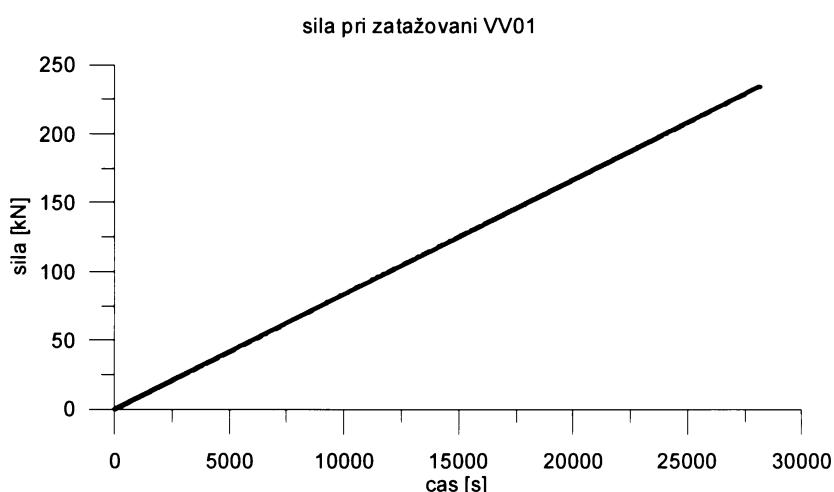
*použité stopy* – počet dátových setov z prežarovania, ktorým bol priradený TRAI index;

*určené javy* – počet osmíc použitých stôp ( $7512 / 8 = 939$ );

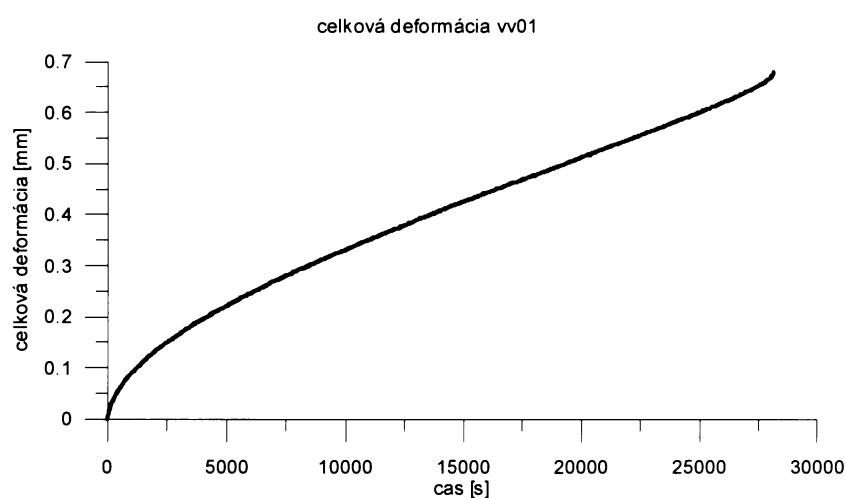
Počet použitých stôp odpovedá objemu trás, na ktorých bolo manuálne určené prvé nasadenie príchodu signálu.

## Experiment VV01

Vzorka bola zaťažovaná jednoosím tlakom kolmo na smer foliácie. Zaťažovanie prebiehalo v plynulom režime, teda s konštantnou rýchlosťou zaťažovania  $0,5 \text{ kN/min}$  a trvalo 28465 sekúnd. Do úplnej destrukcie vzorky bol vyvinutý tlak  $234,5 \text{ kN}$  (Obr. 3. 6) a bola dosiahnutá celková osová deformácia  $0,68 \text{ mm}$  (Obr. 3. 7). Počas experimentu bola vzorka 24-krát ultrazvukovo prežarovaná. Na jedenástich cykloch ultrazvukového prežarovania (266 javov) bolo realizované manuálne určenie času príchodu signálu.



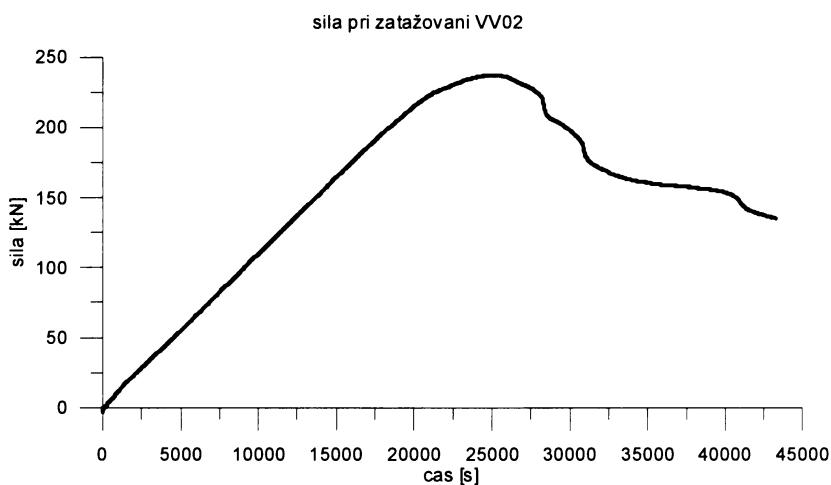
Obr. 3. 6 Priebeh sily zaťažovania experimentu vv01



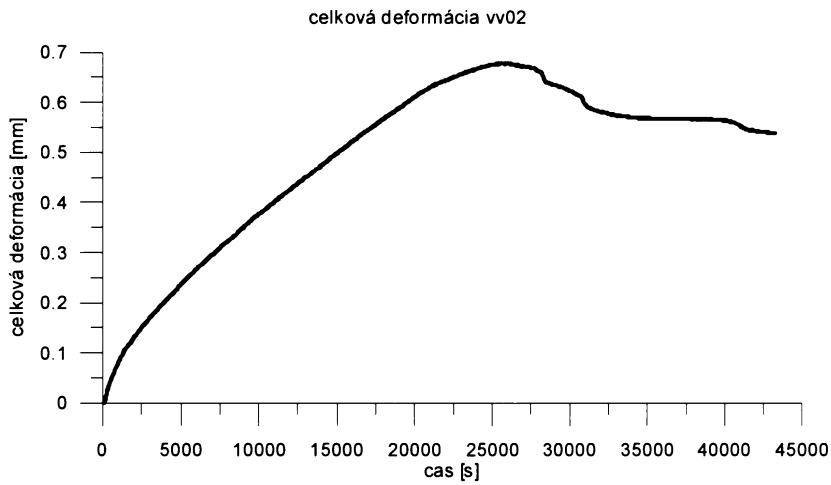
Obr. 3. 7 Celková deformácia dosiahnutá pri zaťažovaní vzorky vv01

## Experiment VV02

Tento pokus bol realizovaný taktiež sa pôsobenia sily kolmo k foliacii, v režime s riadenou deformáciou, tak že rýchlosť relatívnej deformácie bola  $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . K finálnemu porušeniu vzorky došlo po 43183 sekundách pri účinnosti pôsobiacej sily 134,8 kN (Obr. 3. 8). Maximálna deformácia bola dosiahnutá 0,678 mm, po skončení zaťažovania bola deformácia na úrovni 0,537 mm (Obr. 3. 9). Vzorka bola 56-krát prežarovaná, z toho na 11-tich cykloch (265 javov) bolo manuálne určené prvé nasadenie signálu.



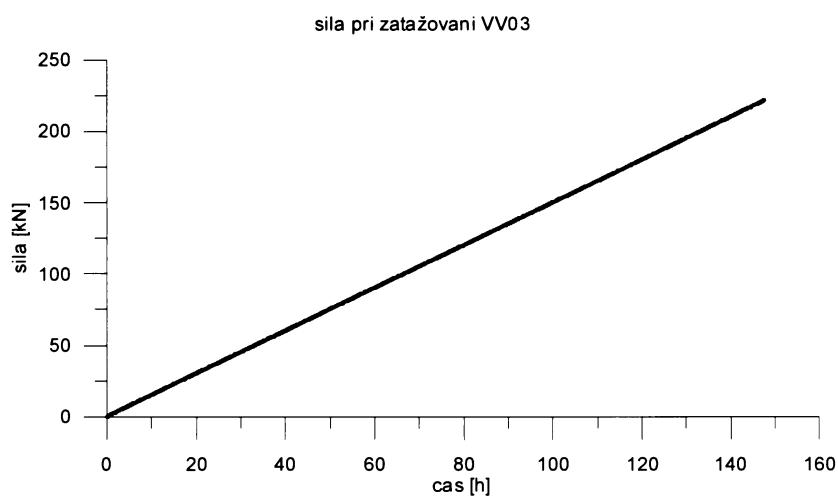
Obr. 3. 8 Priebeh sily zaťažovania experimentu vv02



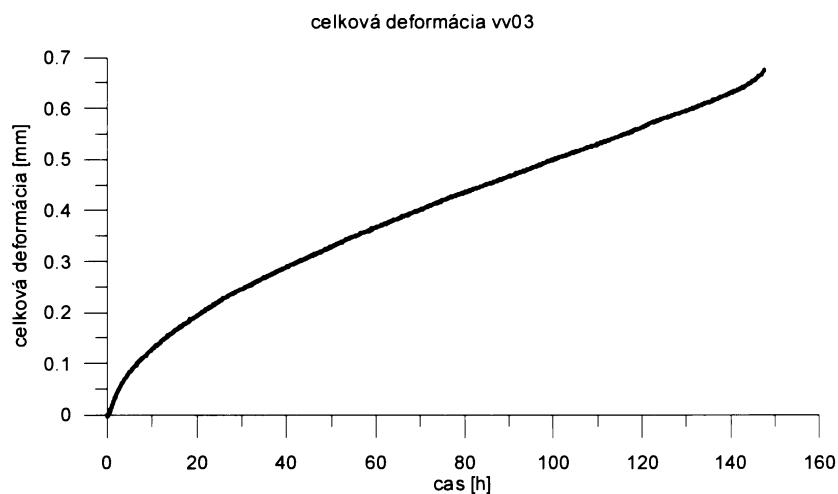
Obr. 3. 9 Celková deformácia dosiahnutá pri zaťažovaní vzorky vv02

### Experiment VV03

V tomto prípade sa jednalo o dlhodobý experiment, dĺžka zaťažovania bola až 531912 sekúnd (takmer 150 hodín). Režim zaťažovania bol opäť plynulý, s konštantnou rýchlosťou zaťažovania 0,5 kN/min v smere kolmom na foliáciu. K porušeniu vzorky došlo pri pôsobení sily 221,4 kN (Obr. 3. 10) a maximálna deformácia bola dosiahnutá na úrovni 0,676 mm (Obr. 3. 11). Počas experimentu bolo vykonaných 151 cyklov ultrazvukového prežarovania, z ktorých bolo znova 11 (308 javov) podrobenej manuálnemu určeniu času príchodu signálu.



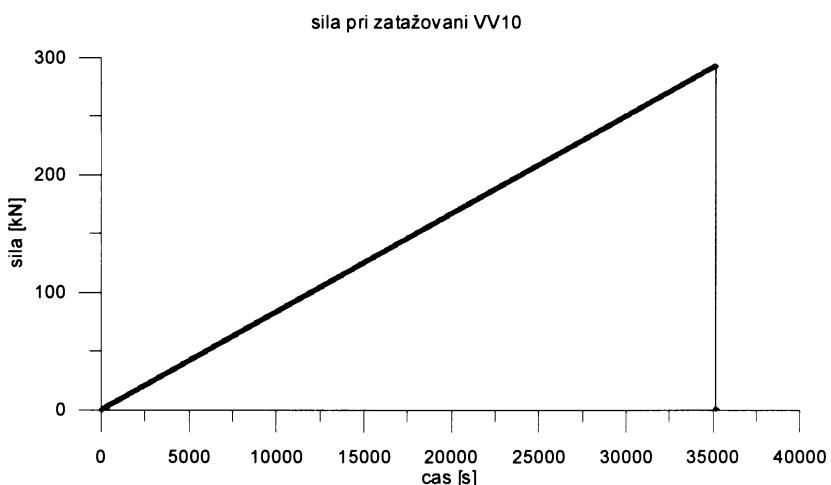
Obr. 3. 10 Priebeh sily zaťažovania experimentu vv03



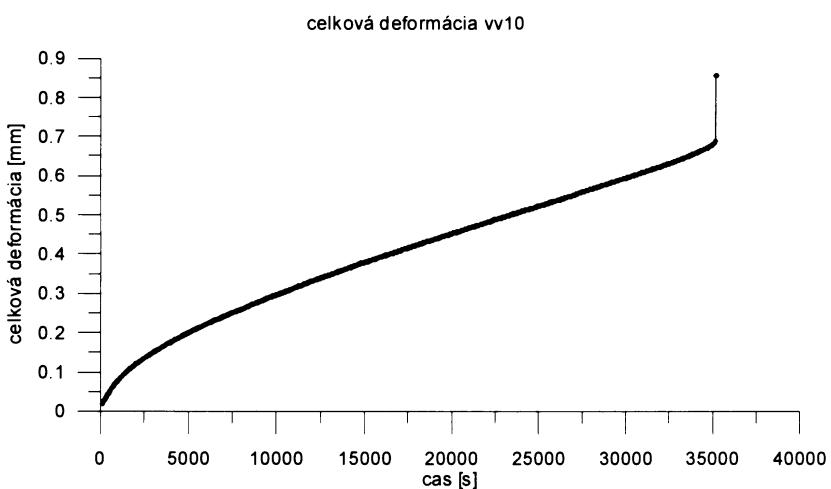
Obr. 3. 11 Celková deformácia dosiahnutá pri zaťažovaní vzorky vv03

## Experiment VV10

Táto vzorka bola zaťažovaná v smere paralelnom k foliacii, v režime s konštantnou rýchlosťou zaťažovania  $0,5 \text{ kN/min}$ . Bolo dosiahnuté maximálne zaťaženie  $292,8 \text{ kN}$  (Obr. 3. 12), pri ktorom došlo k úplnému porušeniu vzorky. Pred rozrušením vzorky bola dosiahnutá celková deformácia  $0,689 \text{ mm}$  a po ňom až  $0,857 \text{ mm}$  (Obr. 3. 13). Táto vzorka bola 36-krát prežarovaná. Keďže bola spracovávaná ako prvá, bol na všetkých dátach ultrazvukového prežarovania manuálne určený príchod prvého nasadenia signálu. Jedná sa o 34 cyklov prežarovania (939 javov). Posledné 2 cykly nemajú pridelené TRAI indexy, takže nie je možné k zaznamenaným dátam pridelit' odpovedajúce vlnové obrazy.



Obr. 3. 12 Priebeh sily zaťažovania experimentu vv10



Obr. 3. 13 Celková deformácia dosiahnutá pri zaťažovaní vzorky vv10

Na uvedených dátových súboroch boli manuálne určené nasadenia signálov ultrazvukového prežarovania. Počet takto určených záznamov je uvedený v tabuľke 3.1. Na dátovom súbore vv10 boli navyše urobené manuálne odčítania signálov akustickej emisie, preto sa v ďalšom spracovaní zameriam na vyhodnotenie dát z tohto experimentu (kapitola 6).

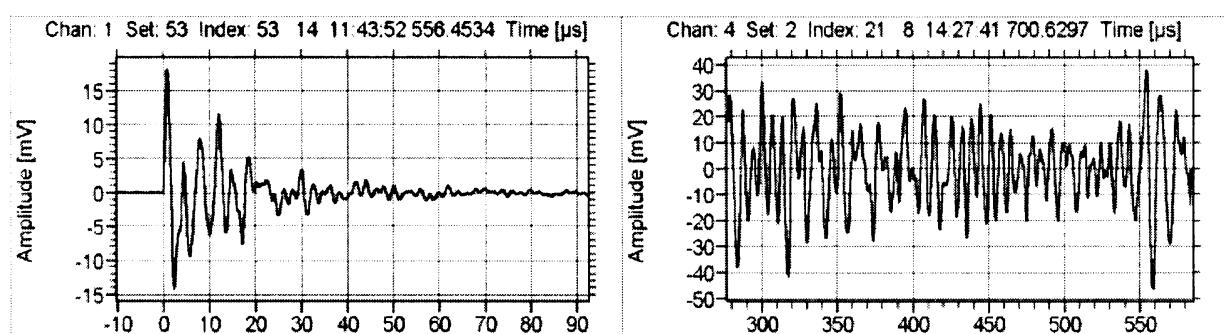
## 4. METODIKA URČOVANIA ČASU PRÍCHODU A LOKALIZÁCIE JAVOV

### 4.1. POPIS PROCESU SPRACOVANIA A MOŽNOSTI SOFTWARU VALLEN

Ako už bolo načrtnuté v úvode, software Vallen ponúka nespočetné možnosti spracovania a výhodnotenia meraných dát. Jeho najväčšou výhodou je rýchlosť spracovania a veľkosť spracovávaných dátových súborov, ktorá je v porovnaní s minulosťou mnohokrát väčšia. To dovoľuje obsluhe zariadenia v reálnom čase aktívne sledovať proces zaťažovania, prípadne meniť niektoré nastavenia.

Naproti tomu veľkou nevýhodou je malá spoľahlivosť získaných parametrických dát, hlavne časov nasadenia signálu. Software Vallen je komerčne predávaný a navrhnutý tak, aby poslúžil čo najväčšiemu spektru požiadaviek. Preto je pochopiteľné, že jeho nastavenie a algoritmické pozadie, presne nevyhovuje našim konkrétnym potrebám. Výrobca uvádza využitie tohto softwaru pri skúmaní akustickej emisie v oblastiach ako sú napríklad nedeštruktívne testovanie ťažko namáhaných materiálov používaných v leteckom priemysle, vyšetrovanie vlastností hmôr, skúmanie kvality zvarov, proces vysušovania dreva alebo skúmanie prieplustnosti materiálov a nádob až do priemeru 100 m. V neposlednej rade umožňuje aj geologický a mikroseizmický výskum ([www.vallen.de](http://www.vallen.de)).

Software je vhodný na zaznamenávanie prechodných (transient) ako aj kontinuálnych (continuous) signálov akustickej emisie. U prechodného signálu vieme užitočný signál dobre odlišiť od šumu v pozadí, môžeme ľahko určiť začiatok a koniec prichádzajúceho signálu. Naopak u kontinuálneho signálu je dobre vidieť frekvenčné a amplitúdové variácie, avšak signál nemá koniec (Obr. 4. 1).



Obr. 4. 1 Ukážka vlnových obrazov prechodného (vl'avo) a kontinuálneho (vpravo) signálu

**Parametrické dátá.** V priebehu experimentu sú okrem vlnových obrazov javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania zaznamenávané aj ich jednotlivé parametrické dátá, ktoré sú zobrazované vo forme listingu (Obr. 4. 2). Každý riadok pritom predstavuje informácie získané jedným snímačom – jeden dátový set. Údaje, ktoré sú v ňom vypísané sa dajú ľubovoľne nastaviť podľa konkrétnych požiadaviek užívateľa.

