Ing. Ferdinand V o n d r á č e k, VÚHU
Stanislav Š e f l e r

Využití ultrazvuku při stanovení fyzikálně mechanických vlastností zemin

V současné době rozvoje vědeckotechnické revoluce se stále více prosazují při stanovení fyzikálních, chemických a mineralogických parametrů hornin nové metody zkoušení vzorků bez porušení tzv. nedestruktivní metody zkoušení. Mechanické vlastnosti se zjišťují jednak laboratorně, jednak v terénu a to zpravidla dle příslušných norem a předpisů, které jsou přijaty ve stavu více či méně rozpracovaném. Klasická zkoušení, která jsou stále užívána v převládající míře se vyznačují tím, že ke stanovení uvedených vlastností vzorku je potřeba provést větší počet měření, zvláště při získání průměrných hodnot, přičemž každý vzorek je možno použít jen pro jeden experiment.

V posledních letech byly vyvinuty nové metody zkoušení vzorků, z nichž se velmi rychle rozšiřuje metoda akustická - ultrazvuková, založená na vzájemném vztahu a závislosti mezi akustickými a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi tuhých látek. Tyto zkoušky mají oproti klasickým metodám značné výhody:

- měření vzorku je možno provést vícekrát, což umožňuje též sledování změn v čase
- zkoušky trvají poměrně krátkou dobu a jsou levnější
- metody a použitou aparaturu lze využít při měření v terénu
- umožňují zjistit, zda se ve vzorku nachází plochy porušení, pukliny, dutiny a podobně.

Dále umožňují získání údajů o homogenitě a izotropii nedestruktivní cestou.

Někteří autoři navrhují rozdělení nedestruktivních zkoušek do skupin v následující tabulce.

Využití akustických metod, jak je možno vidět v uvedené tabulce je zastoupeno u většiny prováděných rozborů. Základ těchto metod spočívá ve využití přerušovaných vysílání ultrazvukových vibrací (16 kHz a více) a jejich přijímání poté, kdy prošly hmotou zkušebního tělesa. Ul-

Předmět zkoušky	Kategorie	Metoda	Postup
Pevnostní parametry (mechanická pevnost)	akustické	impulsní	ultrazvuk (signál akustický složený)
	mechanické	vtlačovací	kuličkový jehlanový
		odrazová	sklerometr
Modul pružnosti Modul stlačitelnosti Poissonova konstanta	akustické	impulsní	ultrazvuk
		vlastní vibrace	netlumené kmity, vibrace
			vibrace vyvolané rázem
Hustota	atomové	absorpční	záření
Vlhkost	atomové	reakční	neutrony
	elektrické	el.vodivost	dielektrická konstanta
			elektrická vodivost
Defektoskopie	akustické	impulsní	ultrazvuk
	atomové	absorpční	záření

trazvuk se ve hmotě šíří určitou rychlostí, která je přímo úměrná délce vlny λ a nepřímo úměrná době kmitu T.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda . f$$

kde f znamená kmitočet vlnění.

Podle směru, kterým se pohybují vibrující částice ve hmotě tělesa vzhledem ke směru šíření zvukových vln v tuhých látkách lze rozlišit několik typů vlnění, a to:

- vlny podélné, u nichž směr pohybu částic je shodný se směrem šíření vlny (tyto vlny se šíří v trojrozměrných prostorech a vyvolávají tlakové a tahové síly a deformace). Jejich rychlost je dána vztahem

$$v_L = \sqrt{\frac{E\,(1-\mu)}{\rho\,(1+\mu)\,(1-2\mu)}}$$

kde E je dynamický modul pružnosti, μ - Poissonova konstanta a ρ je objemová hustota

- vlny dilatační neboli kvasi-longitudinální, jsou to vlny podobné podélným s tím rozdílem, že pohybová složka částic je kolmá vzhledem k šíření vlny. Šíří se pouze u tyčových tvarů, kde délka vlny je větší než průměr tyče a jejich rychlost je dána velikostí

$$v_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- vlny příčné, mají směr pohybu částic kolmý na směr šíření vlny. Tyto vlny odpovídají smykovým deformacím v materiálu a jejich rychlost je dána vztahem

$$v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

kde G je dynamický modul pružnosti ve smyku

- vlny povrchové neboli Rayleighovy jsou podobné vlnám, jež se tvoří na hladině vody po dopadu tělesa. Jejich rychlost je ze všech uvedených nejnižší a je dána vztahem

$$v_r = \frac{0,87 + 1,12\,\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Prakticky nedestruktivní zkoušky materiálu, konané impulsní metodou, spočívají v měření doby průchodu (šíření) vln podélných a příčných hmotou vzorku nebo horninového masivu (viz obr. 1). V prostředí homogenním se podélná rychlost v_L obyčejně určuje odrazovou metodou nebo metodou průchozí, šíření příčných vln je nutno vyvolat pomocí soupravy prismatických vysílačů a přijímačů, schopných vysílat vlny pod určitým úhlem. V prostředí heterogenním, vzhledem k nemožnosti úplného oddělení vlnění příčného od podélného, se rychlost šíření příčných vln stanoví pouze pomocí metody průchozí.

