TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Studijní program: B3107 - Textil

Obor: Textilní materiály a zkušebnictví

Zaměření: Materiálové inženýrství

Zpracování krátkovlákenného čediče v kompozitních materiálech

Processing of shortfibres basalt in composite materials

Jan Horáček

557

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslava Maršálková, PhD. - TU v Liberci

Konzultant bakalářské práce: Ing. Vladimír Kovačič - TU v Liberci

Rozsah práce a příloh :

Počet stran:	59
Počet obrázků:	64
Počet tabulek:	15
Počet příloh:	přílohy jsou pro jejich obsáhlost umístěny na CD, přiloženém k BP.

Oficiální zadání

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra textilních materiálu

ANOTACE

Předložená bakalářská práce v teoretické části obecně charakterizuje kompozitní materiály, podrobněji popisuje výztuž kompozitních materiálů v podobě čedičových vláken.

V experimentální části se zabývá přípravou vzorků kompozitů s výztuží z krátkovlákenného čediče v kombinaci s tkanou výztuží z čedičových vláken a vyhodnocováním těchto kompozitních vzorků. Experimentální část zahrnuje i testování vyrobených kompozitů.

Byly provedeny tyto zkoušky: 3 point bending test pomocí DMA, Charpy tes a Falling test. Vyhodnocením měření 3 point bending (ztrátový úhel a komplexní modul pružnosti), byla popsána frekvenční závislost pro jednotlivé vzorky.

Bachelor thesis in theoretical part describes composite materials, describes in detail the reinforcement of composite materials in the form of basalt fibers.

The experimental section deals with the preparation of composites reinforced samples with shortfiber basalt only and in combination with the basalt fabric reinforcement and evaluation of these composite samples. The experimental part includes the testing of composites produced.

These tests were performed: 3 point bending test (executed on the DMA), Charpy test and Falling test. Evaluation measurement 3 point bending (loss angle and complex modulus), was described for the frequency dependence of individual samples.

Klíčová slova: kompozitní materiály, čedičová vlákna, dynamicko - mechanická analýza

Key Words: composite materials, basalt fibre, dynamic-mechanical analyse

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat lidem, kteří se podíleli na vypracování mé bakalářské práce.

Děkuji slečně Ing. Miroslavě Maršálkové, PhD. a Ing. Vladimíru Kovačičovi za jejich odborné vedení, členům katedry textilních materiálů za jejich cenné připomínky, rady a pomoc, a všem dalším, kteří mi byli při mé bakalářské práci jakkoliv nápomocni.

Děkuji slečně Ing. Miroslavě Maršálkové za pomoc při výrobě vzorků a lidem, kteří mi pomáhali při experimentální části.

Svým rodičům, přátelům a blízkým děkuji za podporu a pochopení, jenž mi poskytovali během celého studia a především tento rok.

Prohlášení k využívání výsledků BP:

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o využití mé bakalářské práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.)

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: V Liberci, dne 14. května 2010

Podpis: .....

Obsah

1. ÚVOD **8**
2. TEORETICKÁ ČÁST **9**
2.1 Kompozitní materiály 9
2.1.1 Rozdělení vlákenných výztuží 10
2.1.2 Vlastnosti vláken 10
2.1.3 Produkty z vláken 11
2.2 Čedičová vlákna 12
2.2.1 Chemické složení čediče 12
2.2.2 Zpracování čediče 13
2.2.3 Vlastnosti čedičových vláken 16
2.2.4 Použití čedičových vláken 18
2.2.5 Bezpečnost při zpracování a manipulaci s čedičem 21
2.3 Lukosil M 130 22
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST **23**
3.1 Příprava vzorků 23
3.2 Vyhodnocení kompozitních materiálů 25
3.2.1 3 - Point bending na dynamicko - mechanické analýze 26
3.2.2 Charpy test 31
3.2.3 Falling test 33
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ **36**
4.1.1 3 Point bending na dynamicko – mechanické analýze 36
4.1.2 Charpy test 48
4.1.3 Falling test 51
5. ZÁVĚR **55**
6. POUŽITÁ LITERATURA **57**
7. SEZNAM PŘÍLOH **59**

Seznam použitých zkratek a symbolů

b	šířka vzorku [mm]
d	průměr vlákna [μm]
D	průměr smyčky příze [mm]
D_i	duktility index [-]
E^*	komplexní modul E [MPa]
E'	reálná část modulu E [MPa]
E''	imaginární část modul E [MPa]
F	zatěžující síla [N]
h	tloušťka vzorku [mm]
k	počet elementárních vláken v pramenci $*10^3$
t	čas [s]
l	upínací délka vzorku [mm]
α	energie při nárazu na kompozit [kJ/mm^2]
δ	ztrátový úhel [°]
$\tan \delta$	ztrátový činitel [-]
ρ	hustota vláken [kg/m^3]

1 ÚVOD

Kompozitní materiály se postupně stávají základem celého spektra výrobků, kdy nahrazují drahé a těžce dosažitelné produkty.