Id	SICS	DSET	DAY	HHMMSS	HHMM	CHAN	DTIX	A	E	R	D	THR	CNTS	TRAI	FLAG	MRPFXTARDN																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
<hr/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
La Label 1: 'vv101'																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
La Label 2: '09:29 Resume'																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
DT 8. srpen 2006, Host Time: 9:29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
La Label 3: '09:29 Start of Calibration'																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
<table border="1"> <tr><td>L1</td><td>8</td><td>10</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5392</td><td>1</td><td>79,9</td><td>476E02</td><td>3,6</td><td>54,6</td><td>38,1</td><td>8</td><td>1</td><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>11</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5480</td><td>2</td><td>8,8</td><td>93,8</td><td>285E05</td><td>2,4</td><td>2900,0</td><td>38,1</td><td>352</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>12</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5481</td><td>3</td><td>8,9</td><td>93,8</td><td>257E05</td><td>11,2</td><td>2594,4</td><td>38,1</td><td>332</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>13</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5488</td><td>4</td><td>9,6</td><td>93,8</td><td>302E05</td><td>44,2</td><td>6129,6</td><td>38,1</td><td>657</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>14</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5492</td><td>5</td><td>10,0</td><td>93,8</td><td>286E05</td><td>14,4</td><td>2710,4</td><td>38,1</td><td>344</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>15</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5509</td><td>7</td><td>11,7</td><td>93,8</td><td>199E05</td><td>35,2</td><td>2368,8</td><td>38,1</td><td>328</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>16</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5522</td><td>6</td><td>13,0</td><td>93,8</td><td>225E05</td><td>16,2</td><td>2692,8</td><td>38,1</td><td>348</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>17</td><td>8 09:29:13</td><td>168,5559</td><td>8</td><td>16,7</td><td>93,8</td><td>307E05</td><td>24,0</td><td>3921,6</td><td>38,1</td><td>488</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>L1</td><td>8</td><td>30</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9464</td><td>1</td><td>79,9</td><td>476E02</td><td>3,6</td><td>54,6</td><td>38,1</td><td>8</td><td>9</td><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>31</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9552</td><td>2</td><td>8,8</td><td>93,8</td><td>285E05</td><td>2,4</td><td>2900,0</td><td>38,1</td><td>352</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>32</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9553</td><td>3</td><td>8,9</td><td>93,8</td><td>257E05</td><td>11,2</td><td>2568,0</td><td>38,1</td><td>335</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>33</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9560</td><td>4</td><td>9,6</td><td>93,8</td><td>302E05</td><td>44,2</td><td>5793,6</td><td>38,1</td><td>649</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>34</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9565</td><td>5</td><td>10,1</td><td>93,8</td><td>286E05</td><td>14,4</td><td>2684,0</td><td>38,1</td><td>345</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>35</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9581</td><td>7</td><td>11,7</td><td>93,8</td><td>199E05</td><td>35,2</td><td>2368,8</td><td>38,1</td><td>329</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>36</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9594</td><td>6</td><td>13,0</td><td>93,8</td><td>225E05</td><td>16,2</td><td>2690,4</td><td>38,1</td><td>347</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>37</td><td>8 09:29:14</td><td>168,9631</td><td>8</td><td>16,7</td><td>93,8</td><td>307E05</td><td>24,0</td><td>3748,8</td><td>38,1</td><td>490</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>L1</td><td>8</td><td>51</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3537</td><td>1</td><td>79,9</td><td>476E02</td><td>3,4</td><td>54,6</td><td>38,1</td><td>8</td><td>17</td><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>52</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3624</td><td>2</td><td>8,7</td><td>93,8</td><td>285E05</td><td>2,4</td><td>2900,0</td><td>38,1</td><td>350</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>53</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3625</td><td>3</td><td>8,8</td><td>93,8</td><td>257E05</td><td>11,2</td><td>2568,0</td><td>38,1</td><td>335</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>54</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3632</td><td>4</td><td>9,5</td><td>93,8</td><td>302E05</td><td>44,2</td><td>6129,6</td><td>38,1</td><td>651</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>55</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3637</td><td>5</td><td>10,0</td><td>93,8</td><td>286E05</td><td>14,4</td><td>2681,6</td><td>38,1</td><td>344</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>56</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3653</td><td>7</td><td>11,6</td><td>93,8</td><td>199E05</td><td>35,2</td><td>2368,8</td><td>38,1</td><td>328</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>57</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3666</td><td>6</td><td>12,9</td><td>93,8</td><td>225E05</td><td>16,2</td><td>2692,8</td><td>38,1</td><td>348</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>58</td><td>8 09:29:15</td><td>169,3703</td><td>8</td><td>16,6</td><td>93,8</td><td>307E05</td><td>24,0</td><td>3921,6</td><td>38,1</td><td>487</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>L1</td><td>8</td><td>74</td><td>8 09:29:18</td><td>170,5753</td><td>2</td><td>79,9</td><td>479E02</td><td>3,4</td><td>54,6</td><td>38,1</td><td>8</td><td>25</td><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>75</td><td>8 09:29:18</td><td>170,5840</td><td>1</td><td>8,7</td><td>93,8</td><td>303E05</td><td>2,6</td><td>2900,0</td><td>38,1</td><td>376</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ht</td><td></td><td>76</td><td>8 09:29:18</td><td>170,5850</td><td>3</td><td>9,7</td><td>93,8</td><td>222E05</td><td>6,8</td><td>2707,2</td><td>38,1</td><td>348</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> </table>	L1	8	10	8 09:29:13	168,5392	1	79,9	476E02	3,6	54,6	38,1	8	1	C			Ht		11	8 09:29:13	168,5480	2	8,8	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	352	c			Ht		12	8 09:29:13	168,5481	3	8,9	93,8	257E05	11,2	2594,4	38,1	332	c			Ht		13	8 09:29:13	168,5488	4	9,6	93,8	302E05	44,2	6129,6	38,1	657	c			Ht		14	8 09:29:13	168,5492	5	10,0	93,8	286E05	14,4	2710,4	38,1	344	c			Ht		15	8 09:29:13	168,5509	7	11,7	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	328	c			Ht		16	8 09:29:13	168,5522	6	13,0	93,8	225E05	16,2	2692,8	38,1	348	c			Ht		17	8 09:29:13	168,5559	8	16,7	93,8	307E05	24,0	3921,6	38,1	488	c			L1	8	30	8 09:29:14	168,9464	1	79,9	476E02	3,6	54,6	38,1	8	9	C			Ht		31	8 09:29:14	168,9552	2	8,8	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	352	c			Ht		32	8 09:29:14	168,9553	3	8,9	93,8	257E05	11,2	2568,0	38,1	335	c			Ht		33	8 09:29:14	168,9560	4	9,6	93,8	302E05	44,2	5793,6	38,1	649	c			Ht		34	8 09:29:14	168,9565	5	10,1	93,8	286E05	14,4	2684,0	38,1	345	c			Ht		35	8 09:29:14	168,9581	7	11,7	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	329	c			Ht		36	8 09:29:14	168,9594	6	13,0	93,8	225E05	16,2	2690,4	38,1	347	c			Ht		37	8 09:29:14	168,9631	8	16,7	93,8	307E05	24,0	3748,8	38,1	490	c			L1	8	51	8 09:29:15	169,3537	1	79,9	476E02	3,4	54,6	38,1	8	17	C			Ht		52	8 09:29:15	169,3624	2	8,7	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	350	c			Ht		53	8 09:29:15	169,3625	3	8,8	93,8	257E05	11,2	2568,0	38,1	335	c			Ht		54	8 09:29:15	169,3632	4	9,5	93,8	302E05	44,2	6129,6	38,1	651	c			Ht		55	8 09:29:15	169,3637	5	10,0	93,8	286E05	14,4	2681,6	38,1	344	c			Ht		56	8 09:29:15	169,3653	7	11,6	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	328	c			Ht		57	8 09:29:15	169,3666	6	12,9	93,8	225E05	16,2	2692,8	38,1	348	c			Ht		58	8 09:29:15	169,3703	8	16,6	93,8	307E05	24,0	3921,6	38,1	487	c			L1	8	74	8 09:29:18	170,5753	2	79,9	479E02	3,4	54,6	38,1	8	25	C			Ht		75	8 09:29:18	170,5840	1	8,7	93,8	303E05	2,6	2900,0	38,1	376	c			Ht		76	8 09:29:18	170,5850	3	9,7	93,8	222E05	6,8	2707,2	38,1	348	c		
L1	8	10	8 09:29:13	168,5392	1	79,9	476E02	3,6	54,6	38,1	8	1	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		11	8 09:29:13	168,5480	2	8,8	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	352	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		12	8 09:29:13	168,5481	3	8,9	93,8	257E05	11,2	2594,4	38,1	332	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		13	8 09:29:13	168,5488	4	9,6	93,8	302E05	44,2	6129,6	38,1	657	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		14	8 09:29:13	168,5492	5	10,0	93,8	286E05	14,4	2710,4	38,1	344	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		15	8 09:29:13	168,5509	7	11,7	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	328	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		16	8 09:29:13	168,5522	6	13,0	93,8	225E05	16,2	2692,8	38,1	348	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		17	8 09:29:13	168,5559	8	16,7	93,8	307E05	24,0	3921,6	38,1	488	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
L1	8	30	8 09:29:14	168,9464	1	79,9	476E02	3,6	54,6	38,1	8	9	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		31	8 09:29:14	168,9552	2	8,8	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	352	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		32	8 09:29:14	168,9553	3	8,9	93,8	257E05	11,2	2568,0	38,1	335	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		33	8 09:29:14	168,9560	4	9,6	93,8	302E05	44,2	5793,6	38,1	649	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		34	8 09:29:14	168,9565	5	10,1	93,8	286E05	14,4	2684,0	38,1	345	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		35	8 09:29:14	168,9581	7	11,7	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	329	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		36	8 09:29:14	168,9594	6	13,0	93,8	225E05	16,2	2690,4	38,1	347	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		37	8 09:29:14	168,9631	8	16,7	93,8	307E05	24,0	3748,8	38,1	490	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
L1	8	51	8 09:29:15	169,3537	1	79,9	476E02	3,4	54,6	38,1	8	17	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		52	8 09:29:15	169,3624	2	8,7	93,8	285E05	2,4	2900,0	38,1	350	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		53	8 09:29:15	169,3625	3	8,8	93,8	257E05	11,2	2568,0	38,1	335	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		54	8 09:29:15	169,3632	4	9,5	93,8	302E05	44,2	6129,6	38,1	651	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		55	8 09:29:15	169,3637	5	10,0	93,8	286E05	14,4	2681,6	38,1	344	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		56	8 09:29:15	169,3653	7	11,6	93,8	199E05	35,2	2368,8	38,1	328	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		57	8 09:29:15	169,3666	6	12,9	93,8	225E05	16,2	2692,8	38,1	348	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		58	8 09:29:15	169,3703	8	16,6	93,8	307E05	24,0	3921,6	38,1	487	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
L1	8	74	8 09:29:18	170,5753	2	79,9	479E02	3,4	54,6	38,1	8	25	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		75	8 09:29:18	170,5840	1	8,7	93,8	303E05	2,6	2900,0	38,1	376	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ht		76	8 09:29:18	170,5850	3	9,7	93,8	222E05	6,8	2707,2	38,1	348	c																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			

Page 1 / Page 2 / Page 3 / Page 4 / Page 5 / Page 6 / Page 7 / Page 8 / Page 9 / Page 10 / Page 11 / Page 12 / Page 13

File: vv10\_all.pri From: 8 9:29:06 set 1 to: 8 9:54:03 set 30 963 offline Label: 6 09:49 End of Calibration

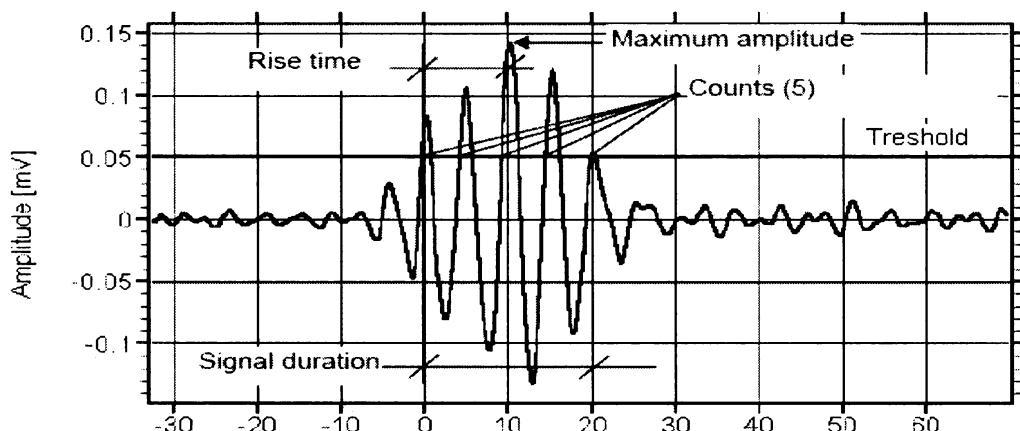
Obr. 4. 2 Zobrazenie parametrických dát v listingu

Jedná sa hlavne o čas príchodu signálu (DT1X), amplitúdu (A), nábehový čas (R), trvanie signálu (D), počet prekročení prahovej úrovne (CNTS) a energiu (E) (Obr. 4. 2). Ďalej sú z obrázka vidieť údaje o absolútном čase registrovanej udalosti (HHMMSS MSEC), číslo kanálu, na ktorom k nej došlo (CHAN), poradové číslo (DSET), značka (Id, FLAG), TRAI index (TRAI) a taktiež všeobecné informácie o súbore, v ktorom sú všetky údaje uložené, jeho meno, dátum a čas vzniku. Dáta zobrazené na Obr. 4. 2 sú len príkladom ako môže listing vyzerat. Software ďalej ponúka široké spektrum iných údajov. Možnosť ich zobrazenia je však

vo väčšine prípadov podmienená ich aktiváciou. To znamená, že niektoré dátá sú dostupné až po aplikácii napríklad lokalizačného alebo zhlukovacieho procesoru.

Na Obr. 4. 3 sú vidieť niektoré zo spomínaných parametrov, tak ako ich poskytuje Vallen:

- čas príchodu = čas prvého prekročenia prahovej úrovne (arrival time)
- nábehový čas = čas od prvého prekročenia prahovej úrovne po maximálnu amplitúdu signálu (rise-time)
- trvanie signálu = čas medzi prvým a posledným prekročením prahovej úrovne (signal duration)
- počet prekročení prahovej úrovne (counts)
- energia = integrál štvorcov amplitúd (prípadne jej absolútnych hodnôt) po dobu trvania signálu
- amplitúda [mV] = jedná sa o záznam zrýchlenia, prepočet na dB podľa vzťahu  $0 \text{ dB} = 1 \mu\text{V}$



**Obr. 4. 3 Charakteristika signálu**

Pre nás veľmi dôležitým parametrom je TRAI index, za pomocí ktorého sme schopní jednotlivé údaje z listingu adekvátne prideliť k ich vlnovým obrazom.

#### 4.2. FAKTORY VPLÝVAJÚCE NA PRESNOSŤ LOKALIZÁCIE JAVOV

Výsledná chyba, s ktorou je ohnisko javu určené, môže byť spôsobená rôznymi faktormi. Rozdelil by som ich do dvoch skupín. Do prvej skupiny sa radia chyby vznikajúce počas zaznamenávania dát, ktoré môžu vznikať na trase záznamového kanálu. Taktiež sa môže stat', že sa v priebehu experimentu počas zaťažovania zmení pril'navosť snímača k zaťažovanej

vzorce. Takýmto spôsobom môže dôjsť k systematickej chybe, ktorá spôsobí zašumenie alebo zmenšenie amplitúdy zaznamenaného signálu, čo má následne vplyv na presnosť určenia časov príchodov. Do druhej skupiny by potom patrili chyby zavedené počas vyhodnocovania nameraných dát ako je napríklad stanovenie času príchodu signálu a anizotropia materiálu, ktoré by som v ďalšom texte širšie rozvinul.

### **Stanovenie času príchodu signálu**

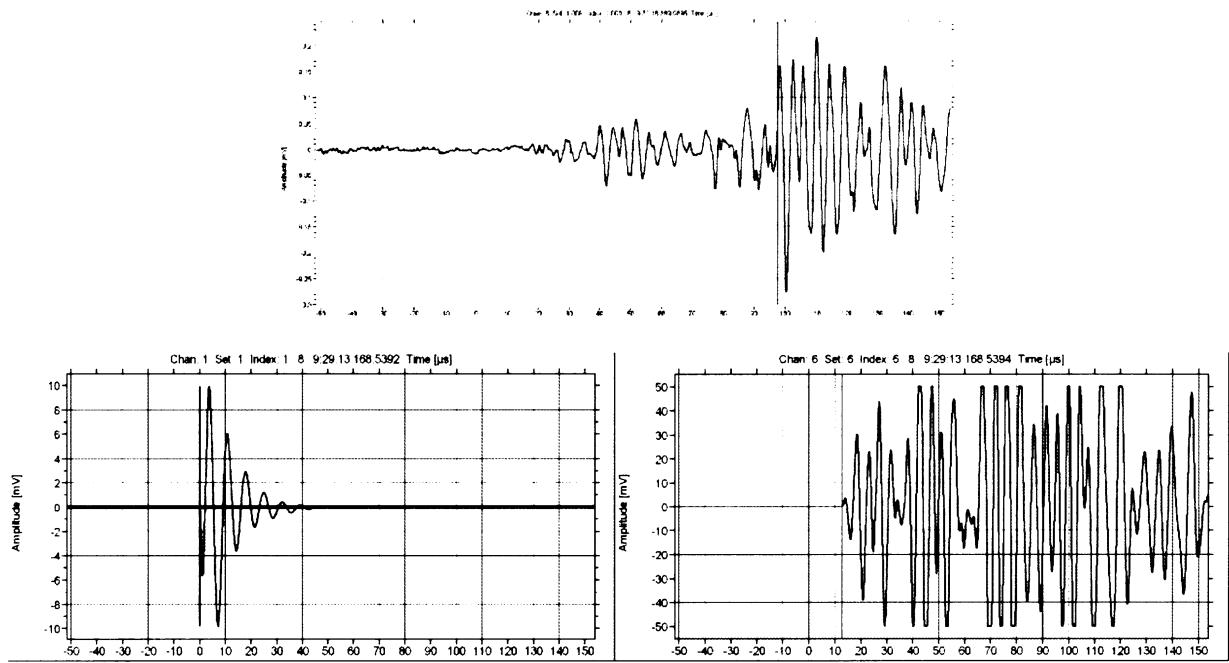
Pre potreby lokalizácie je dôležité čo najpresnejšie stanoviť príchod signálu, jeho prvé nasadenie. Zo získaných časov príchodov sa následne odvíja proces lokalizácie javov akustickej emisie, prípadne ultrazvukového prežarovania. Pri experimentoch bola aparátúra nastavená tak, že ako náhle je na niektorom zo snímačov zaregistrované prekročenie nastavenej prahovej úrovne je spustená registrácia vlnových obrazov na všetkých kanáloch (kap. 3.2.1), pričom prvý snímač je považovaný za triggrovací (spúšťací). Na vlnovom obrazze zachytenom týmto snímačom je značka prvého nasadenia signálu položená na 512. vzorku (tzv. offset) z celkového počtu 2048 vzoriek. Hodnotu offsetu aj celkový počet vzoriek záznamu je možné nastaviť podľa požiadaviek pred začatím samotného merania (kap. 3.2.1). V listingu je údaj o príchode signálu zobrazený v stĺpčeku s premennou DT1X, ktorá je aktívna až po aplikácii lokalizačného procesoru. Triggrovací kanál v ňom má zapísanú nulu (0  $\mu$ s) ako počiatok zaregistrovaného javu. Pri ostatných kanáloch je potom uvádzaný rozdiel časov príchodov - oneskorenie, (tiež v  $\mu$ s) s akým boli prichody registrované na ostatných snímačoch. U signálov z ultrazvukového prežarovania tento postup funguje celkom spoľahlivo, avšak u prirodzených javov akustickej emisie sa veľmi často stáva, že nastavenú prahovú úroveň, pri silnom jave, prekročí šum a ten vzápäť spustí registráciu všetkých kanálov. Nosná informácia signálu v podobe P-vln však prichádza o niečo neskôr. Druhý, možno ešte častejší prípad naopak nastáva u záznamov, kedy je nástup signálu pozvoľný, a teda nastavenú prahovú úroveň prekročí až niektorá z jeho silnejších amplitúd (Obr. 4. 14 hore). Je jasné, že ak zle určíme príchod užitočného signálu, zavedená chyba sa prenesie aj ďalej, čo bude mať vplyv na presnosť určenia miesta vzniku zaznamenaného javu. Takto vzniká jedna z mnohých nepresností, ktorá nám zneprijemňuje nájdenie správneho ohniska.

Preto pre dosiahnutie čo najlepších údajov o čase príchodu signálu bolo v rámci diplomovej práce určovanie nasadenia spočiatku robené manuálne. Na dátach ultrazvukového prežarovania

z experimentu vv10 bolo určovanie prvého nasadenia signálu urobené na všetkých dostupných záznamoch. Spolu sa jednalo o 7512 stôp. Po následnej lokalizácii sa však ukázalo, že záznamy sú si dosť podobné. Z ďalších experimentov boli preto vybrané len určité dátá, ktoré rovnomerne pokrývali celý priebeh zatážovania, približne 2000 – 2500 stôp (Tab. 3. 1, použité stopy). Napriek tomu manuálne určovanie prvého nasadenia takého počtu záznamov je časovo dosť náročné. Práve časová náročnosť manuálneho hľadania príchodu signálu vyplývajúca z nekvalitného určovania nasadení softwarom Vallen si vyžiadala vytvorenie inej aplikácie, ktorá by umožnila presnejšie automatické odčítanie (kapitola 5.2).