Při stanovení rychlosti šíření ultrazvuku u vzorku válcovitého tvaru se stanoví, resp. měří, doba šíření ultrazvuku v jediné ose, u vzorků hranolovitých a krychlových ve třech osách. Při zkoušení vzorků uhlí a jiných vrstevnatých hornin je možno zjistit diference mezi rych-

lostí ve směru rovnoběžném se směrem uložení a kolmým na směr uložení. Dále je nutné uvést, že se taktéž zdůrazňuje vliv vlhkosti na rychlost šíření ultrazvuku. Na příklad ve vápencích a jílech se stoupající vlhkostí rychlost klesá a naopak u štěrku a písku je tento jev obrácený. Analýzou tohoto jevu je možno uvést některé další údaje. Podélná rychlost ultrazvuku ve vzduchu při 0 °C je 331 m/s, při teplotě +10 °C již 337 m/s, ve vodě +8 °C teplé je rychlost šíření ultrazvuku 1435 m/s, zatímco při teplotě -4 °C vzroste už na 3900 m/s. Je možno též uvést, že rychlost šíření ultrazvuku je vyšší u hornin basických (zásaditých) než u kyselých a že jsou nižší u hornin sedimentárních, než u hornin metamorfovaných a magmatických.

V další části lze uvést některé konkrétní případy využití vypracovaných měřících metod pro hodnocení kvality a dobyvatelnosti nerostných surovin v masivu seismickou a ultrazvukovou metodou. Litologii masivu je možno určit podélným povrchovým profilováním, např. sériově vyráběnou aparaturou OSU-I, pracující na frekvenčním rozsahu 1 kHz při bázi prozáření 30 - 50 m. Tato metoda se používá pouze pro orientační získání údajů o úložních poměrech. Pro správnou interpretaci hodochron lomených vln a navázání geologického obrazu ložiska se používá údajů ultrazvukové karotáže a údajů ultrazvukového prozařování mezi vrty (viz obr. 2). Při tomto prozařování jsou získány údaje o obsahu různých hmot na základě dynamických parametrů elastických vln. Detailní průzkum je možno zajišťovat při bázi měření 3 - 5 m.

Samostatnou oblastí provozních geologických měření je kontrola kvality hornin určených ke zpracování, např. přírodního kamene. Hodnocení kvality předpokládá zjištění defektů a to puklin a cizích uzavřenin, proto se tato kontrola provádí ve dvou fázích. Nejdříve se určují fyzikální vlastnosti horniny, například ultrazvukem, potom se pomocí korelačních závislostí "rychlost - pevnost" aj. převádějí tyto vlastnosti na pevnostní a technologické ukazatele. Jako další fáze je pak užito ultrazvukového defektoskopu k určení puklin v bloku, jejich směr, velikost a místo a na základě těchto údajů se stanovuje jakost bloků a určuje schéma řezání.

Provozní geologická měření tak umožňují komplexní řešení problému a zlepšení kvality nerudných stavebních materiálů.

Dalším způsobem, jak je možno využít ultrazvuku je předběžné stanovení kategorie rozpojitelnosti hornin. V současné době je zatřídění rozpojitelnosti hornin dáno normou ČSN 73 3050 "Zemní práce". Pro zkvalitnění předběžných informací o rozpojitelnosti hornin je možno použít publikovaných podkladů firmy Caterpillar, která vydává tabulky pro různé typy rozrývačů (viz obr. 3). Porovnáním výsledků seismického měření, prováděného střediskem Geofyziky Brno na budoucím dálničním spoji, bylo konstatováno, že metodikou ultrazvukového měření je možno předem stanovit v hloubkách kolem 15 m stupeň rozpojitelnosti a dále pak určit, jakou část horniny je třeba rozpojit trhací prací. Pro sledovaný účel je využíváno seismického měření a měření el. odporu hornin a na základě takto zjištěných výsledků je sestrojen graf třídy rozpojitelnosti. Obě tato měření jsou závislá na řadě společných faktorů, i když některé z nich mají v obou metodách měření různou váhu. Práce, které byly provedeny ve vztahu k rozpojitelnosti hornin jsou prozatím první tohoto druhu, a proto není možné dělat všeobecné závěry, i když má své technické opodstatnění.