S růstem nároků na nové textilní technické výrobky,se zvýšenými požadavky na tepelnou a chemickou odolnost se uplatňují nové typy technických vláken. Vzhledem k tomu, že čedičová vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová. Toto je základním předpokladem k jejich masivnímu rozšíření v technické praxi. Dalšími přednostmi čedičových vláken jsou nezanedbatelné ekologické a zdravotní výhody. Na rozdíl od azbestových nejsou karcinogenní. Při výrobě, používání i likvidaci oproti obdobným vláknům, jsou recyklovatelná.

Teoretická část předložené bakalářské práce popisuje čedičová vlákna, jejich zpracování a použití. Dále zahrnuje popis kompozitních materiálů, vlastností vláken a jsou zde vyjmenovány polotovary vyráběné z vláken. Na závěr této části je charakterizován silikonový lak Lukosil M 130, použitý při experimentech jako matrice.

V experimentální části je v první etapě charakterizován výchozí materiál (čedičová tkanina, čedičový krátkovlákenný odpad) a příprava vzorků pro experimenty.

V další části jsou popsány dynamicko – mechanické zkušební metody použité pro vyhodnocování vlastností vyrobených kompozitů.

V poslední části experimentu je popsáno testování vyrobených kompozitů a naměřené vlastnosti jsou porovnávány.

2 TEORETICKÁ ČÁST

V této části bakalářské práce jsou popsány kompozitní materiály, pozornost je věnována hlavně výztuži kompozitů v podobě vláken. U popisu výztuže je popsán materiál, který byl následně použit. Tedy vlastnosti čedičových vláken, jejich chemické složení, způsob zpracování, bezpečnost při zpracování a použití čediče.

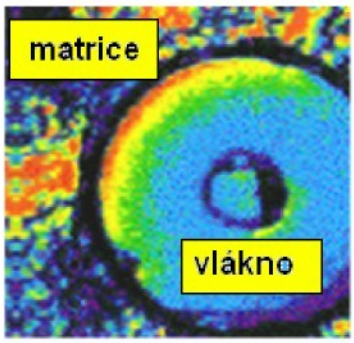
Je zde i kapitola o použití kompozitní matrice, Lukosilu M 130, který je hlavním pojícím členem.

2.1 Kompozitní materiály

Kompozity jsou složené materiály obsahující tužší složku (výztuž) a matrici (pojivo výztuže). Největší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny.

Druhy výztuže:
- disperzní (kovy disperzně zpevněné)
- částicové (partikulové)
  - › pravidelných tvarů
  - › nepravidelných tvarů (pěnobeton, polystyren)
  - › vláknové: dlouhá vlákna; krátká vlákna - uspořádaná, nahodilá

Druhy matrice:
- polymerní (reaktoplastická nebo termoplastická)
- kovová
- keramická, sklokeramická a skleněná
- uhlíková



Obr. 2.1: Mikroskopický pohled na kompozitní materiál [1]

2.1.1 Rozdělení vlákenných výztuží

• Jednovrstvé

› dlouhovlákenné (kontinuální) s jednosměrným, dvousměrným vyztužením;

› krátkovlákenné s náhodnou orientací a s přednostní orientací.

• Mnohovrstvé

› lamináty (laminát je vícevrstvový vláknový kompozit jehož materiály složek jsou v každé vrstvě stejné);

› hybridní lamináty (hybridní laminát je vláknový kompozit, kdy jeho jednotlivé vrstvy jsou z různých složek). [1]

Druhy kontinuálních vláken:
• skleněná
• uhlíková
• polymerní
• proteinová
• borová
• keramická
• kovová

2.1.2 Vlastnosti vláken

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je:

• malý příčný průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry „vrozených" vad materiálu. Také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům většího průměru výrazně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. Whiskery jsou monokrystaly o velmi malých příčných rozměrech [nm] a krátké délce. Dosahují velmi vysoké pevnosti (řádově 10^4 MPa), protože neobsahují defekty.

• přednostní nasměrování pevných kovalentních meziatomových vazeb ve směru podélné osy vlákna (u vláken krystalických potvrzeno RTG mikrodifrakcí).