### **Anizotropia materiálu**

Ďalšou možnou chybou je nedokonalý popis vlastností skúmaného materiálu. Jedná sa hlavne o to, že pri procese zatážovania sa jednotlivé mechanické vlastnosti môžu v závislosti od vyvíjaného tlaku a porušenia meniť. Pre nás je dôležité mať čo najlepšiu znalosť o rýchlosťi šírenia elastických vln v práve skúmanej horninovej vzorke. K jej určeniu je možné v určitých fázach experimentu vzorku prežiarit' ultrazvukovým impulzom (Obr. 4. 14 dole vľavo). Deje sa to tak, že jeden z piezokeramických snímačov vyšle vysokonapäťový impulz, ktorý následne ostatné snímače zaregistrujú (kap. 3.2.2) (Obr. 4. 4 dole vpravo). Tento impulz má charakteristický tvar a je veľmi dobre čitateľný. Následne tým, že poznáme zdroj (ohnisko) takejto udalosti, sme schopní vytvoriť rýchlosťný model šírenia seismických vln. Podrobnejšie sa tým zaoberal Petružálek vo svojej práci (Petružálek et al., 2007b).



**Obr. 4. 4** Ukážka vyslaného signálu (dole v ľavo), ktorým je vzorka preziarená, signálu, ktorý je následne zaznamenaný na inom snímači (dole v pravo) a signálu akustickej emisie prirodzeného javu (hore).

Tento model sa potom môže porovnať s rýchlosným modelom, ktorý sme získali z prežarovania guľovej vzorky (kapitola 3.1), a ktorý je presnejší. Rýchlosný model vo všeobecnosti vystihuje nehomogenity jednak z hľadiska zloženia skúmaného materiálu, ako aj smerovú závislosť šírenia sa elastického vlnenia. V našom prípade, kedy skúmame horninovú vzorku o veľkosti  $5 \times 10 \text{ cm}$ , predpokladáme minimálne heterogenity, a vzorku pre zjednodušenie považujeme za homogénnu. Anizotropia materiálu sa však prejavuje aj v takejto malej mierke, preto vo výpočtoch uvažujeme homogénny anizotropný rýchlosný model. Z poznania závislosti rýchlosť šírenia elastického vlnenia vo vzorke na smere šírenia sme potom schopní zaviesť korekcie do výpočtov syntetických časov. V konečnom dôsledku by sa tieto korekcie mali pozitívne premietnuť v konečnej chybe lokalizácie.

#### 4.3. OCENENIE KVALITY LOKALIZÁCIÍ

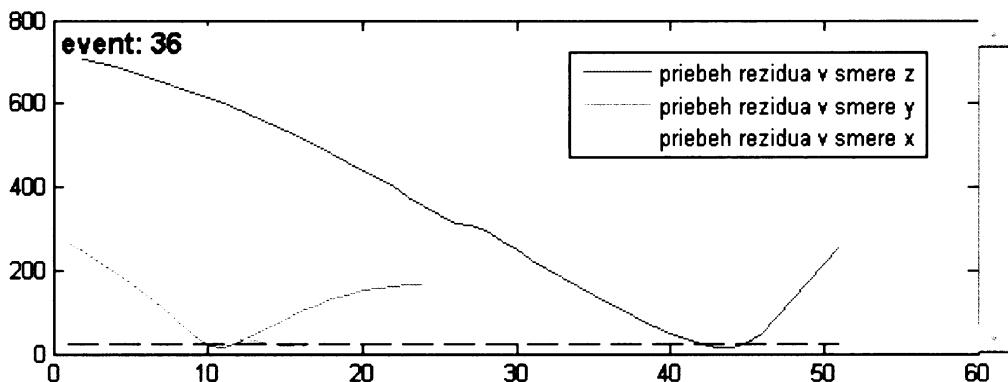
Pre kvalitu lokalizácie javu sú dve kritériá. Zhodu medzi nameranými a syntetickými časmi príchodu určuje veľkosť reziduálnej funkcie  $R_0$  v jej minime (rovnica 2.1). Neurčitosť určenia minima reziduálnej funkcie závisí na strmosti reziduálnej funkcie, t.j. na jej spáde v okolí

minima. Toho môžeme využiť pri odhade chyby lokalizácie, ktorú možno určiť ako vzdialenosť od ohniska, kde reziduálna funkcia prekročí spočitanú hladinu

$$\frac{N}{N-3} \cdot R_0 \quad (4.1)$$

(Fischer, Hampl, 1997), kde  $N$  je počet dát, v našom prípade je to počet uvažovaných snímačov, z ktorých bola robená lokalizácia. Trojka predstavuje počet stupňov voľnosti pre súradnice  $x, y, z$ , a parameter  $R_0$  je rezíduum, s ktorým bolo určené dané ohnisko. Príklad reziduálnej funkcie je zobrazený na Obr. 4. 5.

Pre väčší súbor javov možno konštruovať histogramy rezíduí  $R_0$ , pomocou ktorých možno spracovávaný súbor štatisticky rozčleniť podľa kvality lokalizácie.



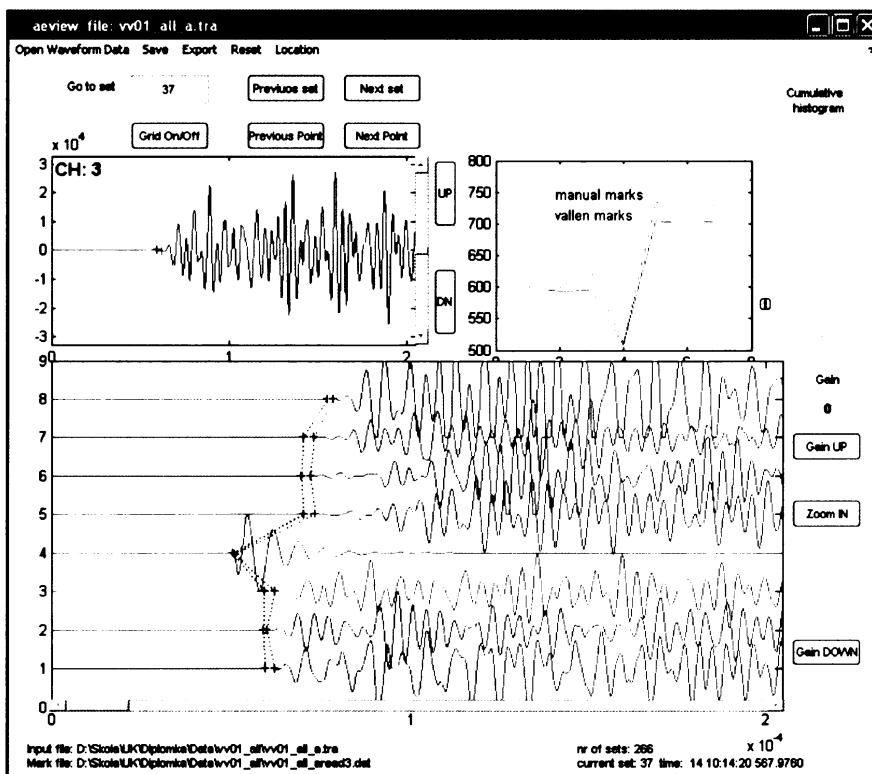
**Obr. 4. 5** Ukážka priebehu reziduálnej funkcie; osa x vyjadruje rozmerové vzorky delené veľkosťou objemovej bunky (kap. 2.3), na osi y sú vynesené hodnoty rezíduí elementárnych buniek v smeroch x, y, z

Ak by sme poznali polohu javu, bolo by možné porovnať odhadnuté chybu lokalizácie so vzdialenosťou medzi skutočnou a určenou polohou ohniska. To je možné v prípade dát z ultrazvukového prežarovania, u ktorých je poloha ohniska známa. Ohnisko sa nachádza v mieste snímača, ktorý horninovú vzorku prežaroval ultrazvukovým impulzom. Ďalej môžeme kvalitu lokalizácií skúmať na základe umelých, náhodných chýb (perturbácií) zavedených do časov príchodov, následne na to zopakovať lokalizáciu a sledovať ako sa budú meniť výsledky. Tento postup však v tejto práci nie je uplatnený a získané výsledky sú vyhodnotené na základe priebehu reziduálnej funkcie (kap. 6).

## 5. ÚPRAVY METODIKY SPRACOVANIA DÁT

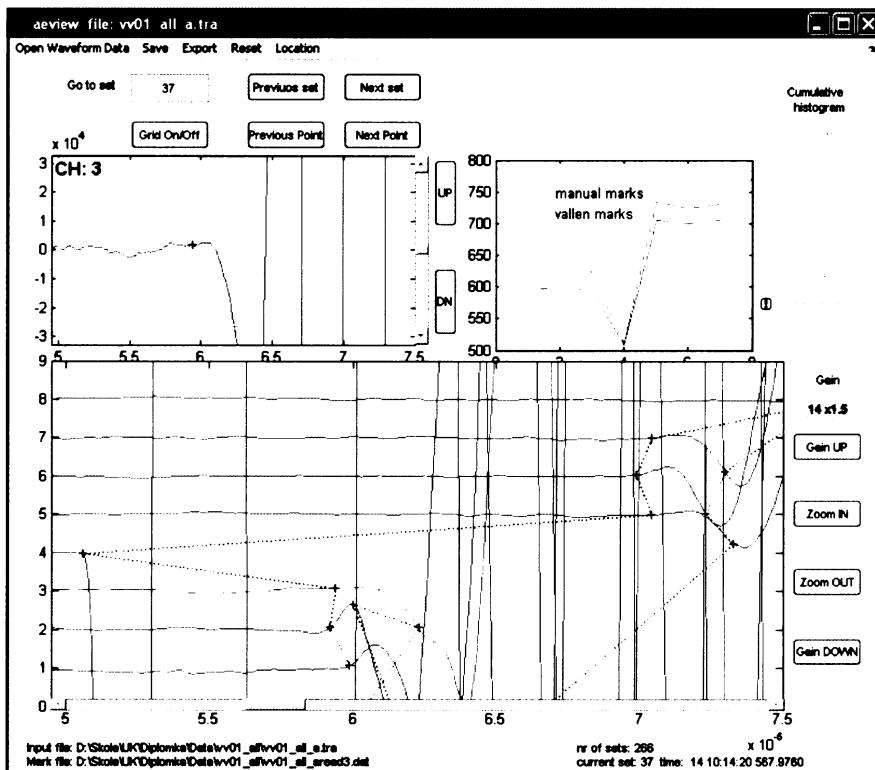
### 5.1. AEVIEW

K analýze dát získaných z experimentov bol na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Karlovej v Prahe vyvinutý program Aview (Vilhelm, 2006, ústne podanie), ktorý bol ďalej pre potreby diplomovej práce rozvinutý mnou a následne aj Petružálkom (2007, ústne podanie). Jedná sa o interpretačný program vytvorený v prostredí softwaru Matlab. Pôvodná verzia umožňovala načítanie vlnových obrazov javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania ako aj iných potrebných parametrických dát pomocou ActiveX knižnice programu Vallen systeme do Aview. V tejto verzii bolo možné vlnové obrazy prehliadať, zosilňovať, zoslabovať, zoomovať, čo umožnilo lepšie určiť čas príchodu signálu. Získané dáta bolo možné následne uložiť v podobe ASCII súboru. V ďalších verziach bola, v rámci diplomovej práce, pridaná možnosť zobraziť časy príchodov signálov tak, ako ich určil systém Vallen (Obr. 5. 1). To prvýkrát umožnilo konkrétnie vidieť ako Vallen pracuje a získané poznatky vyhodnotiť.



Obr. 5. 1 Ukážka odčítania časov príchodov programu Vallen (zelené značky) a manuálne odčítania (fialové značky) na dátach z ultrazvukového prežarovania

Spočiatku by sa zdalo, že nasadenia určené programom Vallen sú celkom presné, po dostatočnom zosilnení a priblížení jednotlivých stôp je však vidieť, že odčítania softwaru Vallen nie sú úplne precízne (Obr. 5. 2).

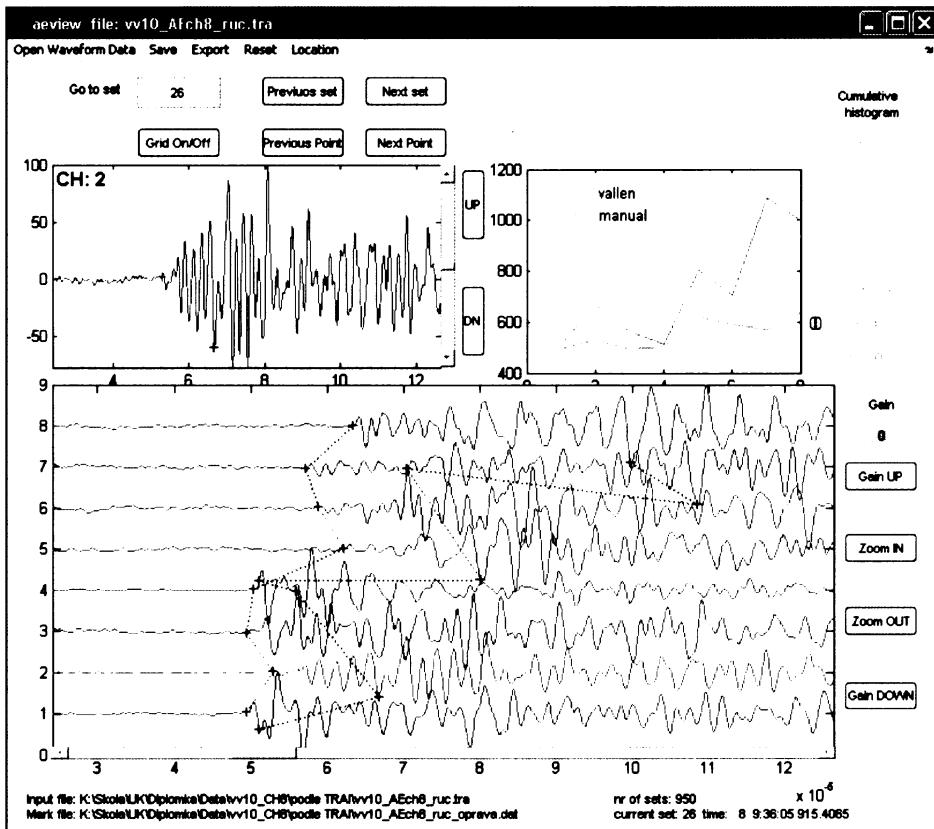


**Obr. 5. 2** Ukážka odčítania časov príchodov z obrázka 4.6 po zosilnení a priblížení<sup>1</sup>

Z Obr. 5. 2 je vidieť rozdiel určených nasadení, ten však v prípade dát ultrazvukového prežarovania nie je až taký markantný. Odčítania programu Vallen v tomto prípade teda len ojedinele spôsobujú hrubé chyby. Na dátach z akustickej emisie, ktorých priebeh nie je taký hladký, je však tento rozdiel podstatný (Obr. 5. 3). Príchody signálov určené programom Vallen sú veľmi často stanovené nesprávne, čo si spolu s časovou náročnosťou manuálneho získavania časov príchodov vynutilo vytvorenie aplikácie, ktorá by tento proces zautomatizovala, a ktorej

<sup>1</sup> Z obrázkov 5.1 – 5.3 je tiež vidieť rozloženie užívateľského rozhrania programu AEview. Na spodnom grafe sú vykreslené jednotlivé stopy signálov tak, ako boli zaznamenané snímačmi aparátury. V ľavom hornom grafe je potom detailný náhľad na aktuálne vybratú stopu, ktorá je v spodnom grafe vyznačená červenou. V pravom hornom grafe sú pre porovnanie vynesené určenia príchodov signálov pre jednotlivé snímače (hodochrony). V spodnej časti sú v dvoch riadkoch zobrazované základné informácie o súbore, s ktorým sa práve pracuje: názov súboru vlnových obrazov a odčítanie, celkový počet setov (osmíc stôp), t.j. počet javov akustickej emisie alebo ultrazvukového prežarovania, aktuálny set a absolútny čas jeho registrácie. Ďalej sú to tlačítka umožňujúce prehliadanie jednotlivých javov a zmenu amplitúdovej a časovej mierky signálu.

výsledky by boli pre účely lokalizácie postačujúce. Na Obr. 5. 3 je znázornený príklad jedného javu akustickej emisie, záznam nie je zosilnený.



Obr. 5. 3 Ukážka záznamu a určenia časov príchodov na jave akustickej emisie

V ďalšej verzii bol na základe publikácie (Petružálek, Lokajíček, Rudajev, Vilhelm, 2008) do skriptu implementovaný lokalizačný algoritmus, ktorý poskytoval riešenie úlohy lokalizácie metódou grid search. Hľadanie ohniska touto metódou (grid search) je opísané v kapitole 2.2. Tento postup je naviac vylepšený o možnosť nastaviť počet snímačov, ktoré pre lokalizačný algoritmus uvažujeme. Podstata úvahy je v tom, že týmto spôsobom je možné vylúčiť trasy, na ktorých sú najhoršie určené časy príchodu signálu a tým dosiahnuť lepšie zhľukovanie ohnísk (Vilhelm, 2006). Minimálny počet uvažovaných snímačov je však štyri (kapitolu 2.3). Pre štyri snímače by úloha výpočtu ohniska bola presne určená, t.j. počet dát by odpovedal počtu neznámych. V závislosti na počte uvažovaných snímačov sú počítané kombinácie časov príchodov na jednotlivých trasách, pričom pre výpočet ohniska je braná kombinácia, ktorá má najmenšie lokalizačné rezídum. Preto je počet uvažovaných snímačov braný od päť do osem. Získané výsledky lokalizácií vypočítaných z dát časov príchodov určených systémom Vallen

a z časov určených manuálne sú potom v ďalšej časti práce porovnávané medzi sebou. Ak nie je uvedené inak, prezentované výsledky sú uvažované pre lokalizáciu javov z 8 snímačov.

## 5.2. PROGRAM PRE AUTOMATICKÉ URČOVANIE PRVÉHO NASADENIA

Ako už bolo spomínané, nepresné odčítania časov príchodov systémom Vallen a zdĺhayvý proces ich manuálneho získavania podmienili vznik aplikácie, ktorá by tento proces zautomatizovala. K tomuto účelu bola v programe Matlab vytvorená aplikácia Pick \_ tester.