V některých případech je třeba určit modul přetvárnosti v zónách probíhajících zlomů, kterými prochází různá důlní díla (chodby, tunely apod.). Pro získání potřebných údajů se určí v boční stěně štoly stanoviště pro ultrazvuková měření. Toto stanoviště je připraveno pro měření metodou prozařování mezi dvěma vrty a to jak v poloze horizontální, tak i v poloze vertikální. Kromě toho je možno též provádět měření ve směru osy vrtu metodou karotáže. Provedeným měřením lze získat hodnoty podélných a příčných rychlostí šíření vln a na tomto základě posoudit míru elastické anisotropie. Hloubky vrtů bývají kolem 2 m, k měření se používá ultrazvukové aparatury s vysílací frekvencí 65 kHz a snímací do 1 MHz. Hodnoty dynamického modulu pružnosti v délce měřeného úseku jsou pak vzaty jako průměr ze všech tří proměřovaných směrů a výsledný průběh je pak patrný z obr. 4.

Některé práce, které jsou prováděny v našem ústavu použitím betonoskopu typu BI-SR polské výroby, se týkají stanovení rychlostních parametrů vzorků zemin na povrchových dolech v SHR a HDBS. Je třeba uvést, že problematikou stanovení fyzikálně mechanických vlastností zemin pomocí ultrazvuku se v současné době zabývá u nás velmi malý počet

pracovišť. Práce, které jsou u nás prováděny se zaměřují na získání podkladů jednak pro účely stanovení rypných odporů zemin, případně hornin, a jednak slouží jako základní materiál pro řešení metodiky seismického měření. Pro přehled je možno uvést některé typy zemin z lokalit SHR a HDBS, které byly podrobeny různým zkouškám. Rychlostní parametry podélné vlny jsou určeny jednak ve směru vrstevnatosti, a jednak kolmo na vrstevnatost.

Vzorek	Makroskopické označení zeminy	Měrná hmotnost g/cm³	Vlhkost v % sušiny	Vlhkost v % objemu	c MPa	φ^o	Podélná rychlost $v_L \perp$	$v_L \parallel$
HDBS - 25.únor č. vz. 456	jílovec světle šedý jemně písčitý	1,88	28,5	41,6	0,4	23	1583	1820
HDBS - 25.únor č.vz. 457	jílovec světle šedý slabě siderický	2,02	19,1	32,5	1,0	15	1716	2000
HDBS - 25.únor č. vz. 464	jílovec zelenošedý	2,01	23,2	37,8	0,3	17	1313	1565
HDBS - 25.únor č. vz. 461	jílovec zelenošedý jemně písčitý	1,92	24,0	37,2	0,8	23	1785	2000
SHR - Šverma č. vz. 593 4. řez	jílovec šedohnědý (měrný el. odpor 8,76 Ω m)	1,99	25,5	40,5	0,2	21	1520	1720
SHR - Šverma č. vz. 596 4. řez	jílovec hnědošedý (měrný el. odpor 9,47 Ω m)	1,97	25,5	40,0	0,35	24	1680	1790

V některých dalších zkouškách zemin pomocí ultrazvuku byly zkoumány také rychlostní parametry šíření povrchových vln. Vzorky zeminy byly o rozměru 350 x 150 x 80 mm. Výsledky měření jsou zpracovány do

diagramu závislosti času průchodu podélné a povrchové vlny a na délce průchozí dráhy. Hodochrona podélné a povrchové vlny je uvedena na obr. 5. Metodika měření je prováděna dle obr. 1, tzv. metodou profilování.

Z některých měření je možno provést závěry k anisotropii hornin, respektive zemin. Zkoumání anisotropie se vyjadřuje koeficientem anisotropie, který je dán z různých funkčních vztahů dvou veličin, získaných měřením ve dvou základních směrech, tj. kolmém a rovnoběžném s viditelným usměrněním (například vrstevnatost, laminace a podobně). Tyto dva směry zpravidla souhlasí s hlavními směry anisotropie. Ukázka dílčího výsledku anisotropie podélných rychlostí ultrazvukem v zemině je na obr. 6. K tomuto je třeba konstatovat, že prováděné výzkumy v tomto směru mohou významně přispět k řešení řady problémů, které souvisí s otázkami zkoumání podmínek genese, struktury, stavby a vlastností hornin a zemin.

Závěrem lze říci, že v současné době dochází ke stále většímu využívání ultrazvukových metod zvláště v geofyzice a ve stavebnictví. Mnozí uživatelé, kteří si ověřili možnosti a účelnost ultrazvukových měření ať v karotáži - to je měření ve vrtech, nebo při měření na povrchu či laboratoři, oceňují tuto metodu nejen z hlediska množství a jednoznačných informací, ale i v jednoduchosti, rychlosti a malých finančních nákladů. Pokud se týká využití ultrazvukových metod v ČSSR, pak u nás nenajdeme pracoviště, které by se zabývalo komplexním vývojem a výrobou zařízení pro ultrazvukové měření. V současné době se touto problematikou zabývají v největší míře pouze pracoviště v SSSR a NDR.