V minulosti bola problematika určenia času nasadenia už mnohokrát rozoberaná a existujú rôzne programy na hľadanie príchodov P a S vln, či už to je na 3-oj zložkových záznamoch zemetrasení alebo na iných seismických dátach. Taktiež bolo popísaných množstvo metód, ktoré riešia problém určenia času príchodu užitočného signálu z pozadia šumu. Vo väčšine prípadov je ako detektor k určeniu času príchodu signálu používaný pomer STA/LTA (z anglického Short Term Average a Long Term Average) alebo pomer signálu a šumu - SNR (z anglického Signal to Noise Ratio)(Zuolin Chen, 2005) aplikovaný na charakteristickú funkciu, ktorá predstavuje rôzne upravený signál. Môže to byť bud' absolútна hodnota amplitúd signálu, ich druhá mocnina alebo smerodajná odchýlka (Allen, 1982). Charakteristická funkcia (CF) môže byť ďalej rozšírená o rôzne koeficienty, ktoré zohľadňujú charakter signálu. Allen vo svojom programe zaviedol výpočet CF pomocou rovnice

$$CF(i) = y(i)^2 + K(y(i) - y(i-1))^2,$$

kde  $y$  je vstupný signál, druhá časť výrazu je jeho deriváciou a  $K$  je váhová konšanta, ktorá by mala odrážať vzorkovaciu frekvenciu a charakteristiky šumu seismickej stanice, na ktorej bol

signál zaznamenaný

$$K(i) = \frac{\sum_{i=1}^n |y(i)|}{\sum_{i=1}^n |y(i) - y(i-1)|}, \quad \text{kde } n \text{ je počet vzoriek signálu.}$$

Ďalším spôsobom, ktorým je možné vstupný signál modulovať na CF, je použitím vyšších štatistických momentov. Bežne sa pre účely automatického určovania času príchodu signálu používajú prvé štyri momenty. Prvý štatistický moment ( $S_1$ ) – priemer, druhý štatistický moment ( $S_2$ ) – rozptyl. Tretí a štvrtý štatistický moment sú nazývané ako šikmost' ( $S_3$ ) a špicatosť' ( $S_4$ ) (Nist/Sematech, 2003).

$$S_1 = \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}, S_2 = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}, S_3 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{(N-1)\sigma^3}, S_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N-1)\sigma^4} - 3.$$

Lokajíček a Klíma vo svojom článku (2006) navyše uvažujú aj piaty (S5) a šiesty (S6) štatistický moment, ktoré sú vyjadrené vzťahmi

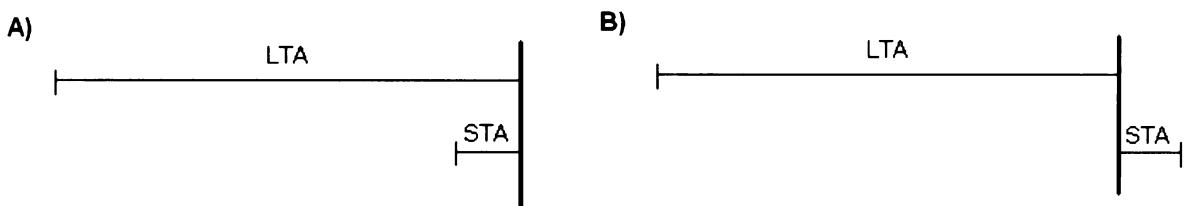
$$S_5 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^5}{(N-1)\sigma^5} \text{ a } S_6 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^6}{(N-1)\sigma^6} - 15.$$

Ich priebehy a vlastnosti sú podobné momentom S3 a S4, avšak vďaka vyšej mocnine majú väčšiu citlivosť.

V oblasti seismológie je možné používať polarizačnú CF (Fischer, 2003), ktorá detektuje energiu polarizovaného signálu. Z 3-oj zložkových seismických záznamov sa určí kovariančná matica  $\sigma_{ii}$  a CF potom odpovedá jej najväčšiemu vlastnému číslu. Pre detekciu S-vln stačí uvažovať len horizontálne zložky signálu, kde CF je možné rýchlo určiť ako

$$CF_1 = \lambda_{ne} = \frac{\sigma_{nn} + \sigma_{ee} + \sqrt{(\sigma_{nn} - \sigma_{ee})^2 + 4(\sigma_{ne})^2}}{2}$$

V tejto práci bol za detektor zvolený práve pomer STA/LTA, kde STA (LTA) je priemer amplitúd CF, počítanej spôsobom podľa Allena, v krátkom (dlhom) okne. Veľkosť každého z nich je možné ľubovoľne nastaviť. Proces výpočtu si možno predstaviť tak, že postupne posúvam okná STA a LTA po charakteristickej funkcií a v každom kroku počítam priemer aktuálnych hodnôt CF, pričom je možné použiť dve rôzne prekrycia okien, t.j. bud' posúvam okno LTA ako prvé a za ním okno STA alebo prvé je okno STA a druhé LTA. Situáciu popisuje Obr. 5. 4.

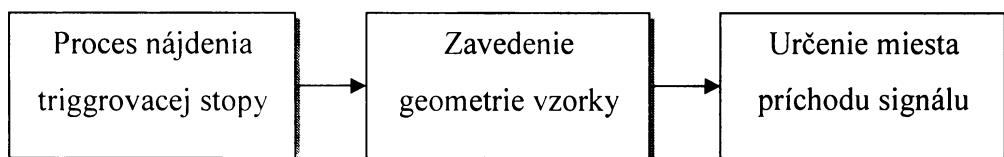


**Obr. 5. 4 Poradie okien STA a LTA; červená čiara znázorňuje bod, ktorému je prisudzovaná hodnota pomeru STA/LTA**

Rozdiel v poradí okien je, že usporiadanie v prípade B) ostrejšie vystihuje príchod signálu, čo sa následne prejaví v hodnotách pomeru STA/LTA. Pre ďalšie výpočty bolo preto použité toto poradie okien. Samotný výpočet hodnôt STA a LTA, ako už z názvu vyplýva, je priemer hodnôt charakteristickej funkcie v okne o určitej dĺžke. Okná sa postupne posúvajú cez celú dĺžku charakteristickej funkcie. Pre tento výpočet je potrebné používať cyklické algoritmy, ktoré sa opakujú v závislosti od množstva dát – stôp, na ktorých je prvé nasadenie hľadané. Program Matlab naviac na používanie cyklov nie je optimalizovaný, preto bola k výpočtu STA a LTA použitá konvolúcia. Tá je definovaná vzťahom  $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t-\tau)s_2(\tau)d\tau$  a označuje sa  $y(t) = s_1(t)*s_2(t)$ , kde  $s_1$  je obdĺžnikový signál o dĺžke STA alebo LTA a  $s_2$  je signál AE alebo UT. Seizmický signál je diskrétna rada čísel, preto môžeme vzťah pre konvolúciu písat' v tvare  $y(k) = \sum_j s_1(j)s_2(k+1-j)$  (výpočet konvolúcie v programe Matlab, zápis  $k+1$  z dôvodu požiadavky na kladný index premenných). Týmto spôsobom konvolúcia mnohonásobne urýchli proces výpočtu. Algoritmus výpočtu STA a LTA je v prílohe 1. Po získaní hodnôt STA a LTA sa spočíta ich pomer (STA/LTA), na základe ktorého sa ďalej odvíjajú kritériá pre určenie času príchodu signálu. Tie sú popísané v nasledujúcej kapitole.

### **5.3. POPIS DETEKTORU PROGRAMU PICK TESTER**

V tejto časti bude v niekoľkých základných krokoch popísaný proces určovania času príchodu signálu programom Pick\_tester. Blok diagram na Obr. 5. 5 znázorňuje zhrnutie všetkých bodov. Prvotným cieľom je určiť stopu, na ktorej je nasadenie signálu určené v najnižšom čase, a ktorá spustila registráciu na ostatných kanáloch. Na základe toho je potom možné aplikovať úvahu o geometrii horninovej vzorky a následne potom určiť čas príchodu signálu. Postup vychádza z hodnôt a priebehu funkcie pomeru STA/LTA (ďalej len „Pomer“), pričom dĺžka okna LTA je 100 bodov a okna STA je 10 bodov.



**Obr. 5.5 Blok diagram určenia času príchodu signálu**

### **Krok 1 – určenie hladiny pomeru STA/LTA**

Prvým krokom je určenie hladiny Pomeru, po ktorej prekročení bude určený hrubý čas príchodu. Hladina je určená ako 15 % úroveň z mediánu maxím amplitúd Pomerov stôp aktuálneho javu, t.j. na aktuálnej osmici stôp nájdeme maximá Pomerov, z ktorých spočítam medián. Hladina je potom určená ako 15 % z mediánu. V prípade, že je táto hladina väčšia ako je minimálne maximum Pomerov, je hladina stanovená na hodnotu tohto minima. V prípade, že sa jedná o slabý jav, dochádza k tomu, že úroveň 15 % nie je dostatočne veľká, preto je v takomto prípade hladina určená nastavenou hodnotou 4, ktorá je empiricky zistená.

### **Krok 2 – výpočet derivácie pomeru STA/LTA a vymedzenie jej peakov**

V ďalšom kroku sú spočítané derivácie Pomerov (ďalej len „Derivácie“) a opäť je určené ich maximum. Následne je na každej stope určená hladina Derivácie, ktorá je nastavená ako 1/3 maxima. Body, ktorých hodnoty Derivácie sú väčšie ako je hladina Derivácie vymedzujú peaky, ktoré indikujú určitý nárast signálu, resp. nárast pomeru STA/LTA.

### **Krok 3 – určenie nasadenia do hlavného alebo lokálneho maxima derivácie**

V ďalšom postupe sú uvažované len peaky, ktorých maximum je väčšie alebo rovné polovici hodnoty hlavného maxima Derivácie. Podľa počtu peakov splňajúcich toto kritérium sa následne aplikuje ďalšia podmienka:

- a) ak je nájdený len jeden peak, je čas príchodu signálu stanovený do bodu maxima Derivácie,
- b) ak existuje viac ako jeden peak a zároveň pomer STA/LTA v mieste lokálneho maxima predchádzajúceho peaku<sup>2</sup> je väčší alebo rovný hladine Pomeru a zároveň vzdialenosť posledných dvoch nájdených peakov je menšia ako 100 vzoriek, je určený čas príchodu signálu do lokálneho maxima Derivácie predchádzajúceho peaku,
- c) ak nie je splnená žiadna z predchádzajúcich podmienok, je čas príchodu signálu určený do bodu hlavného maxima Derivácie.

---

<sup>2</sup> Predchádzajúceho peaku znamená peak pred hlavným maximom Pomeru

Tento podmienkou určíme hrubé časy nasadení, ktoré sú umiestnené do určitého maxima Derivácie, či už to je maximum hlavné alebo lokálne. Pretože používame deriváciu, je toto maximum umiestnené do miesta najväčšieho sklonu funkcie pomeru STA/LTA.

#### **Krok 4 – prípadný posun značky**

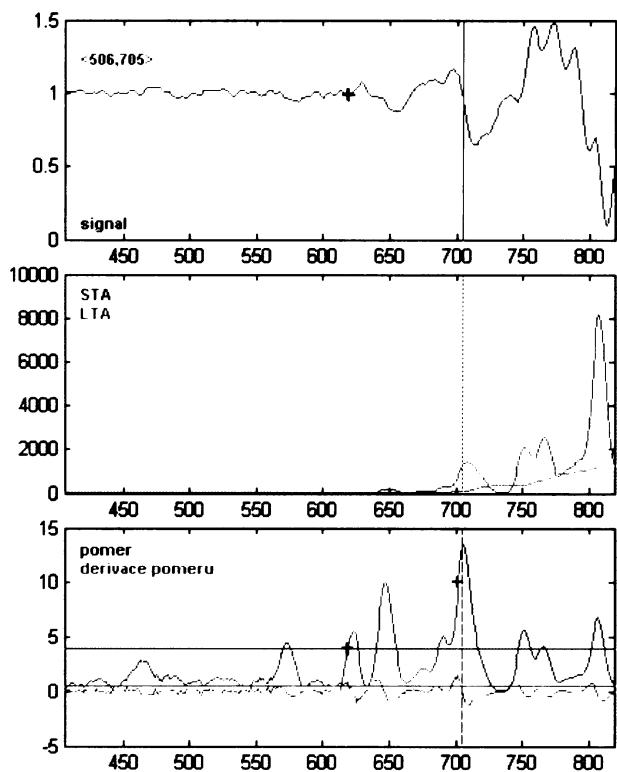
V tejto časti skriptu dochádza k analýze tvaru Pomeru a prípadnému posunu značky času príchodu signálu o peak dopredu. Tento krok sa uplatňuje v situáciách, kedy k nástupu signálu dochádza pozvoľne. Vtedy sa môže stať, že maximum Derivácie nie je hned' na prvom peaku Pomeru (Obr. 5. 6), ale až na nejakom nasledujúcom. Ak je však peak pred hlavným maximom Derivácie vzdialený od hlavného maxima do 25 bodov, je týmto postupom táto situácia odhalená a značka času príchodu signálu je posunutá o peak dopredu. Tento postup je pritom opakovany toľkokrát, koľko takýchto peakov existuje<sup>3</sup>.

#### **Krok 5 - určenie triggrovacej stopy**

V tomto kroku posunieme značku nasadenia do bodu, kde funkcia Pomeru prekročí vypočítanú hladinu Pomeru, čo by malo byť o pári vzoriek smerom dočas (k počiatku) od určeného maxima Derivácie. Všetky tieto kroky (Krok 1 - 5) smerovali k čo najlepšiemu určeniu stopy s najmenším časom príchodu – k tzv. triggrovacej stope na snímači, na ktorý signál dorazil ako prvý a tým spustil registráciu na ostatných snímačoch. Teraz, keď už túto stopu poznáme, môžeme do výpočtu implementovať úvahu o geometrii vzorky.

---

<sup>3</sup> V situácii podľa obrázku 5.6 je postup opakovany dvakrát.



Obr. 5. 6 Vysvetlenie postupu – prípadný posun značky<sup>4</sup>; jednotka na ose x [vzorky]

#### Krok 6 – určenie intervalov teoretického šírenia signálu vo vzorke

Na základe vzájomnej vzdialenosťi snímačov môžeme vypočítať teoretický čas šírenia vlnenia prostredím vzorky a určiť tak maximálne možné časy, za ktoré by mal signál k danému snímaču doraziť. Pri osem kanálovej aparátúre dostávame výpočtom podľa nasledujúceho vzťahu

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad i = j = 1 \dots 8, \quad i \neq j,$$

28 vzájomných vzdialenosťí snímačov (z praktických dôvodov výpočtu algoritmu však uvažujeme 56). Teoretický čas šírenia vlnenia od referenčného (triggrovacieho) snímača ( $S_R$ ) k ostatným snímačom ( $S_k$ ) potom počítame pomocou vzťahu

$$t_{S_R S_k} = \frac{r_{ij}}{v} P, \quad k=1,2,\dots,7,$$

kde  $v$  je rýchlosť šírenia pozdĺžnych vín vo vzorke a  $P$  je parameter elipsoidu anizotropie rýchlosťi, vyjadrený maticou  $3 \times 3$ , v ktorej sú zapísané vektory hlavných poloosí tohto

<sup>4</sup> Vo vrchnom grafe je vykreslený pôvodný signál, kde je vidieť jeho pozvoľný nástup. V spodnom grafe je vynesená krvika Pomeru a krvika Derivácie. Za normálnych okolností by bola značka času príchodu signálu stanovená do maxima krvky Derivácie (miesto označené fialovým krížikom). Postupom opísaným v kroku 4 je dosiahnutý posun značky do miesta označeného čiernym krížikom. Červená časť krvky Pomeru označuje interval teoretického šírenia signálu vo vzorke (viď krok 6)

elipsoidu. Pre každý snímač teda dostávame teoretické časy šírenia k ostatným snímačom. Tým môžeme vymedziť časový interval stopy (Obr. 5. 2, 5. 3 – červený úsek krvky Pomeru), pre ktorý platí vzťah

$$t_{S_k} < (t_{S_R S_k} + t_{S_R}) \cdot 1,2 , \quad (5.1)$$

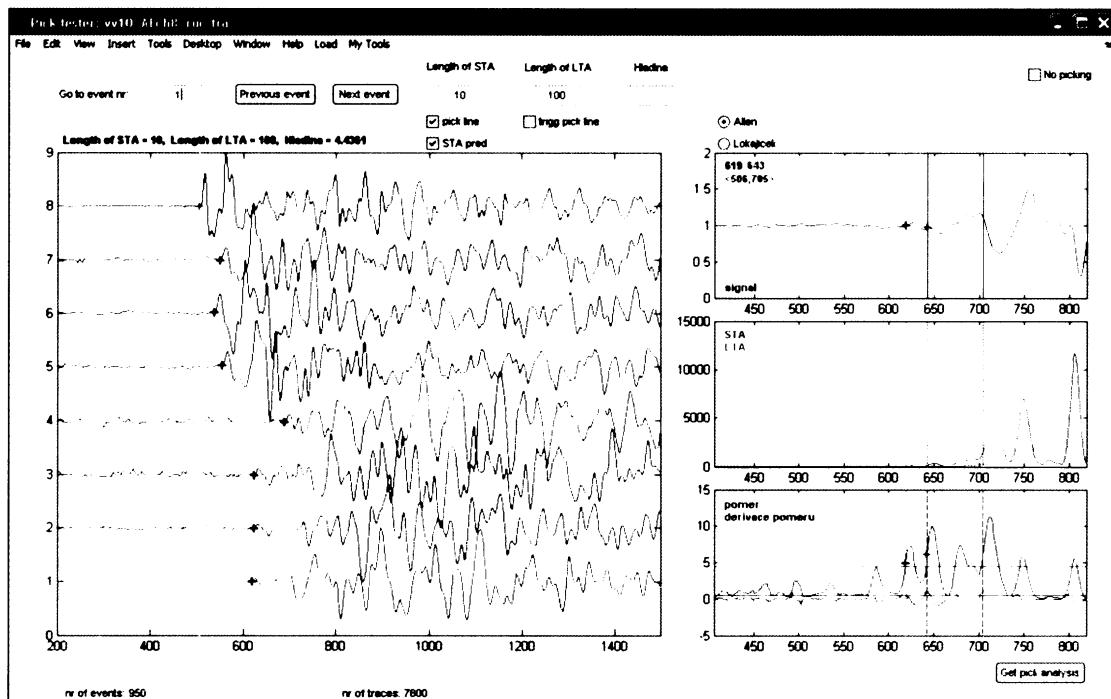
kde  $t_{S_k}$  je nameraný čas na  $k$ -tom snímači a  $t_{S_R}$  je čas príchodu signálu na referenčný snímač.

Spodná hranica intervalu je obmedzená hodnotou času nasadenia na triggrovacej stope. V takto vymedzenom intervale budeme potom čas príchodu signálu hľadať. Samozrejme, vzniká tu potreba čo najlepšie poznat rýchlosť model skúmanej vzorky. Ten sme získali z dát ultrazvukového prežarovania v určitom čase experimentu. V priebehu experimentu sa však môžu parametre modelu meniť, preto je do výpočtu teoretického intervalu zavedený koeficient 1,2, ktorý bol empiricky určený.

### Krok 7 – stanovenie výsledného času príchodu signálu

V tomto momente teda poznáme teoretické intervale, v ktorých by mal signál doraziť ku každému snímaču. V nich teraz opakujeme postup hľadania času príchodu, t.j. hľadáme miesta derivácie pomeru STA/LTA s maximálnymi hodnotami, do ktorých posadíme výslednú značku prvého nasadenia signálu.

Algoritmus výpočtu je pripojený v prílohe 2.



Obr. 5. 7 Ukážka programu na hľadanie času príchodu signálu

Na Obr. 5. 7 je ukážka programu vytvoreného na hľadanie príchodu signálu. V ľavej časti obrázku sú vykreslené stopy aktuálneho javu, ktoré boli zachytené na snímačoch 1 – 8, červenou je vyznačená aktuálne zvolená stopa, čiernymi krížikmi sú označené časy nasadenia, zeleným potom prvý (triggrovací) čas (pre lepšiu orientáciu). V pravo hore je graf signálu aktuálnej stopy v detaile, v strede je graf jeho funkcií STA (fialový) a LTA (zelený). Na spodnom grafe je potom vynesený pomer STA/LTA. Ďalej sú na ňom vidieť spočítané hladiny Pomeru (šedá línia) a Derivácie (fialová línia). Hodnota hladiny Pomeru je vypísaná v riadku nad hlavným grafom stôp (Hladina = 4,4361). V spodnom grafe je tiež vidieť interval teoretického času šírenia signálu vo vzorke. Ten je naznačený červenou a jeho rozsah je vypísaný v hornom grafe, tak isto červenou ((506, 680)). V tomto prípade je to teoretický čas (uvažovaný vo vzorkách), určený z kanálu 8, ktorý bol triggrovací, do kanálu 1 (zvolená stopa). Fialový krížik v grafoch označuje miesto maxima derivácie pomeru STA/LTA, čierny potom opäť umiestnenie výsledného času príchodu signálu. Ich hodnoty (vo vzorkách) sú vypísané opäť v hornom grafe.

Ďalej sú na obrázku vidieť editačné polička „Go to event nr“, „Length of STA“, „Length of LTA“ a „Hladina“, ktoré umožňujú nastavenie hodnôt dĺžky okna STA a LTA ako aj hodnotu hladiny. Poličko „Go to event nr“ spolu s tlačidlami „Previous event“ a „Next event“<sup>5</sup> umožňujú pohyb v dátach, prezeranie jednotlivých javov. Zaškrťávacie poličko „pick line“ vykresľuje línie bodu hlavného maxima derivácie a bodu výsledného nasadenia v troch grafoch v pravej časti, zaškrťávacie poličko „trigg pick line“ vykresľuje líniu minimálneho času príchodu v hlavnom grafe.

---

<sup>5</sup> Pohyb v dátach je taktiež možný pomocou šípok na klávesnici. Šípka v pravo plní funkciu polička „Next event“, šípka v ľavo funkciu polička „Previous event“. Šípkami hore a dole je možný pohyb po jednotlivých stopách hlavného grafu.

## 6. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A ICH DISKUSIA

Kritériami ohodnotenia výsledkov budú hlavne rozdiel časov príchodov signálov a veľkosť rezidua lokalizácie. Vstupnými parametrami pre určenie miesta ohniska sú časy príchodov signálu. Tie sú získavané automaticky pomocou programu Pick\_tester. Ich kvalita bude hodnotená porovnaním s časmi získanými manuálne operátorm, ktoré budeme považovať za správne. Ďalším zdrojom pre určenie ich kvality bude porovnanie s časmi získanými pomocou programu využívajúceho vyššie štatistické momenty (Lokajíček, Klíma, 2006). U dát ultrazvukového prežarovania poznáme zdroj vlnenia, preto je možné ohodnotiť kvalitu lokalizácie aj na základe vzdialenosťi ohniska, spočítaného pomocou algoritmu metódy grid search, od zdrojového snímača. Dáta prirodzených javov akustickej emisie, u ktorých nevieme presne určiť, kde nastal zdroj vlnenia, budú vyhodnotené na základe reziduálnej funkcie. Vyhodnocované parametre sú zhrnuté v Tab. 6. 1 a Tab. 6. 2.

### 6.1. ULTRAZVUKOVÉ PREŽAROVANIE (UT)

V tejto kapitole sa zameriame na porovnávanie časov nasadení UT získaných manuálne a automaticky pomocou dvoch metód: picker Vallen a vlastný picker PickTester (PT). Vo všeobecnosti by sa dalo povedať, že pri určovaní prvého nasadenia signálu dát ultrazvukového prežarovania pracuje software Vallen spoľahlivo. V tomto procese je spracovávaný signál známeho tvaru, ktorý je dosť silný na to, aby bolo miesto jeho príchodu určené pomerne presne na všetkých snímačoch.

**Tab. 6. 1 Vyhodnotenie dát UT; ✓ - vyhodnotené, x - nevyhodnotené**

Časy nasadení	tM-tA	Lokalizácia		
		D	XM-XA	Ex
M (manuálne)	x	✓	x	✓
A (Vallen)	✓	✓	x	x
A (Pick_tester)	✓	✓	✓	✓

$tM-tA$  = rozdiel manuálne a automaticky určených časov nasadení;

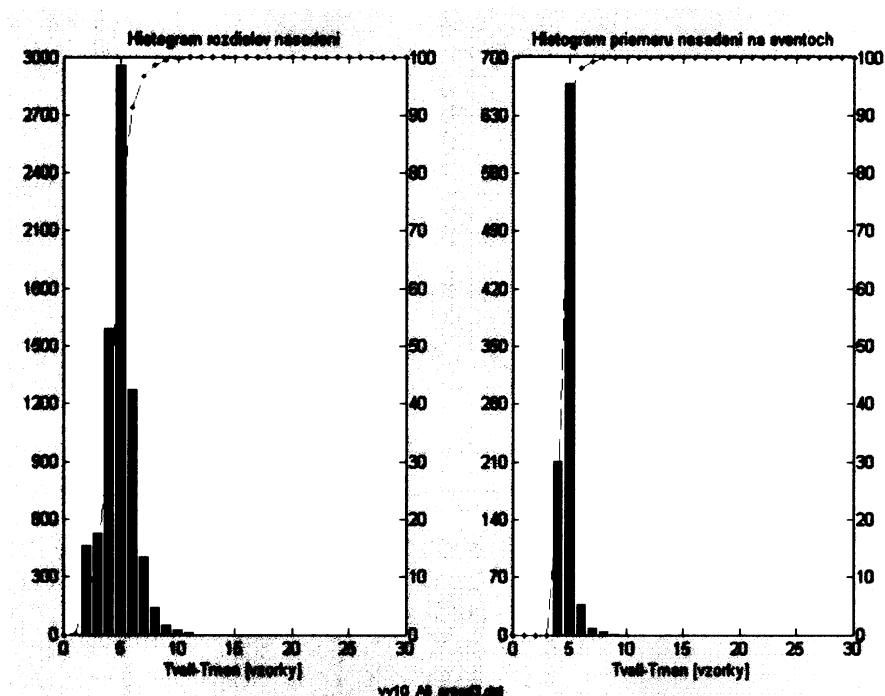
D = vzdialosť ohniska určeného manuálne, pickerom PT alebo pickerom Vallenom od snímača, ktorý prežaroval vzorku;

$XM-XA$  = vzdialenosť ohnísk vypočítané z manuálne a automaticky

určených časov, tzv. „skutočná chyba“;

$Ex$  = odhadnutá chyba lokalizácie podľa vzťahu 4.1;

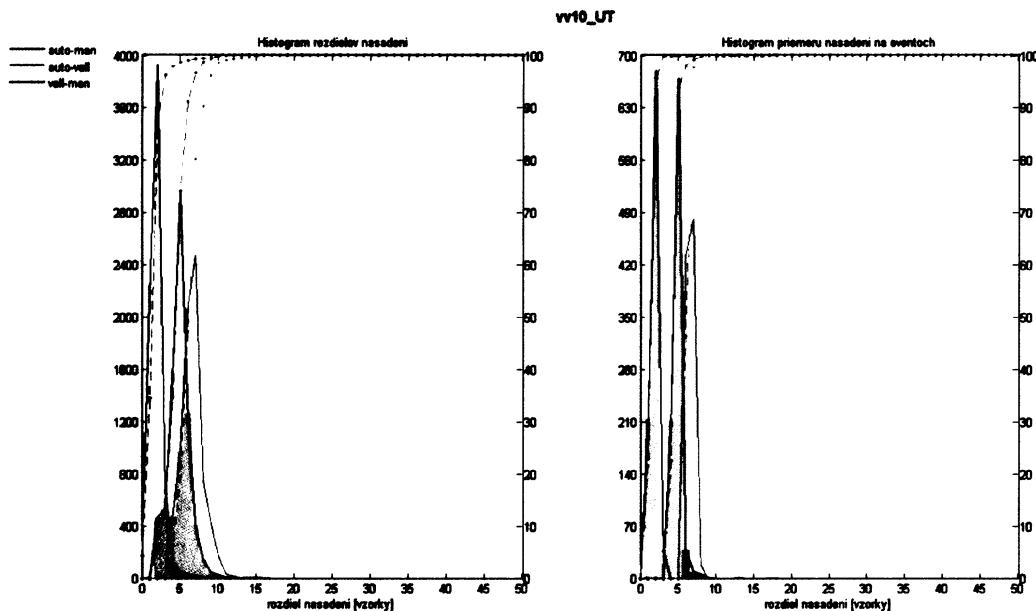
Obr. 6. 1 ukazuje histogram rozdielov manuálne určených nasadení a nasadení určených softwarom Vallen („tM-tA“) pre dátový súbor z experimentu VV10, v ktorom boli manuálne určené všetky dostupné dáta z ultrazvukového prežarovania (7512 stôp).



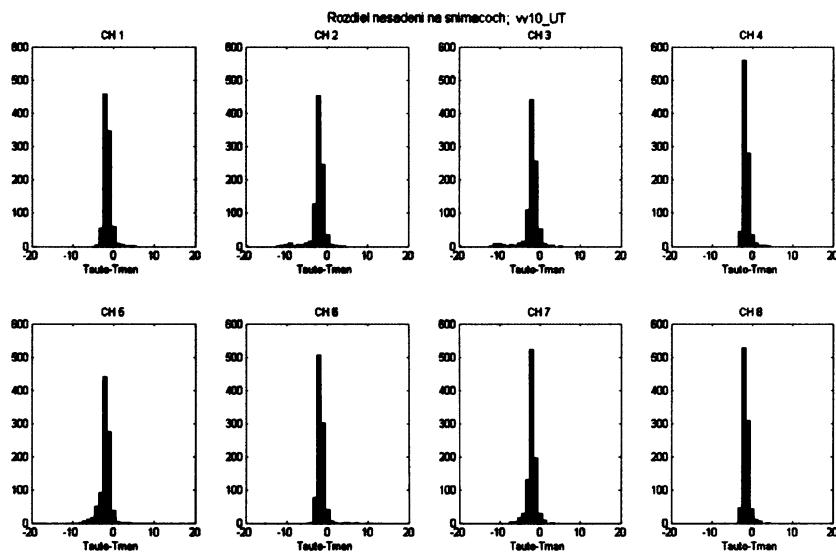
Obr. 6. 1 Histogramy absolútnych hodnôt rozdielov nasadení

Na Obr. 6. 1 je v ľavom grafe vynesený rozdiel časov nasadení signálu zo všetkých dostupných dát. V pravom grafe je potom tento rozdiel vynesený po javoch tak, že z každého javu (8 stôp) bol spočítaný priemerný rozdiel časov príchodov. Z kumulatívneho histogramu je vidieť, že 74,2 % časov nasadenia, z celkového počtu, je určených s presnosťou na 5 vzoriek, čo pri vzorkovacej frekvencii 10 MHz, predstavuje 0,5  $\mu$ sec a s presnosťou do 10 vzoriek (1  $\mu$ sec) až 99,7 % všetkých dát. Na ďalšom Obr. 6. 2 sú pre porovnanie vynesené rozdiely nasadení určených softwarom Vallen, manuálne a automaticky pomocou pickeru PT („tM-tA“). Z ľavého grafu je vidieť, že najlepšiu zhodu s manuálnymi (98,6 % dát do 5 vzoriek) dosahujú automatické nasadenia PT. Z Obr. 6. 3 a 6. 4 sa ukazuje, že v porovnaní s manuálnymi odčítaniami sú nasadenia programu Vallen určované „za“ a automatické nasadenia PT určované

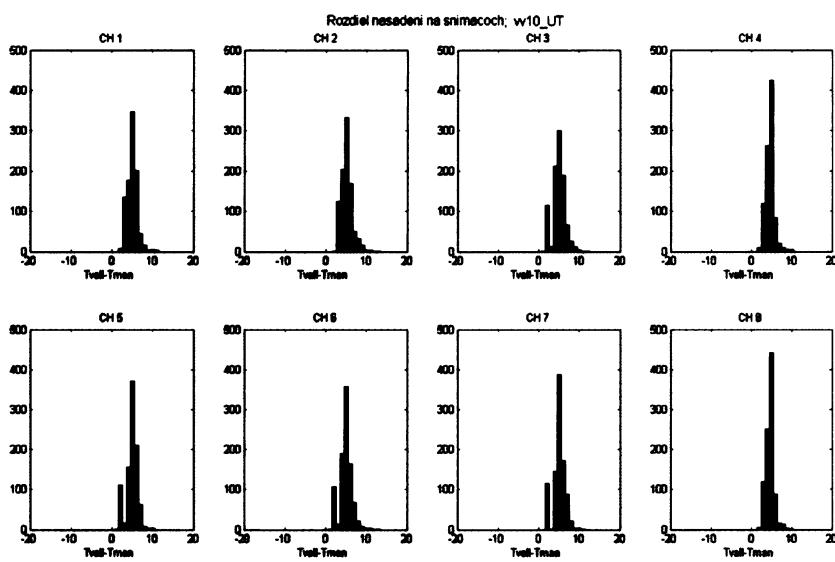
„pred“ manuálnymi. Preto sú najväčšie vzájomné rozdiely medzi automatickými odčítaniami softwaru Vallen a PT (Obr. 6. 2 zelený graf), kedy sa chyby pravdepodobne sčítajú.



**Obr. 6. 2 Histogram absolútnych hodnôt rozdielov nasadení určených softwarom Vallen, manuálne a automaticky; súbor vv10; jednotka na ose x [vzorky]**



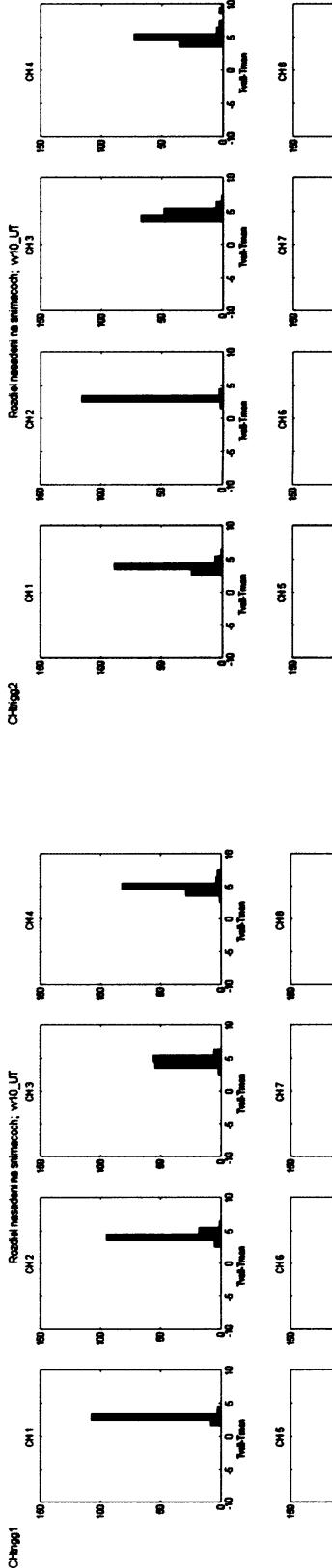
**Obr. 6. 3 Histogram rozdielov nasadení pickeru PT a manuálnych; súbor vv10; jednotka na ose x [vzorky]**



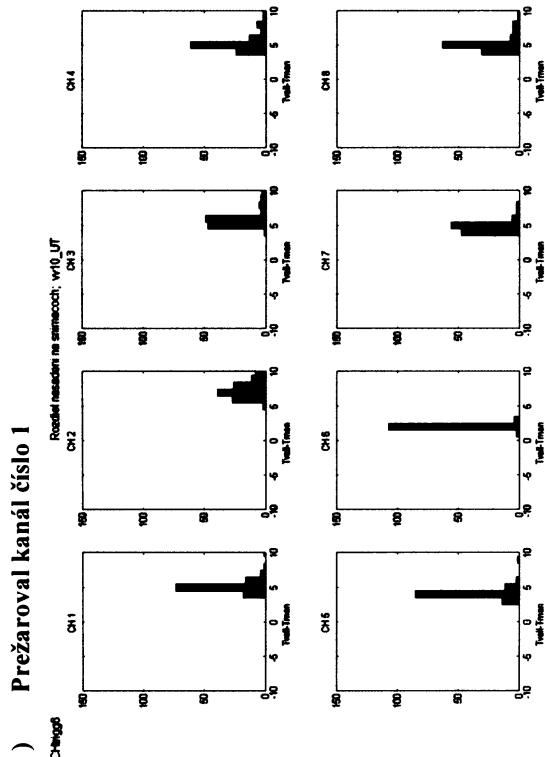
**Obr. 6. 4 Histogram rozdielov nasadení pickeru Vallen a manuálnych; súbor vv10; jednotka na ose x [vzorky]**

Pri vyhodnotení rozdielov určených nasadení podľa toho, ktorý snímač bol triggrovací (Obr. 6. 5) sa ukazuje, že najmenšie rozdiely, a teda najlepšiu zhodu, vykazuje práve snímač, ktorý skúmanú vzorku prežaroval. To je spôsobené vďaka vysielanému signálu, ktorý svojou intenzitou umožňuje určiť nasadenie pomerne presne.

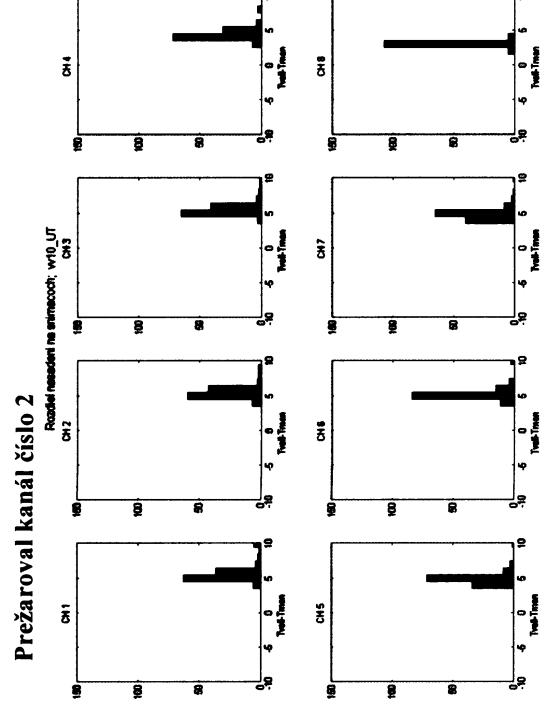
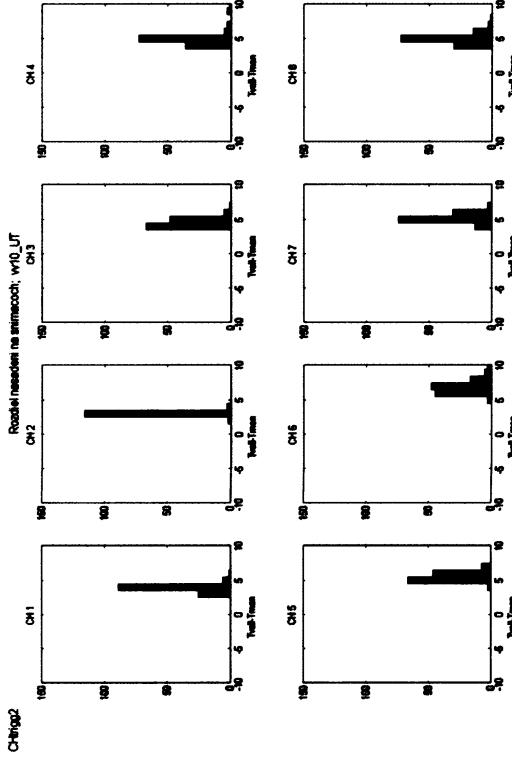
Ďalej sa z vynesených dát na Obr. 6. 5 b) a 6. 5 c) dá usudzovať na výskytne nehomogenity na dráhe medzi snímačmi 2 a 6, ktorá napríklad môže tlmit signál. Z toho dôvodu je potom nasadenie signálu určované horšie. Týmto spôsobom by taktiež bolo možné odhaliť napríklad malú citlivosť snímača alebo jeho nekvalitný kontakt s povrhom vzorky.



( a )  
Prežaroval kanál číslo 1

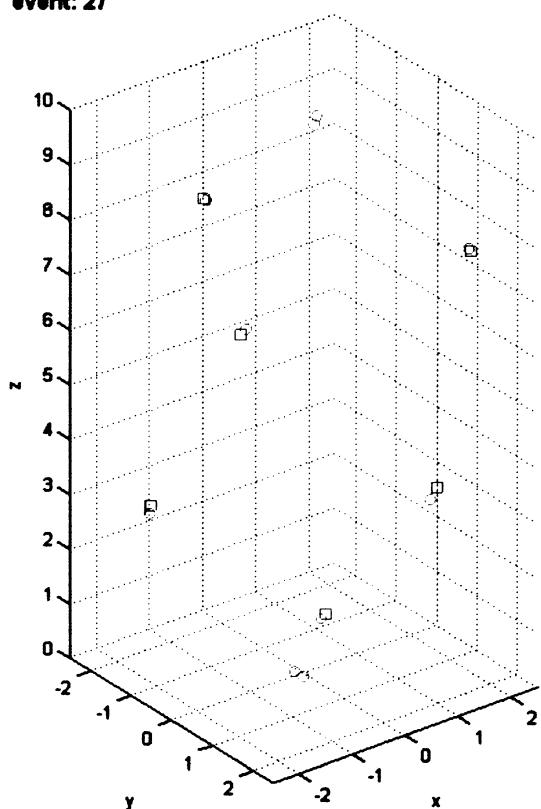


Obr. 6.5 Histogram časových rozdielov medzi nasadeniami určenými automaticky (picker Vallen) a manuálne podľa prežarovacieho kanálu; jednotka na ose x [vzorky]



Obr. 6.5 Histogram časových rozdielov medzi nasadeniami určenými automaticky (picker Vallen) a manuálne podľa prežarovacieho kanálu;

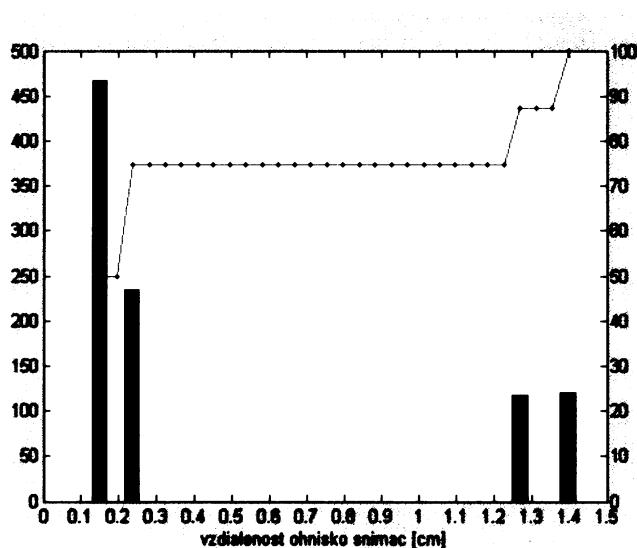
event: 27



Obr. 6. 6 Polohy ohnísk (zelené krúžky odpovedajú manuálnym odčítaniam, fialové krúžky odpovedajú odčítaniam pickeru Vallen) a snímačov (červené štvorčeky) v prípade UT;

Ultrazvukové prežarovanie nám ďalej poskytuje možnosť ohodnotiť kvalitu určovania miesta vzniku ohniska. Na základe znalosti polohy zdroja (zdrojom je snímač, ktorý vzorku prežaroval) môžme určiť rozdiel, s ktorým bolo nájdené ohnisko metódou grid search. Priestorový pohľad na vzorku s vyznačenými polohami ohnísk a snímačov je zobrazený na Obr. 6. 6.