V oblasti hlubinné karotáže je v ČSSR využívána aparatura NDR - - USBA 21T, aparatura HUKA 1, v oblasti inženýrské geologie a geofyziky, pro účely měření v mělkých vrtech a na povrchu jsou známy aparatury NIM s přídavným členem a dále funkční vzory víceúčelové aparatury MUKA 1, MUKA 2 národního podniku Geofyzika Brno - výzkum. V oblasti karotáže jsou zatím používané aparatury s výstupem analogovým. Digitalisované aparatury nejsou v běžném užívání, což znesnadňuje využití samočinných počítačů pro operační interpretaci.

Je proto potřebné, aby byla provedena koordinace všeho výzkumného úsilí na co možná nejširší bázi, aby výzkumné práce nebyly prováděny

v izolované úzké oblasti, aby bylo možno dosáhnout řešení základních přístrojů a zařízení a možnost jejich využití v co nejširším měřítku. Z tohoto důvodu je snahou dosáhnout ve výzkumu přístrojů napojení na koordinační komisi RVHP I - 16.3 "Vývoj geofyzikálních přístrojů" a vytvořit samostatnou skupinu k tomuto tématu pod názvem "Vývoj komplexu přístrojů pro důlní geofyziku" I - 16.3.7. V současné době se těchto prací účastní již ústavy v SSSR, PLR, NDR a ČSSR.

S h r n u t í

Využití ultrazvuku při stanovení fyzikálně mechanických vlastností zemin

V uvedeném článku jsou podány základní informace o ultrazvuku v měřících metodách. Je zde poukázáno na účelnost využívání nedestruktivních metod zkoušení vzorků zemin a hornin a na rozličnost zkoumaných oblastí. V závěru příspěvku se pokládá za nutné řešit vývoj ultrazvukových zkoušek a patřičných přístrojů v rámci RVHP.

Р е з ю м е

Применение ультразвука при определении физико-механических характеристик грунта

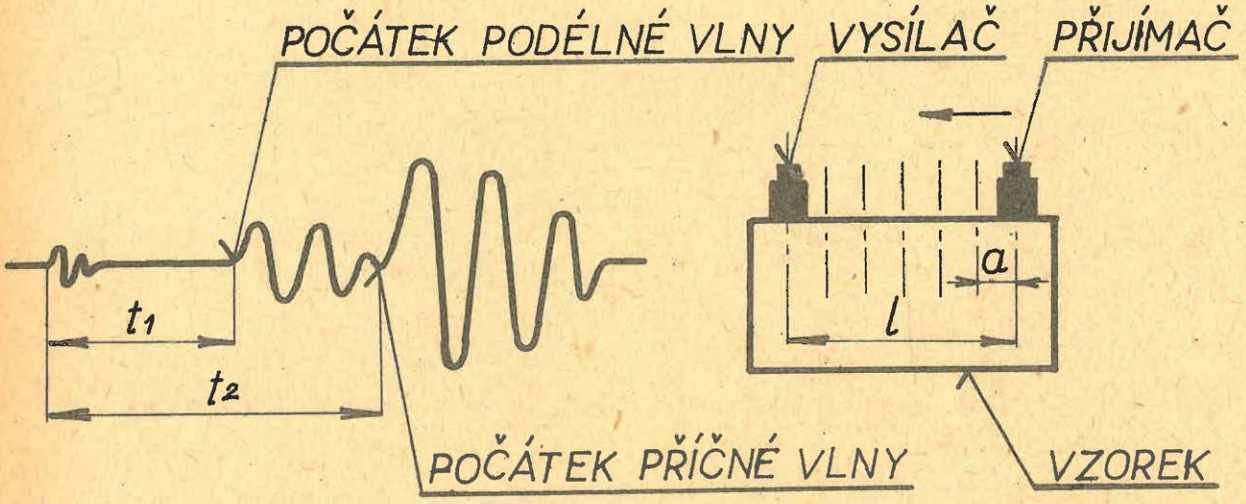
Статья дает основную информацию о применении ультразвуковой методы определения физико-механических характеристик грунта. Подчеркивается целесообразность проведения недеструктивных методов опробования гринтов и пород и их употребляемость в самых разнообразных областях. В заключении выражается мнение о целесообразности разработку методики ультразвуковых испытаний и развития соответствующих приборов в рамках СЭВ.

Z u s a m m e n f a s s u n g

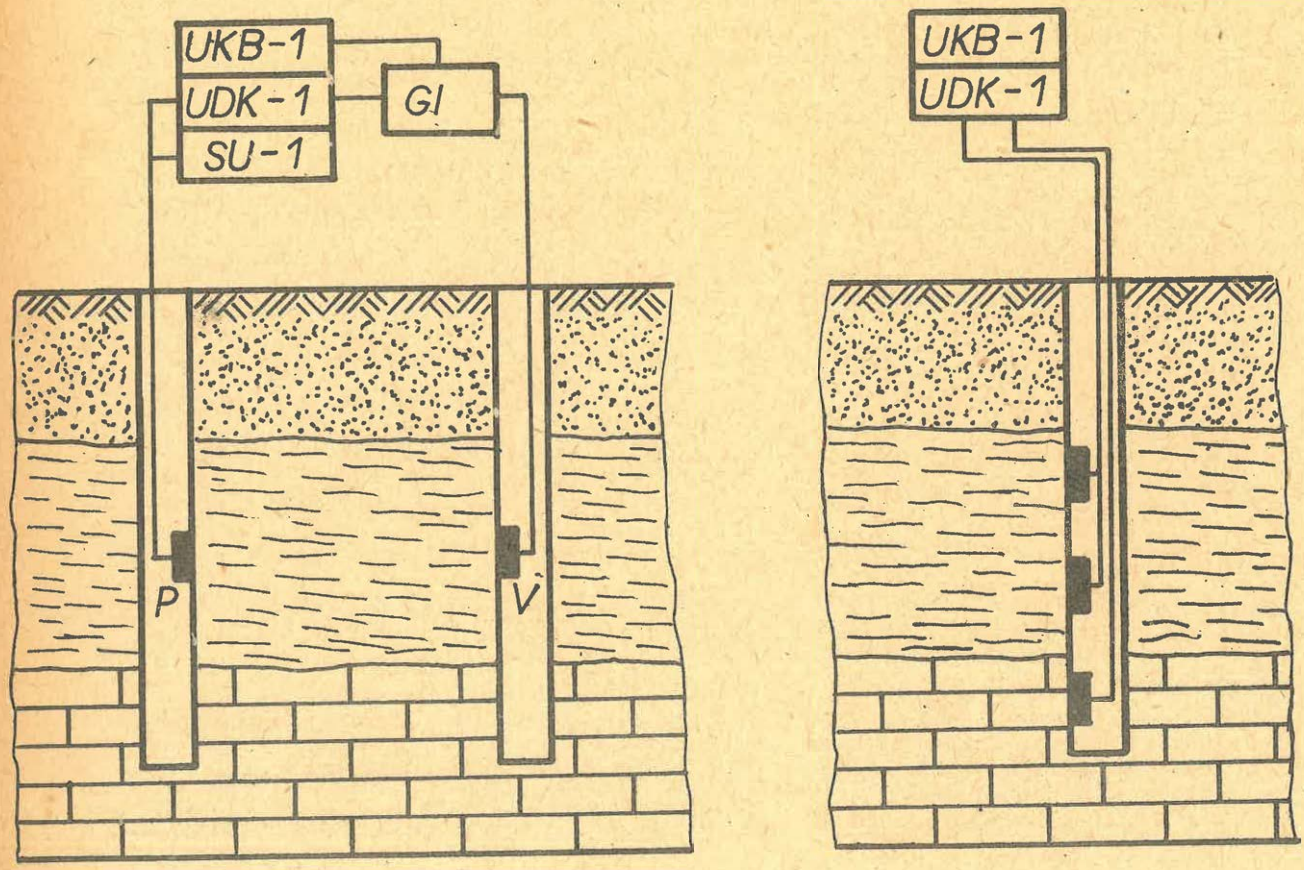
Ultraschallanwendung bei der Bestimmung physikalisch-mechanischer Bodeneigenschaften

Der Artikel bringt Grundinformationen über den bei Messmethoden angewendeten Ultraschall. Es wird hier auf die Zweckmässigkeit der Ausnützung von nichtdestruktiven Methoden bei den Boden- und Gesteinspro-