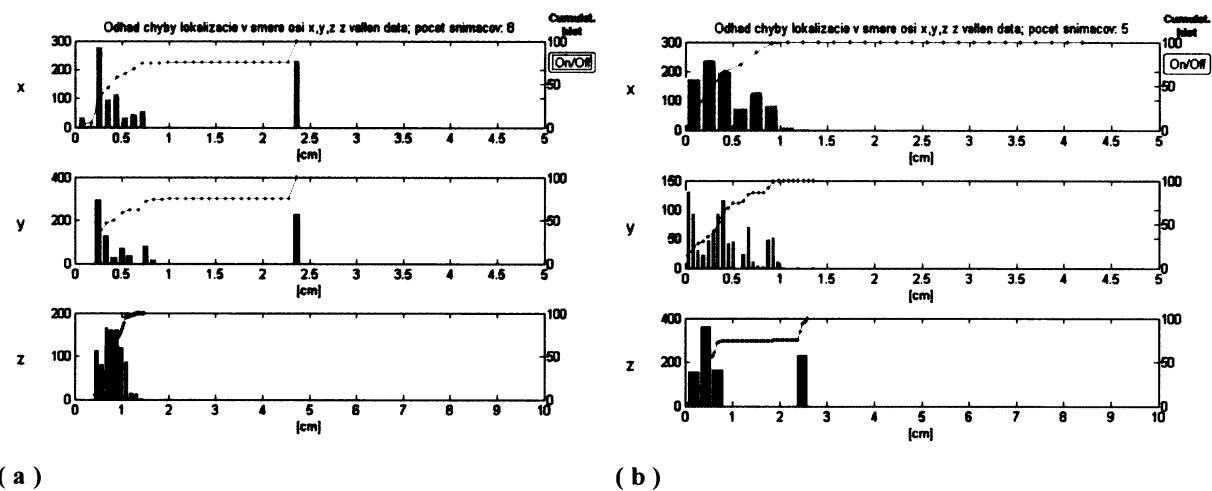
Je vidieť, že až na pár prípadov sa ohniská zhodujú a sú v tesnej blízkosti polohy snímačov. Je potreba brat' do úvahy delenie objemu vzorky na elementárne bunky (kap. 2.3), ktoré je v tomto prípade nastavené na 2 mm.



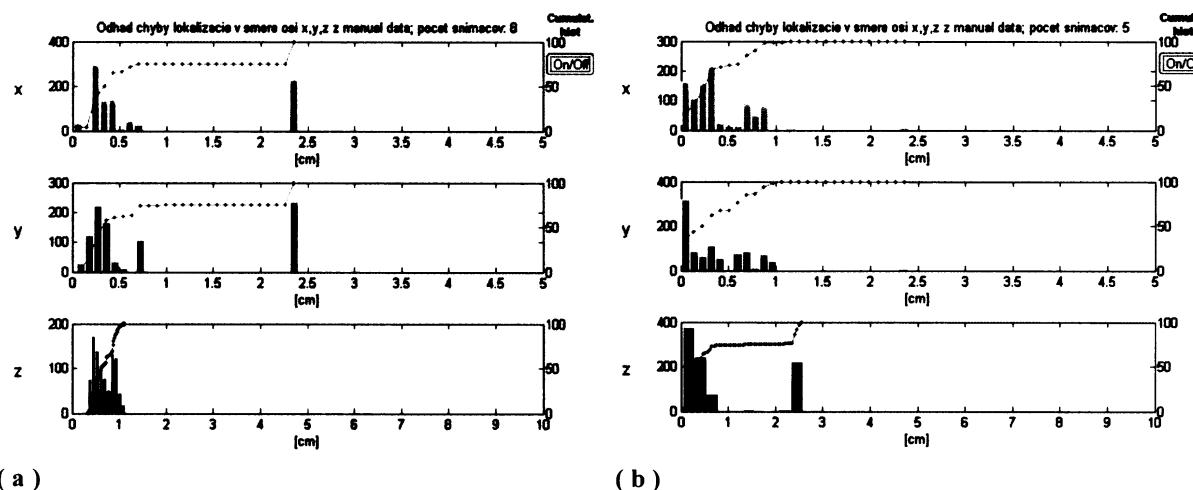
Obr. 6. 7 Histogram vzdialenosť ohnísk určených z manuálnych odčítaní od prežarovacieho snímača (zdroja);

Poloha snímača je pritom vyjadrená konkrétnou hodnotou, ktorá však presne nezachytáva jeho skutočné rozmery (kap. 3.2). Na Obr. 6. 6 je vynesených 27 javov UT, histogram vzdialenosť ohnísk od snímača, ktorý vzorku prežaroval, z časov určených pickerom Vallen je zobrazený na Obr. 6. 7.

Z grafu vyplýva, že 74,7 % určených ohnísk je od zdroja vzdialenosť do 3 mm. Distribúcia pre časy určené manuálne a pickerom PT je takmer rovnaká. Ďalším kritériom pre posúdenie kvality určenia ohniska je odhad chyby lokalizácie „Ex“. Ten vychádza z priebehu reziduálnej funkcie v okolí jej minima (kap. 4.3). Na nasledujúcich obrázkoch sú vynesené odhady chýb ohnísk pre časy určené softwarom Vallen (Obr. 6. 8) a pre časy určené manuálne (Obr. 6. 9), ako vzdialenosť ohniska od vypočítanej hladiny rezídua v smere osi x, y a z. Na obrázkoch a) je lokalizácia robená pre 8 snímačov, na obrázkoch b) pre 5 snímačov.



Obr. 6. 8 Histogram odhadu chyby lokalizácie „Ex“ v smere osi x, y z, pre 8 (Obr. a) a pre 5 (Obr. b) snímačov; dátá Vallen



Obr. 6. 9 Histogram odhadu chyby lokalizácie „Ex“ v smere osi x, y, z, pre 8 (Obr. a) a pre 5 (Obr. b) snímačov; manuálne dátá

Z obrázkov je opäť vidieť podobnosť, čo potvrdzuje dostatočnú presnosť odčítaní časov príchodov UT signálov softwarom Vallen.

## 6.2. AKUSTICKÁ EMISIA (AE)

V prípade dát akustickej emisie je situácia trochu zložitejšia. Zdroje vlnenia majú rôznu intenzitu v dôsledku čoho majú signály registrované snímačmi spravidla nižšie amplitúdy ako prežarovací impulz, a sú zašumené. Z toho dôvodu je presné určenie nasadenia obtiažnejšie. Prezentované výsledky sú opäť získané z dátového súboru vv10. V prípade lokalizácií dát AE budeme kvalitu vypočítaných ohnísk posudzovať na základe rezídua lokalizácie („R“, Tab. 6. 2). Ďalej budú vyhodnotené rozdiely časov príchodov signálov („tM-tA“ alebo „tPT-tS“), vzdialosti ohnísk („XM-XA“ alebo „XPT-XS“) a odhady chyby lokalizácie („Ex“).

Program Pick\_tester je testovaný na dvoch dátových súboroch, ktoré boli oba vybrané z experimentu vv10. Pre prvý z nich, súboru vv10\_CH8 (ďalej len súbor „A“), boli určené manuálne odčítania na 950 javoch (7600 stôp) akustickej emisie. Tieto údaje poslúžili ako modelový súbor pre vytvorenie algoritmu určovania času príchodu signálu v programe Pick\_tester. Pre overenie funkcionality tohto programu bol ďalej vytvorený súbor vv10\_AE1000 (ďalej len súbor „B“). Ten obsahoval 1007 javov (8056 stôp) akustickej emisie, ktoré boli vybraté zo súboru vv10 tak, aby rovnomerne pokrývali časový priebeh experimentu, pre tieto javy však neboli k dispozícii manuálne odčítania príchodov signálov. Na oboch dátových súboroch „A“ aj „B“ však boli určené odčítania časov nasadení programom využívajúcim vyššie štatistické momenty, čo nám tak dovoľuje oba dátové súbory medzi sebou „previazať“. Z rozdielnosti týchto súborov vyplýval aj iný spôsob overenia kvality odčítaní. Zatiaľ čo u prvého súboru bolo možné ohodnotiť kvalitu odčítaní priamo porovnaním s manuálnymi odčítaniami, u druhého súboru bola kvalita hodnotená len sprostredkovane pomocou rezídua lokalizácie a vzájomnej vzdialenosťi ohnísk. Prehľadne je to zobrazené v Tab. 6. 2.

Tab. 6. 2 Vyhodnotenie dát AE;  $\checkmark$  - vyhodnotené, x – nevyhodnotené

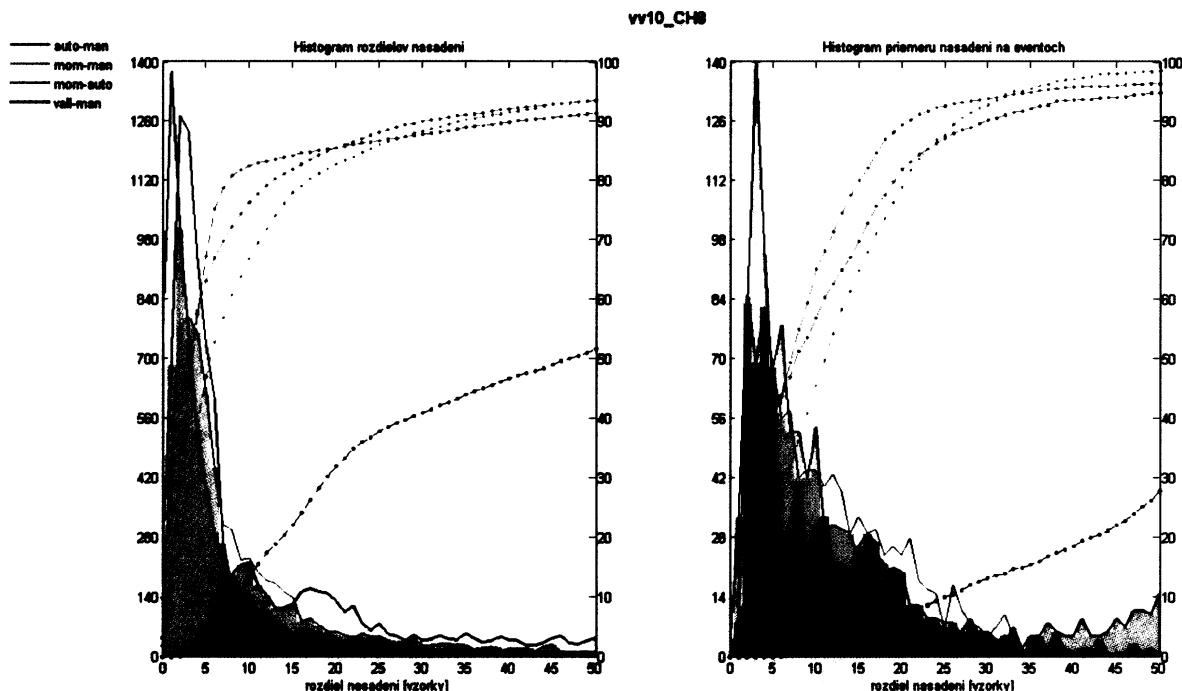
vv10_CH8 (A)				vv10_AE1000 (B)			
Časy nasadení	tM-tA	Lokalizácie			Časy nasadení	tPT-tS	Lokalizácie
		R	XM-XA	Ex			
M (manuálne)	x	$\checkmark$	x	$\checkmark$	V (Vallen)	x	$\checkmark$
A (Vallen)	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	x	PT (Pick_tester)	x	$\checkmark$
A (Pick_tester)	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	S (moment S6)	$\checkmark$	$\checkmark$
A (moment S6)	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$			

$tPT-tS$  = rozdiel časov nasadení určených algoritmom Pick\_Tester a momentom S6;

R = suma rezíduí lokalizácie;

XPT-XS = vzdialenosť ohnísk vypočítané z časov nasadení určených pickerom PT a momentovým pickerom, tzv. „skutočná chyba“;

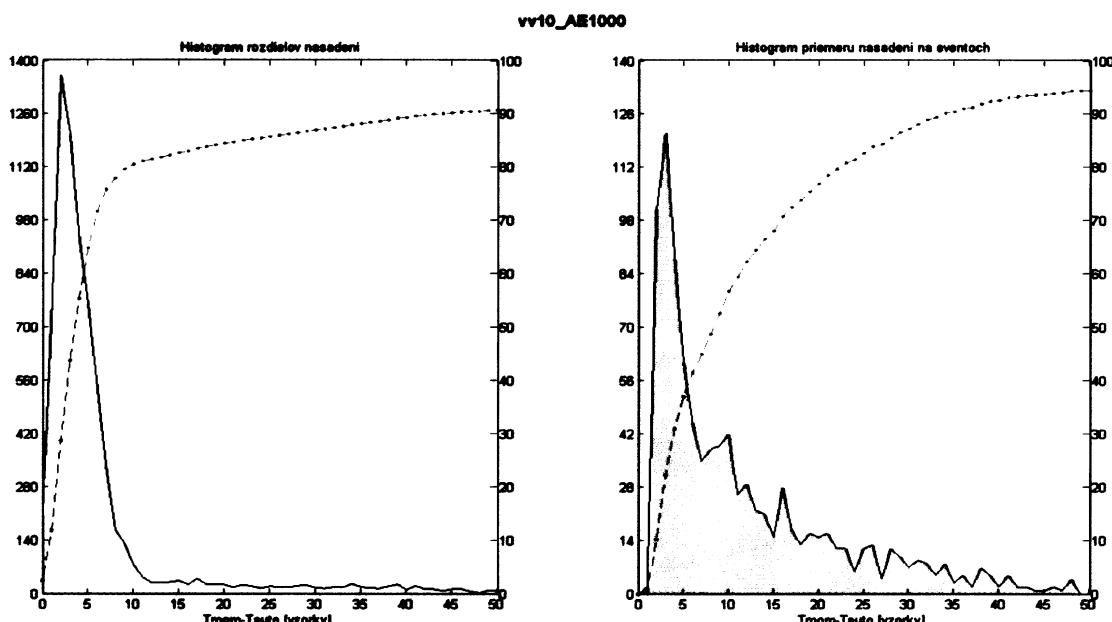
Ostatné veličiny majú rovnaký význam ako v Tab. 6. 1.



Obr. 6. 10 Histogramy absolútnej hodnoty rozdielov časov príchodov rôzne určených; dátový súbor „A“

Na Obr. 6. 10 sú vynesené histogramy absolútnej hodnoty rozdielov časov nasadení signálov určených manuálne (man), programom Vallen (vall), Pick\_tester (auto) a programom

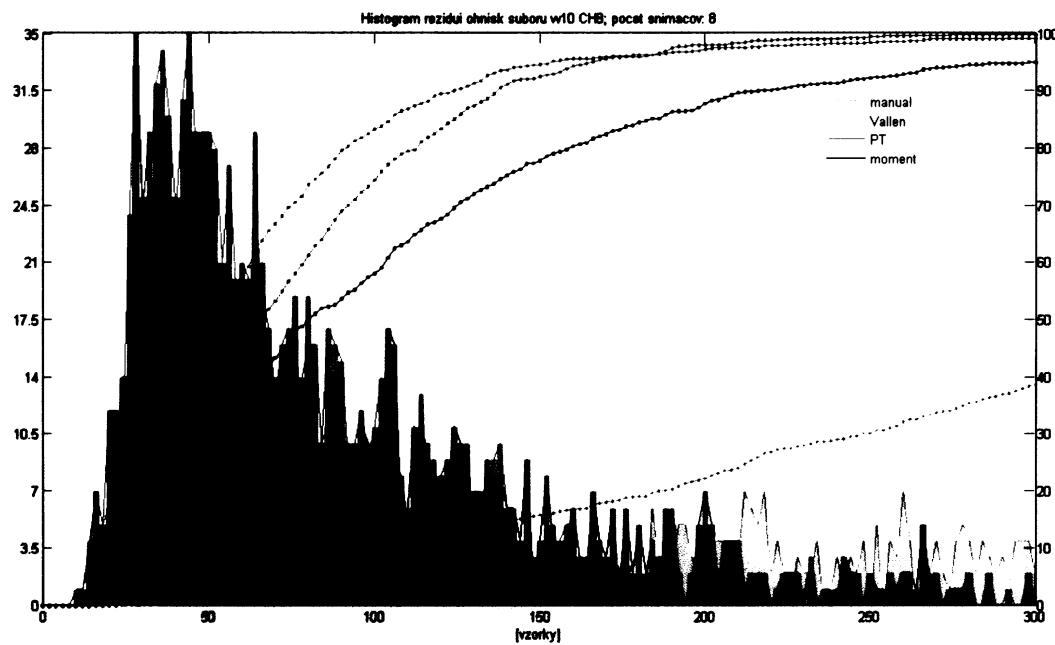
používajúcim vyššie štatistické momenty (mom), „tM-tA“ z Tab. 6. 2. Z grafov a z prehľadu výsledkov v Tab. 6. 3 je vidieť, že najlepšiu presnosť v porovnaní s manuálnymi nasadeniami dosahujú odčítania PT (76,3 % nasadení s chybou do 10 vzoriek). Druhú najlepšiu zhodu vykazujú rozdiely nasadení momentových a automatických odčítaní PT (82,5 % s rozdielom do 10 vzoriek). Táto závislosť nás bude neskôr zaujímať v prípade súboru „B“, u ktorého nie sú k dispozícii manuálne určené odčítania. Zhoda momentových a manuálnych odčítaní vychádza na 66,8 % s chybou do 10 vzoriek. Naopak najhoršiu zhodu s manuálnymi odčítaniami vykazujú časy určené programom Vallen (13,4 % dát do 10 vzoriek), ktoré sú z toho dôvodu pre určovanie polohy ohnísk najmenej vhodné.