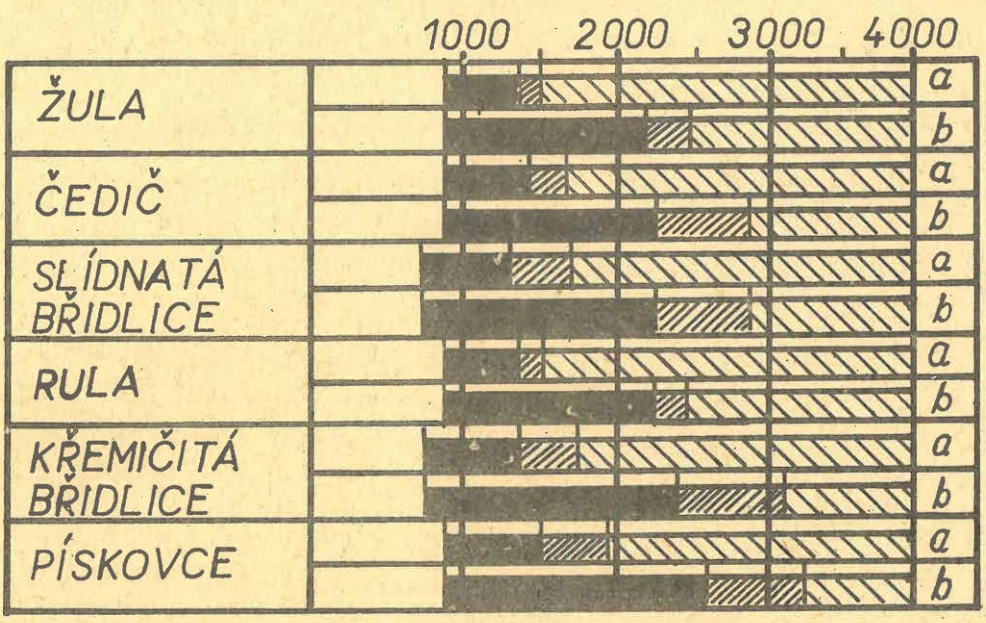
ben und auf die Verschiedenheit der untersuchten Gebiete hingewiesen. Der Verfasser ist der Meinung, dass die Entwicklung der Ultraschallproben und der entsprechenden Maschinen im Rahmen des RGW zu lösen sei.



Obr. 1



Obr. 2



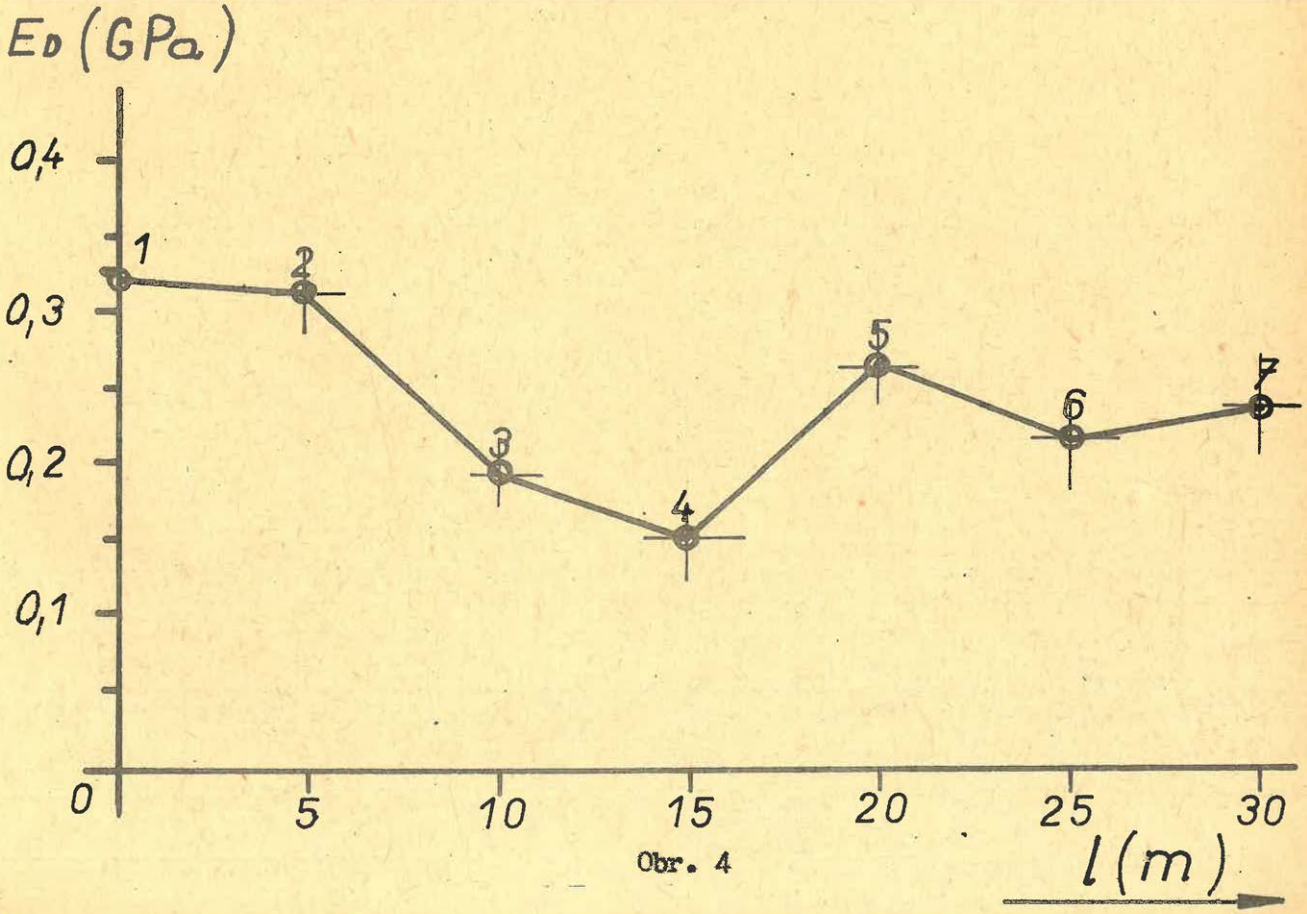
Obr. 3

LEGENDA:

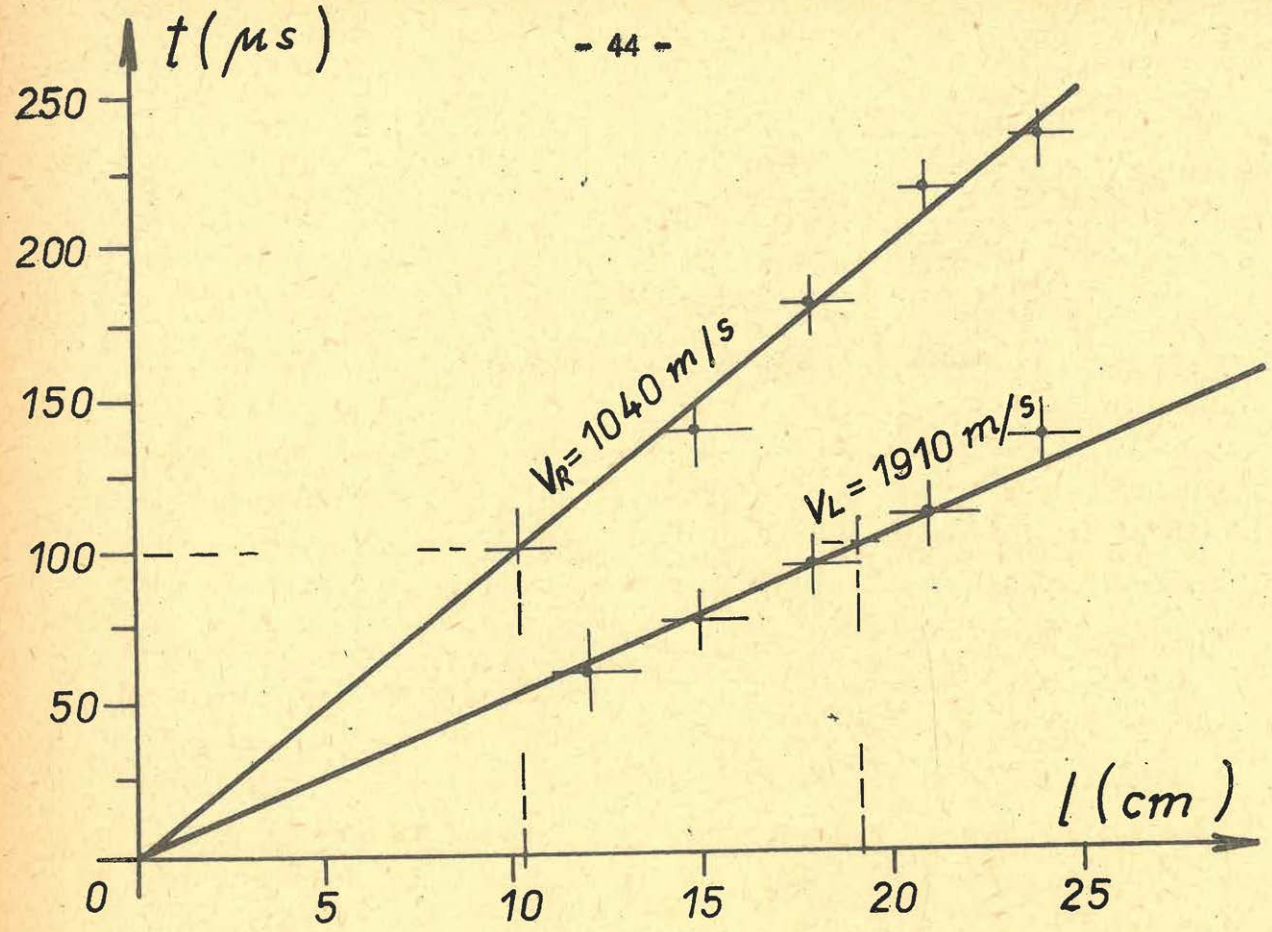
- HORNINA STROJNĚ DOBŘE ROZPOJITELNÁ
- HORNINA STROJNĚ TĚŽCE ROZPOJITELNÁ
- HORNINA STROJNĚ NEROZPOJITELNÁ