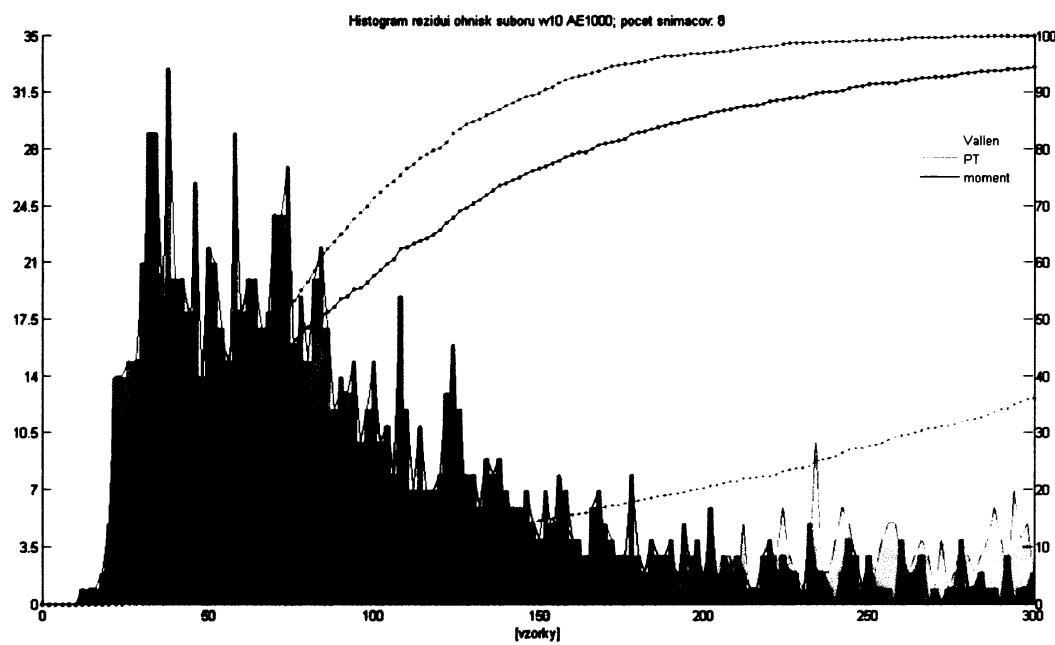
**Obr. 6. 11 Histogramy absolútnych hodnôt rozdielov časov príchodov určených programom Pick\_tester a programom používajúcim vyššie štatistické momenty; dátový súbor „B“**

Na Obr. 6. 11 sú vynesené histogramy absolútnych hodnôt rozdielov nasadení („tPT-tS“ z Tab. 6. 2) pre dátový súbor „B“. Dáta vynesené na tomto obrázku dosahujú v celkovom zobrazení zhodu 80,5 % všetkých dát do 10 vzoriek. Pri porovnaní kvality momentových odčítaní dátového súboru „A“ v porovnaní s manuálnymi (66,8 % do 10 vzoriek) (Obr. 6. 10, zelený graf vľavo) sa dá usudzovať, že odčítania programu Pick\_tester by mali mať v porovnaní s manuálnymi odčítaniami dátového súboru „B“ podobnú úspešnosť ako v prípade súboru „A“. Potvrdzujú to aj výhodnotenia rezíduí lokalizácie „R“ (Obr. 6. 12, 6. 13), vzájomné vzdialenosťi

ohnísk „XM-XA“ (Obr. 6. 14) a „XPT-XS“ (Obr. 6. 15) ako aj odhady chyby ohnísk „Ex“ (Obr. 6. 16, 6. 18).



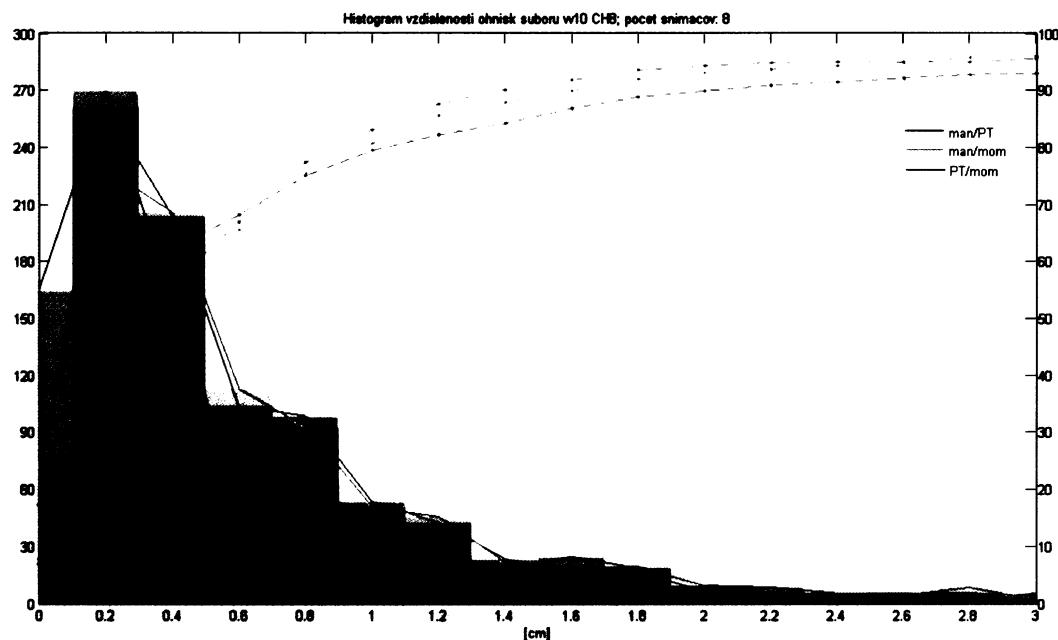
Obr. 6. 12 Histogramy rezíduí lokalizácie dátového súboru „A“ pre rôzne druhy odčítaní



Obr. 6. 13 Histogramy rezíduí lokalizácie dátového súboru „B“ pre rôzne druhy odčítaní

Porovnanie rezíduí lokalizácie (Obr. 6. 12 a 6. 13) ukazuje podobné poradie úspešnosti pickerov. Ak vezmeme ako kritérium kvality odčítaní hranicu rezídua lokalizácie  $10 \mu\text{s}$  (100 vzoriek), manuálne odčítania vyhovejú tejto podmienke v 83,3 % javov, odčítania pickeru PT v 74,4 % javov, momentové odčítania v 58,1 % javov a nakoniec odčítania softwaru Vallen len v 8,9 % javov. Veľmi podobné výsledky vykazuje aj dátový súbor „B“ (Tab. 6. 3).

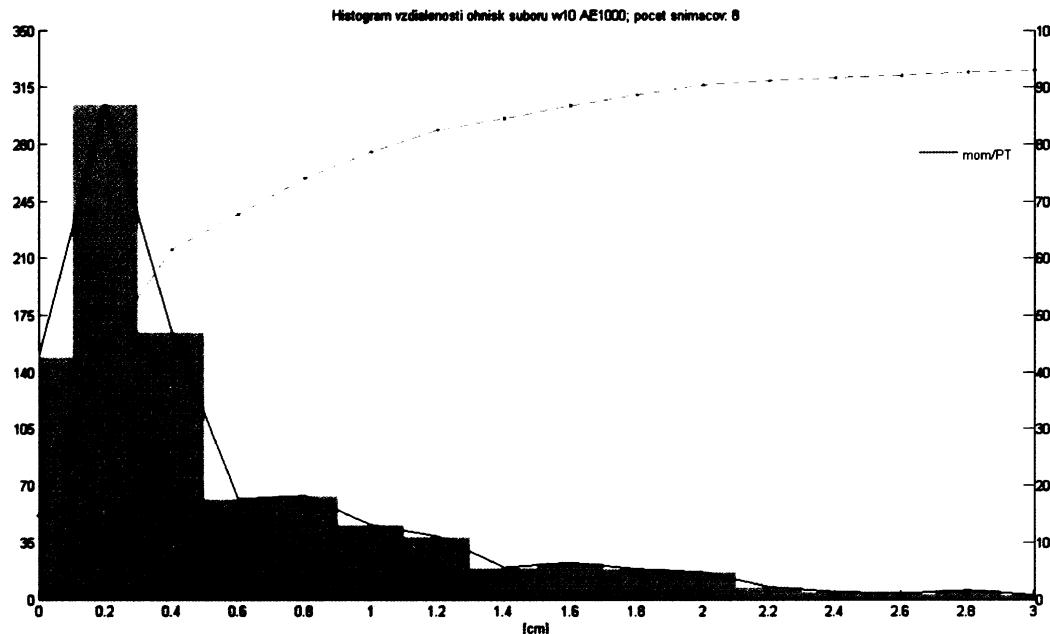
Za zmienku stojí porovnanie pickeru PT a momentového pickeru. U oboch dátových súborov sa ukazuje, že kumulatívny počet rezíduí momentového pickeru konverguje veľmi pomaly k hodnote 100 %. To môže byť spôsobené častejším výskytom hrubých chýb z toho dôvodu, že na rozdiel od pickeru PT, momentový picker pre hľadanie nasadení nepoužíva kritérium geometrie vzorky pri definícii časových okien.



**Obr. 6. 14 Histogram vzájomných vzdialenosí ohnísk „XM-XA“ dátového súboru „A“ pre rôzne druhy odčítaní**

Na Obr. 6. 14 sú vynesené vzájomné vzdialenosí ohnísk „XM-XA“, určených z odčítaní momentového pickeru (mom), pickeru PT (PT) a z odčítaní určených manuálne (man) pre dátový súbor „A“. Porovnanie vzájomnej vzdialenosí medzi ohnískami určenými z manuálnych a automatických časov nasadení na Obr. 6. 14 ukazuje, že lokalizácie z odčítaní PT pickeru a momentového pickeru majú podobnú kvalitu. Asi 80 % javov má chybu lokalizácie „XM-XA“

do 1 cm. Zdá sa teda, že nižšia kvalita odčítaní momentového pickeru nevadí pri lokalizácii ohniska. Jedným z dôvodov môže byť pravdepodobne použitie normy L1 pri lokalizácii, ktorá je málo citlivá na hrubé chyby, ktoré sa pravdepodobne vyskytujú v odčítaniach momentového pickeru.

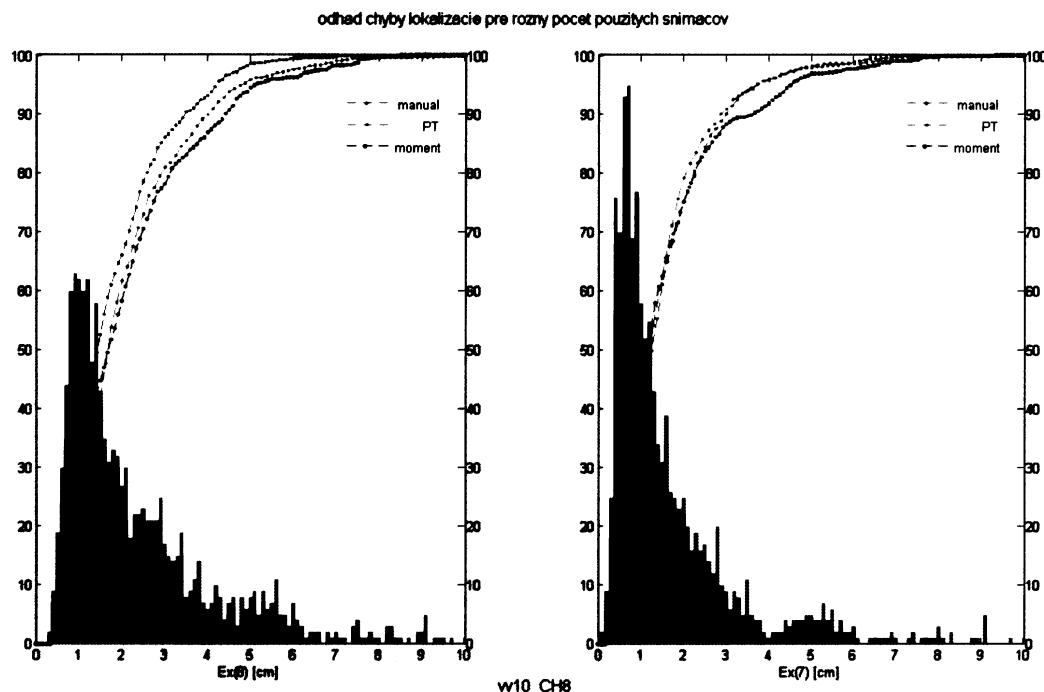


Obr. 6. 15 Histogram vzájomných vzdialenosťí ohnísk „XPT-XS“ dátového súboru „B“

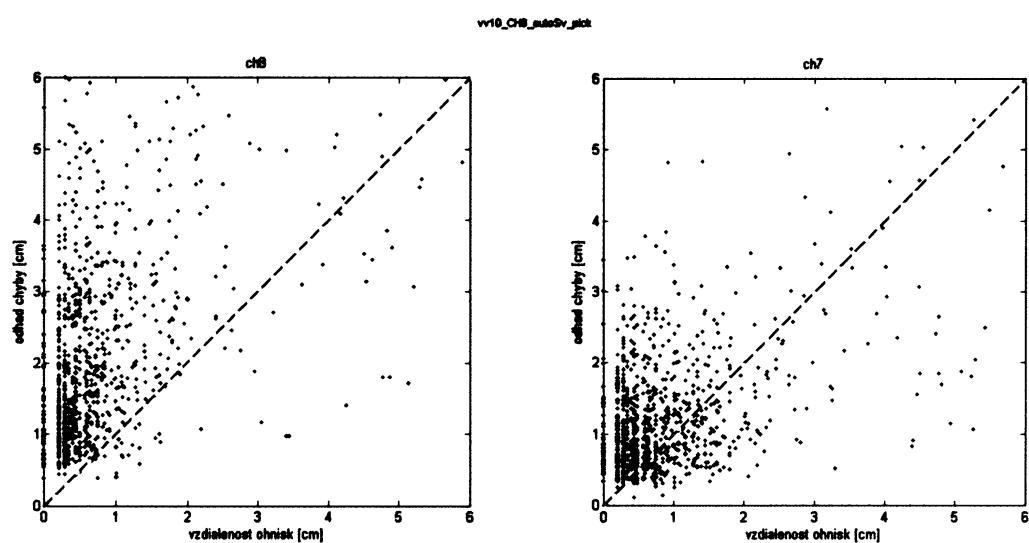
Na Obr. 6. 15 sú vynesené vzájomné vzdialenosťi ohnísk „XPT-XS“ určených z časov momentového a PT pickeru pre dátový súbor „B“. Vzájomná vzdialenosť ohnísk „XPT-XS“ vykazuje do 1 cm zhodu 77,3 %, čo je v porovnaní s dátovým súborom „A“ zhoda opäť veľmi blízka (Tab. 6. 3).

Posledným kritériom kvality odčítaní je odhad chyby lokalizácie „Ex“ podľa vzťahu (4.1). Distribúcia „Ex“ pre lokalizáciu s použitím 8 a 7 snímačov dátového súboru „A“ je zobrazená na Obr. 6. 16. Vyplýva z neho, že do hladiny chyby lokalizácie 1 cm padne 29,8 % manuálnych odčítaní, 22,1 % odčítaní pickeru PT a 18,4 % momentových odčítaní. Z histogramov na Obr. 6. 14 a 6. 16 je ďalej vidieť, že v porovnaní so „skutočnou“ vzdialenosťou ohnísk „XM-XA“ je odhadovaná chyba lokalizácie „Ex“ okolo štyrikrát väčšia. Dokumentuje to taktiež aj Obr. 6. 17, na ktorom je vykreslený vzťah medzi „Ex“ a „skutočnou“ chybou „XM-XA“. Z toho je navyše vidieť, že pri lokalizácii zo 7 snímačov (graf v pravo) poklesne odhad „Ex“

zhruba o polovicu, čím dochádza k zlepšeniu korelácie medzi „skutočnou“ chybou „XM-XA“ a odhadovanou chybou lokalizácie „Ex“.



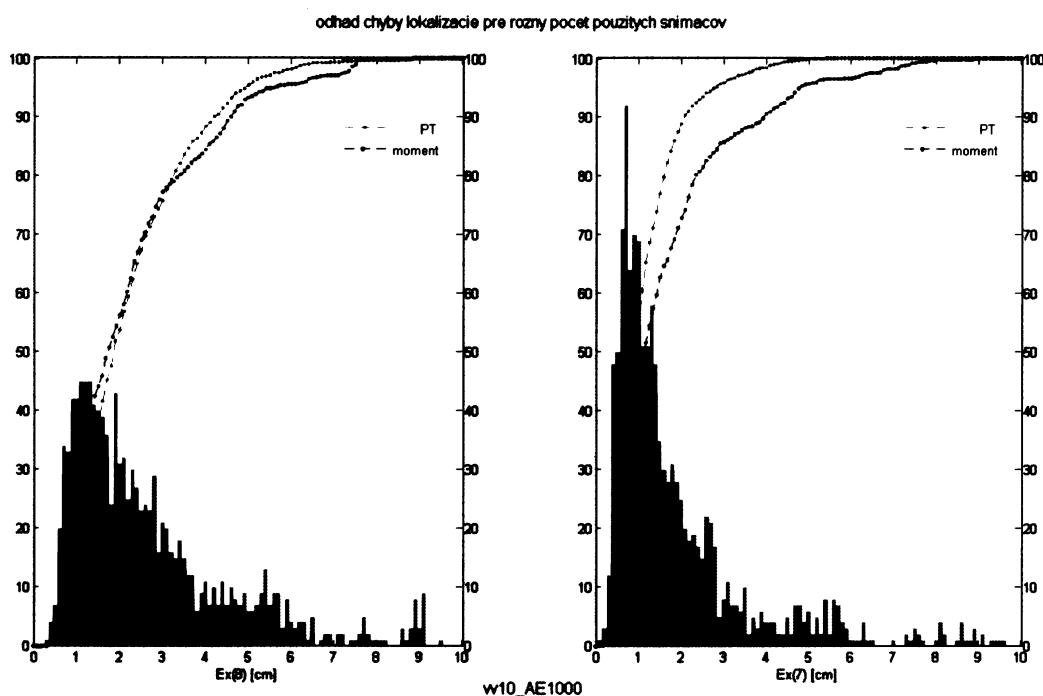
Obr. 6. 16 Histogram odhadu chyby lokalizácie (Ex) pre ohniská určené z manuálnych, PT a momentových nasadení; súbor „A“



Obr. 6. 17 Závislosť odhadnutej chyby (Ex) na „skutočnej“ chybe lokalizácie (XM-XA) pre ohniská určené z PT nasadení; súbor „A“

Je to pravdepodobne dôsledok toho, že použitá metóda (Petružálek, Lokajíček, Rudajev, Vilhelm, 2008) vylúči čas príchodu s najväčším rezíduom a zhoda meraných a syntetických časov sa tým výrazne zlepší. Ako už bolo povedané, odhad chyby „Ex“ prevyšuje chybu „XM-XA“. Pretože odhad chyby lokalizácie „Ex“ je odvodený zo strmosti reziduálnej funkcie v okolí minima, vyjadruje skôr než absolútну chybu určenia polohy ohniska to, ako presne dáta zo všetkých snímačov naraz vyhovujú najdenej polohe ohniska. Potvrzuje sa, že odhadované chyby sú nadhodnotené, zjavná je však úmera medzi minimom odhadu chyby lokalizácie „Ex“ a „skutočnou“ chybou lokalizácie „XM-XA“ najmä pre 7 snímačov, čo je pravdepodobne spôsobené menším počtom hrubých chýb.

Na nasledujúcom obrázku je histogram „Ex“ (Obr. 6. 18) vynesený pre dátový súbor „B“, z ktorého je opäť viditeľná výrazná podobnosť s dátovým súborom „A“.