a – ROZRÝVAČ TYPU 7B

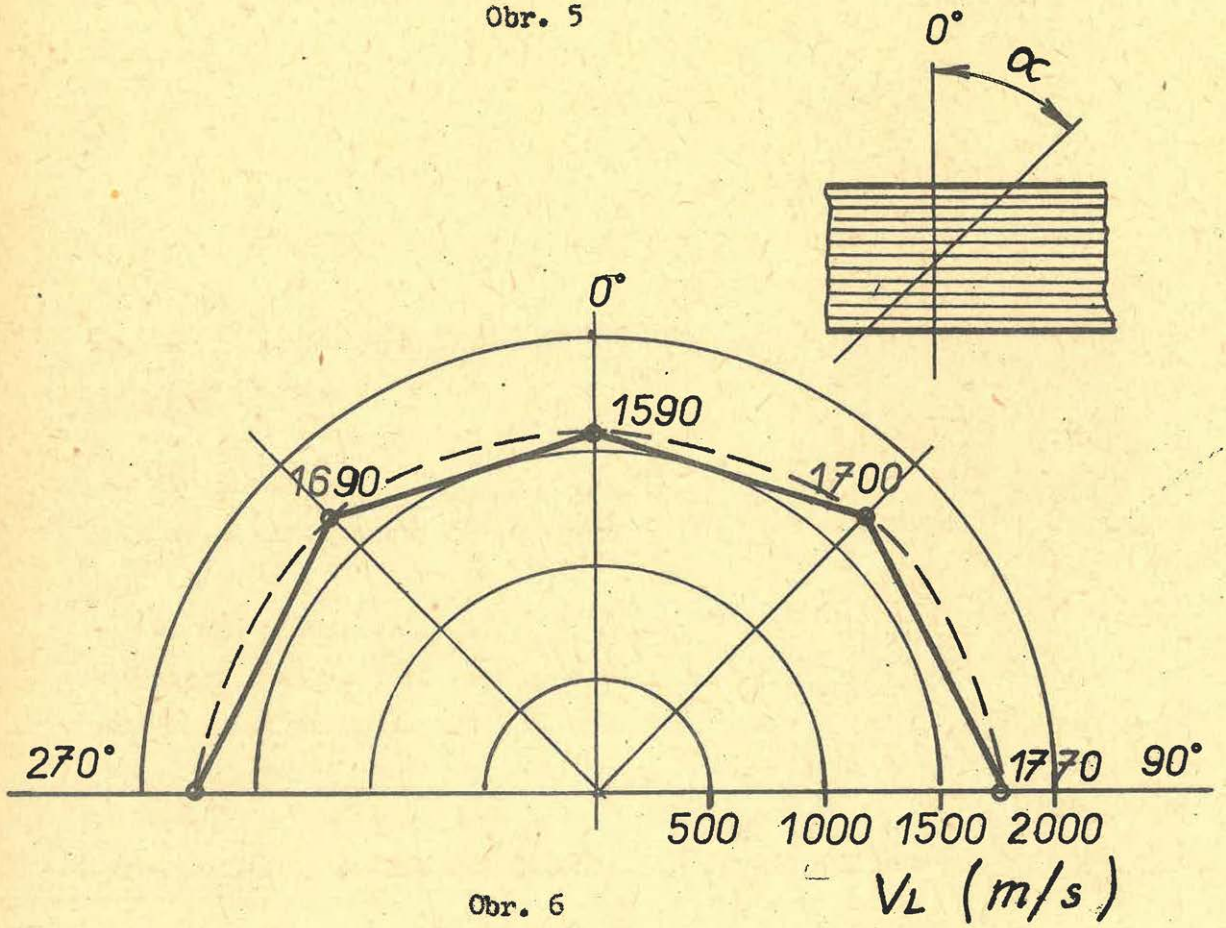
b – ROZRÝVAČ TYPU 9B



Obr. 4


t (μs)
250
200
150
100
50
0
5
10
15
20
25
l (cm)
V_R = 1040 m/s
V_L = 1910 m/s

Obr. 5


0°
α
0°
1590
1690
1700
270°
1770
90°
500
1000
1500
2000
V_L (m/s)

Obr. 6