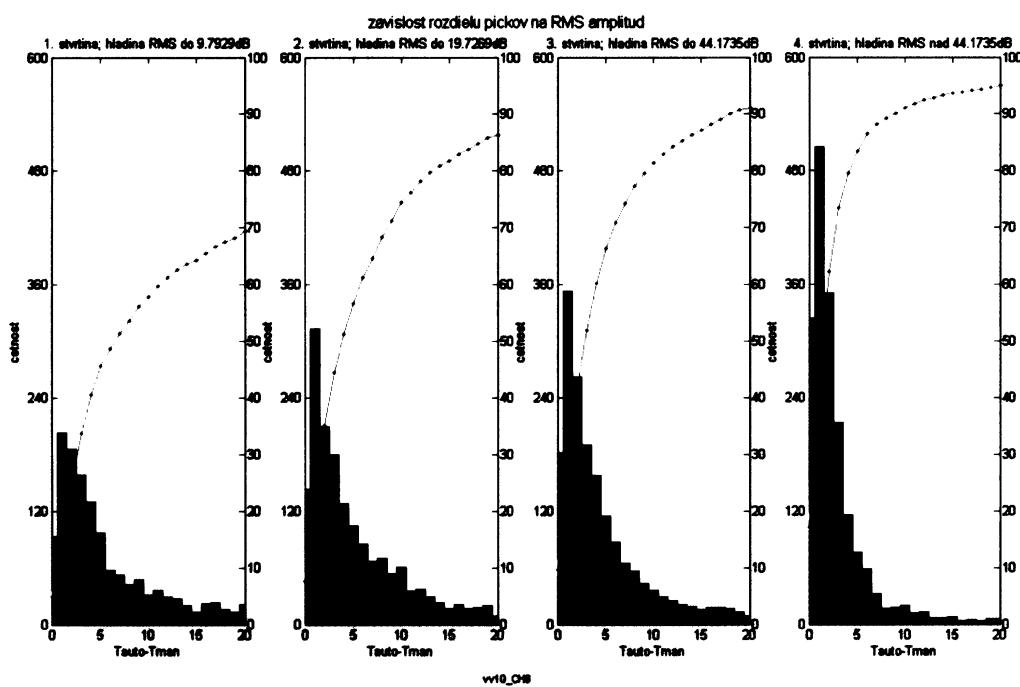


Obr. 6. 18 Histogram odhadu chyby lokalizácie (Ex) pre ohniská určené z PT a momentových nasadení; súbor „B“

**Tab. 6.3 Zhrnutie výsledkov kapitoly 6.2**

dátový súbor	veličina (typ dát)	hladina 1 [%]	hladina 2 [%]	úroveň 75%	dátový súbor	veličina (typ dát)	hladina 1 [%]	hladina 2 [%]	úroveň 75%
"A"	tM-tA	do 5 vzoriek	do 10 vzoriek	[vzorky]	"B"	tM-tA	do 5 vzoriek	do 10 vzoriek	[vzorky]
	vall/man	1,5	13,4	do 115		vall/man	X	X	X
	PT/man	63,1	76,3	do 10		PT/man	X	X	X
	mom/man	46,9	66,8	do 14		mom/man	X	X	X
	mom/PT	67,2	82,5	do 6		mom/PT	64,9	80,5	do 7
	R	do 100 vzoriek	X	[vzorky]		R	do 100 vzoriek	X	[vzorky]
	manual	83,3	X	do 84		manual	X	X	X
	vallen	8,9	X	do 594		vallen	8,7	X	do 590
	PT	74,4	X	do 106		PT	71,4	X	do 108
	moment	58,1	X	do 140		moment	57,7	X	do 146
	XM-XA	do 0,5 cm	do 1 cm	[cm]		XM-XA	do 0,5 cm	do 1 cm	[cm]
	PT/man	56,0	82,1	0,8		PT/man	X	X	X
	mom/man	53,7	79,8	0,9		mom/man	X	X	X
	mom/PT	62,4	78,4	0,9		mom/PT	61,6	77,3	0,9
	Ex	do 0,5 cm	do 1 cm	[cm]		Ex	do 0,5 cm	do 1 cm	[cm]
	man	3,2	29,8	do 2,1		man	X	X	X
	PT	1,3	22,1	do 2,9		PT	1,1	18,1	do 3,0
	mom	0,6	18,4	do 3,3		mom	0,7	15,4	do 3,5

Presnosť odčítaní určených nasadení je nepochybne závislá od sily signálu. Čím je signál silnejší, má väčšie amplitúdy, tým je nasadenie určené presnejšie. Túto závislosť som testoval oddeleným zobrazením distribúcie chýb časov pre rôzne amplitúdové hladiny (Obr. 6. 19).



**Obr. 6. 19 Presnosť nasadení určených manuálne a pickerom PT v závislosti od sily signálu; súbor „A“; jednotka na ose x [vzorky]. Grafy postupne zobrazujú distribúciu chýb odčítaní pre hladiny RMS amplitúd do 9,8 dB, do 19,7 dB, do 44,2 dB a nad 44,2 dB.**

Grafy na Obr. 6. 19 boli skonštruované na základe výpočtu RMS amplitúd 20 vzoriek za miestom určenia času príchodu signálu. Následne boli RMS usporiadane podľa veľkosti a rozdelené do štyroch rovnako veľkých skupín. Na prvom grafe zľava sú vynesené rozdiely nasadení 1. štvrtiny dát, na druhom z 2. štvrtiny dát, atď. Z kumulatívneho histogramu pritom vyplýva, že do hladiny 75 % spadá z 1. štvrtiny rozdiel nasadení do 29 vzoriek, z 2. štvrtiny rozdiel nasadení do 11 vzoriek, z 3. štvrtiny rozdiel nasadení do 8 vzoriek a z poslednej štvrtiny rozdiel do 4 vzoriek. Ako dostatočne správny považujem rozdiel okolo 10 vzoriek. Z toho dôvodu je pre určovanie ohnísk účinné používať len 75 % (2., 3. a 4. štvrtina) najsilnejších signálov.

## **7. DISKUSIA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV**

Dosiahnuté výsledky považujem za priateľné, avšak stále tu existuje možnosť ich vylepšenia. Ako už bolo spomínané v predchádzajúcom texte, presnosť výsledkov lokalizácie sa odvíja od presnosti vstupných dát (časov príchodov signálov) a chýb, ktoré sú do nich zavedené. Za najpresnejšie boli pritom považované nasadenia, ktoré boli určené manuálne operátorom. To sa potvrdilo tým, že lokalizácie javov s použitím manuálne určených časov mali najnižšiu sumu rezíduí (Obr. 6. 12). Jedným z výsledkov práce bolo vyhodnotenie dát z vytvoreného programu na automatické určovanie časov nasadení signálov, Pick\_tester. Tento program pracuje na princípe STA/LTA, pričom dĺžky okien sú nastavené fixne pre všetky analyzované dátá. Tu by som videl možnosť vylepšenia v tom, že by sa dĺžka okna STA mohla meniť dynamicky v závislosti od frekvenčného a amplitúdového obsahu aktuálneho signálu. Mohlo by tým dôjsť k zvýrazneniu pomeru STA/LTA a tým k zjednodušeniu procesu určovania času príchodu signálu, čo by následne viedlo k spresneniu a k celkovému skráteniu doby hľadania nasadení. Ďalším parametrom, ktorý výrazne ovplyvňuje presnosť určenia času príchodu je rýchlosť modelu analyzovanej horninovej vzorky. Na základe parametrov modelu a rozmerov vzorky sú počítané teoretické časové intervaly, v ktorých sú následne hľadané nasadenia signálu. V našom prípade, pri skúmaní anizotropných horninových vzoriek, bol použitý anizotropný rýchlosť model. V práci bol použitý model, ktorý bol určený pre jeden časový úsek experimentu. Počas zaťažovania sa však parametre rýchlosťného modelu môžu meniť (Petružálek, et al, 2007b). Výpočet teoretických časových intervalov bol preto korigovaný konštantou 1,2 (rovnica 5.1). Zavedenie aktuálneho rýchlosťného modelu by spresnilo určovanie teoretických časových intervalov, čo by v konečnom dôsledku mohlo viest' k lepšiemu určeniu času príchodu signálu.

Ďalším z výsledkov práce je porovnanie časov nasadení signálov získaných programom PT s manuálnymi a momentovými odčítaniami a s odčítaniami softwaru Vallen. Z výsledkov (Tab. 6. 3) vyplýva, že v porovnaní s manuálnymi odčítaniami dosahovali odčítania PT najlepšiu zhodu (Tab. 6. 3, Obr. 6. 10, 6. 12, 6. 14). Výsledky pickeru Vallen dosahujú dobré výsledky len pri spracovávaní dát UT. Dôvodom toho je pravdepodobne to, že signály UT majú oproti signájom AE oveľa väčšie amplitúdy a sú menej zašumené. Picker využívajúci vyššie štatistické momenty dosahuje pri lokalizácii javov AE veľmi podobné výsledky ako picker PT aj napriek tomu, že z hľadiska rozdielov učených časov nasadení voči manuálnym odčítaniam dosahuje

horšie výsledky. To zrcjme spôsobuje stavba algoritmu lokalizácie, ktorá je menej citlivá na hrubé chyby (kapitola 6.2). To, že odčítania momentového pickeru dosahujú v porovnaní s manuálnymi odčítaniami horšie výsledky ako picker PT, môže byť spôsobené tým, že momentový picker neuvážuje kritérium geometrie vzorky.

Nakoniec bol program Pick\_Tester otestovaný na „ostrom“ dátovom súbore „B“, podľa ktorého neboli tento program zstrojený a u ktorého neboli k dispozícii manuálne odčítania. Z porovnaní v Tab. 6. 3 a z grafov vynesených pre súbor „B“ je vidieť výrazná podobnosť výsledkov. Pretože súbory „A“ a „B“ boli vytvorené z dát nameraných v jednom experimente, mohla by byť podobnosť výsledkov spôsobená podobnosťou signálov v rámci jedného experimentu. Preto by bolo vhodné otestovať funkčnosť programu Pick\_tester na ďalšom dátovom súbore získanom z iného experimentu.

## **8. ZÁVER**

Cieľom práce bolo vytvoriť programové prostredie, v ktorom by bolo možné porovnať časy príchodov určené manuálne s časmi určenými softwarom Vallen a vytvoriť algoritmus k automatickému určovaniu časov príchodov. Programy AEview a Pick\_tester umožňujú načítať dátá vlnových obrazov ako aj ostatné parametrické dátá. AEview umožňuje hľadať miesta vzniku javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania na základe časov príchodov signálov. Tie môžu byť získané rôznymi spôsobmi. Spočiatku boli porovnávané časy získané programom Vallen s časmi určenými manuálne v programe AEview. To však bolo časovo príliš náročné, preto bol na modelovom súbore vytvorený program na automatické určovanie časov príchodov signálov Pick\_Tester. Pre potreby diplomovej práce bolo týmto programom vyhodnotených niekoľko súborov, z ktorých každý obsahoval okolo 900 - 1000 javov akustickej emisie alebo ultrazvukového prežarovania. Získané časy boli následne vyhodnotené a porovnané s časmi získanými manuálne a s časmi získanými programom využívajúcim vyššie štatistické momenty. Z výsledkov vyplýva, že použitie časov nasadení softwaru Vallen je vhodné len pri vyhodnocovaní dát ultrazvukového prežarovania, u ktorého sú získané dátá spoľahlivé na viac ako 95 %. Avšak pre javy akustickej emisie sú časy softwaru Vallen určované nepresne, a preto je z nich hľadanie ohnísk nevhodné.

V porovnaní s ostatnými automatickými programami použitými v tejto práci obstál teda program Pick\_tester, v zrovnaní s manuálnymi dátami, najlepšie. Na úrovni 75 % počtu spracovaných javov vykazujú výsledky programu Pick\_Tester najmenšie rozdiely manuálnych časov nasadení od automatických (do 10 vzoriek) a vzájomných polôh ohnísk z nich určených (do 8 mm). Taktiež odhady chyby lokalizácie a veľkosti rezídua lokalizácie sú najmenšie pre algoritmus Pick\_Tester. Tieto výsledky boli následne overené na novom („ostrom“) dátovom súbore, ktorý obsahoval 1007 javov AE. Ukázalo sa, že vytvorený algoritmus dáva dobré výsledky aj na dátach, podľa ktorých neboli vytvorený.

## 9. ZOZNAM PRÍLOH

### 9.1. PRÍLOHA 1: ALGORITMUS VÝPOČTU STA, LTA

```
function y=WinMean(x,flen,poc_usek,priradit_konci_okna)
if priradit_konci_okna
    posun=0;
else
    posun=flen;
end

xlen = length(x);
filt = ones(flen,1);                                % okno filtrovania (sta nebo lta)
y = [conv(filt,x(posun+1:xlen))/flen; 1];        % má dĺžku xlen+flen
y = [ones(poc_usek,1); y(poc_usek+1:xlen)];       % resetuje počiatok a ukračení na xlen
```

#### Popis premenných:

*x* – charakteristická funkcia;

*flen* – dĺžka okna;

*poc\_usek* – úsek diskrétnych vzoriek, ktorým nie je priradovaná hodnota STA, LTA<sup>6</sup>

*priradit\_konci\_okna* – 0 pre výpočet STA, 1 pre výpočet LTA

#### Volanie funkcie:

```
handles.LTA(:, i) = WinMean(handles.CF,lenL,lenL,1);
handles.STA(:, i) = WinMean(handles.CF,lenS,lenL,0);
handles.pomer(:, i)=handles.STA(:, i)./handles.LTA(:, i);
```

*i* = dĺžka cyklu (cyklus sa opakuje v závislosti na počte stôp jedného javu, t.j. 8-krát)

---

<sup>6</sup> Z obrázku 4.8 je vidieť, že hodnota STA, LTA je priradovaná bodu, ktorý predstavuje červená línia, t.j. keď dĺžka STA = 10 a dĺžka LTA = 100, je priemer STA v prípade A (B) počítaný pre body 91-100 (100-109) a priemer LTA pre body 1-100, hodnota ich pomeru je teda pripísaná 100. bodu. To znamená, že bodom 1-99 nie je priradená žiadna hodnota.

## 9.2. PRÍLOHA 2: ALGORITMUS URČOVANIA ČASU PRÍCHODU SIGNÁLU

```

    nastavenie novej hladiny
[ampl_Max_pomers Max_pomers]=max(handles.pomer);
[handles.TT handles.TS]=min(Max_pomers);
med_ampl_Max_pomers=median(ampl_Max_pomers);
handles.nova_hladina(handles.current_traces)=med_ampl_Max_pomers./100.*15;
if handles.nova_hladina(handles.current_traces)>min(ampl_Max_pomers)
    handles.nova_hladina(handles.current_traces)=min(ampl_Max_pomers);
elseif
handles.nova_hladina(handles.current_traces)<=str2double(get(handles.edit4,'String'))
    handles.nova_hladina(handles.current_traces)=str2double(get(handles.edit4,'String'));
end
if isfield(handles,'hladina_deriv')
    handles=rmfield(handles,'hladina_deriv');
end
handles.hladina_deriv(handles.current_traces)=max(handles.deriv./3);
pom_hl_deriv=max(handles.deriv./3);
for i=1:8
    handles.ii=i;

    handles=priebeh_signalu(handles);
    pom1=find(handles.sig_hore<handles.max_deriv(i,2));
    pom2=find(handles.sig_dole<handles.max_deriv(i,2));
    for j=1:length(pom1)
        [ampl_Lmax_deriv(j)
Lmax_deriv(j)]=max(handles.deriv(handles.sig_hore(j):handles.sig_dole(j),i));
        [ampl_Lmax_deriv(j)]
Lmax_deriv(j)=max(handles.pomer(handles.sig_hore(j):handles.sig_dole(j,i)));
        Lmax_deriv(j)=Lmax_deriv(j)+handles.sig_hore(j)-1;
    end
    pom3=find(ampl_Lmax_deriv>=ampl_Lmax_deriv(end)/100*50);
    urcenie miesta picku
    if length(pom3)>1 && handles.pomer(Lmax_deriv(pom3(end-1),i))>=handles.nova_hladina(handles.current_traces(i)) &&
Lmax_deriv(pom3(end))-Lmax_deriv(pom3(end-1))<100
        handles.picks(handles.current_traces(i))=Lmax_deriv(pom3(end-1));
    elseif length(pom3)==1
        handles.picks(handles.current_traces(i))=Lmax_deriv(pom3(end));
    else
        handles.picks(handles.current_traces(i))=handles.max_deriv(i,2);
    end
    clear('Lmax_deriv','ampl_Lmax_deriv')
end

if isfield(handles,'hladina_deriv')
    handles=rmfield(handles,'hladina_deriv');
end
-----
if isfield(handles,'teor_vzorky')

```

```

    handles=rmfield(handles,'teor_vzorky');
end
for i=1:8
    handles.ii=i;
    handles=priebeh_signalu(handles);
    handles=posun_picku(handles);
end

[handles.m handles.mm]=min(handles.picks(handles.current_traces));
handles=urcenie_kinematiky(handles);
handles=max_deriv_v_kinematike(handles);

pom1=find(handles.picks(handles.current_traces)>handles.teor_vzorky);
for j=pom1
    [pom6(j)]
pom7(j)=max(handles.deriv(min(handles.teor_vzorky):handles.teor_vzorky(j),j));
;

handles.picks(handles.current_traces(j))=pom7(j)+min(handles.teor_vzorky)-1;
end

for j=1:8
    %vymena pomeru STA/LTA v mieste picku
    handles.ampl_pomer_pick(handles.current_traces(j))=handles.pomer(handles.picks(handles.current_traces(j))),j);

    %vypočet RMS amplitudy v intervale 20 vzoriek po picku
    RMS_interv=[handles.picks(handles.current_traces)
handles.picks(handles.current_traces)+19];
    ampl_RMS_interv(:,j)=(signaly(RMS_interv(j,1):RMS_interv(j,2),j));
    ampl_RMS_interv_2(:,j)=ampl_RMS_interv(:,j).^2;
    M(j)=mean(ampl_RMS_interv_2(:,j));
    handles.RMS(handles.current_traces(j))=M(j)^0.5;
end

```

## **10. POUŽITÁ LITERATÚRA:**

- Allen, R. (1982): Automatic phase pickers: their present use and future prospects. Bull. Seism. Soc. Am., 72, 225 – 242.
- Baer, M., Kradolfer, U. (1987): An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1437 – 1445.
- Chen, Z. (2005): A multi-window algorithm for automatic picking of microseismic events on 3 - C data. SEG Expanded Abstracts, PSC P1 PASSIVE SEISMIC ALGORITHMS AND ANALYSIS, 24, 1288 - 1291.
- Fischer, T. (1997): SEISBASE – Principles of a program and database for routine analysis of data from local seismic networks, version 4.7. ACTA MONTANA IRSM AS CR, Series A, No. 11, 15 – 34.
- Fischer, T. (2003): Automatic location of swarm earthquakes from local network data. Stud. Geophys. Geod., 47, 83 – 98.
- Fischer, T., Boušková, A., Eisner, L., Calves, J. (2007): Automated P – and S – wave picking of microearthquakes recorded by a vertical array. EAGE 69<sup>th</sup> Conference&Exhibition – London, UK, 11 – 14 June, 2007.
- Lockner, D. (1993): The role of acoustic emission in the study of rock fracture. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., 30, 883 – 899.
- Lokajíček, T., Klíma, K. (2006): A first arrival identification system of acoustic emission (AE) signals by means of a high – order statistic approach. Meas. Sci. Technol., 17, 2461 – 2466.
- MATLAB Inc.: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/>.
- Petružálek, M., Lokajíček, T., Rudajev, V., Vilhelm, J. (2007a): Vliv vzájemné orientace struktury migmatitu a směru jednoosého namáhání na parametry ultrazvukového prozařování. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební. roč. 7, č. 2, s. 253-261 : il, <http://hdl.handle.net/10084/64538>.
- Petružálek, M., Vilhelm, J., Lokajíček, T., Rudajev, V. (2007b): Assessment of P – wave anisotropy by means of velocity ellipsoid. Acta Geodyn. Geomater., 4, 23 – 31.

Petružálek. M., Lokajíček, T., Rudajev, V., Vilhelm, J. (2008, v tlači): Lokalizace jevů akustické emise v anizotropním prostředí. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební. roč 8

Pros, Z., Lokajíček, T. and Klíma, K. (1998): Laboratory study of elastic anisotropy on rock samples. Pure and Applied Geophysic, 151, 619 – 629.

Vallen Systeme GmbH, The acoustic emission company: AE: Fundamentals – Equipment – Data Analysis. <http://www.vallen.de>, sea204E, 1 – 7.

Neverka, J. (2000): Změny polohy seismoakustických zdrojů v závislosti na rychlosti zatěžování granitových vzorků. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Diplomová práce.

Neverka, J. (2003): Časoprostorová analýza ultrazvukové emise vznikající při zatěžování hornin. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Dizertační práce.

Vilhelm, J. (2003): Hodnocení stability porušování hornin pomocí analýzy statistických a korelačních parametrů ultrazvukové emise. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Habilitační práce.

Vilhelm, J. (2005): Maticová realizace algoritmu lokalizace ohnisek porušování v zatěžovaných vzorcích hornin. Sborník 13. Mezinárodní konference Technical Computing Prague 2005, 15.11.2005, Praha, CD ROM, 3 s.

Vilhelm, J., Rudajev, V., Lokajíček, T., Veveka, J. (2006): Correlation analysis of the ultrasonic emission from loaded rock samples – the study of interaction of microcracking nucleation centres. Rock Mech. Rock Engng., 1 – 20.