Velký modul pružnosti mají vlákna, u kterých jsou nejhustěji obsazené roviny krystalické mřížky nebo tuhé makromolekuly orientovány paralelně s osou vlákna. Taková vlákna jsou silně anizotropní, tj. jejich vlastnosti v podélném a příčném směru se významně liší (vlákna uhlíková a polymerní mají záporný součinitel délkové teplotní roztažnosti v podélném směru). [2]

2.1.3 Produkty z vláken

Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny. Ty jsou dále zpracovány na následující polotovary:

• **sekané prameny** - jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky;

• **mletá vlákna -** mletím lze získat krátká vlákna jen v případe křehkých vláken;

• **prameny** bez zákrutu;

• **rovingy (pramence, kabílky)** - jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutu (méně než 40 zákrutu/m) pro výrobu profilu tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregu. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (např. u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením (rovingy kolem 3 k, číslo před **k** znamená kolik tisícovek elementárních vláken je v pramenci). Jemnost rovingu je udávána také v tex (hmotnost vláknového produktu v gramech při délce 1000 m) starší míra je denier, (hmotnost v gramech při délce 9000 m).

• **příze a kablovaná příze** - vzniká zkrucováním pramenu a jejich sdružováním, používá se pro výrobu technických tkanin, návin příze má kónický tvar.

• **rovingové tkaniny -** jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregu.

• **tkaniny z příze** - nejsou většinou vhodné pro výrobu kompozitních konstrukcí, ale slouží jako izolační, filtrační tkaniny a geotextilie

• **rohože** - netkané textilie, rouna. Tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky (cca 25 – 50 mm) sekané prameny. Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích. Jestli že pro výrobu rohoží použijeme kontinuálních vláken, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem (jsou vzájemně propletena).

• **prepregy** - jsou různě široké role (nebo kotouče), obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polovytvrzenou reaktoplastickou nebo termoplastickou matrici. Též je možné vyrobit pramenový nebo rovingový prepreg. Vlákna jsou impregnovaná reaktoplastickou (polovytvrzenou) nebo termoplastickou matricí. [1]

2.2 Čedičová vlákna

Jde o vlákna s vlastnostmi podobnými skleněným vláknům typu S. Výhodou je jejich cena, která činí asi 60 % S vláken a dobrá chemická odolnost. Výroba je analogická výrobě skleněných vláken, teplota tavení je 1400 °C. Složení čediče i technologie používaná v USA odpovídá podmínkám v ruských a ukrajinských závodech, v nichž výroba začala během studené války (vlákna nahrazovala skleněná vlákna typu S v leteckých aplikacích). Čedičová vlákna mají ve srovnání se skleněnými vlákny typu E odlišné složení a vlastnosti (tab. 2.5, 2.6). [2]

2.2.1 Chemické složení čediče

Čediče, též bazalty, jsou tmavé, intruzivní [1], výlevné vyvřelé horniny, porfyrické [2] nebo sklovité struktury. Odlučnost čediče je obvykle sloupcovitá. Textura bývá proudovitá nebo všesměrná. Zrnitost čediče je jemná, barva šedo-černá až černá. Zvětralý čedič má barvu spíše šedou. [3]

Čedič tvoří z velké části zemskou kůru. Je nejhojnější magmatická hornina zemského povrchu. Tvoří části dna oceánů, plošinové kontinentální bazalty. V čedičových horninách je určitým procentem zastoupeno několik minerálních fází.

Mezi nejznámější patří hlavně:
- pyroxeny (50 %)
- magnetit (10 %)
- olivín (15-20 %)
- plagioklas (30 %)

[1] intruzivní horniny = jsou takové, které vznikly pod zemským povrchem.

[2] porfyrické = nestejně zrnité.

Pyroxeny - patří do velké skupiny horninotvorných nerostů. Typická je pro ně pravoúhlá štěpnost a dobrá tavitelnost. Jedním z hlavních představitelů pyroxenů je augit [3].

Magnetit - se řadí mezi těžce tavitelné nerosty. Má zrnitou strukturu s černým lesklým vzhledem.

Olivín - žlutozelený až olivově zelený nerost se skelným leskem a krystalovým povrchem. Je to křemičitan, který má proměnlivý podíl hořčíku a železa. Stejně jako magnetit je olivín těžce tavitelný. Čiré krystaly olivínu jsou hledaným drahým kamenem.

Plagioklas - v magmatických horninách bývají plagioklasy zonální (pásmový), obvykle s bazičtějším [4] jádrem a kyselejším okrajem (je normální zonálnost), přičemž hlavně ve vulkanitech bývají větší krystaly (vyrostlice) často jemně oscilačně zonální, tj. s vícenásobnými změnami ve složení od centra k okraji. [4]

2.2.2 Zpracování čediče

Prvním krokem při zpracování čedičové horniny je tavení. Další zpracování se již liší dle účelu použití.

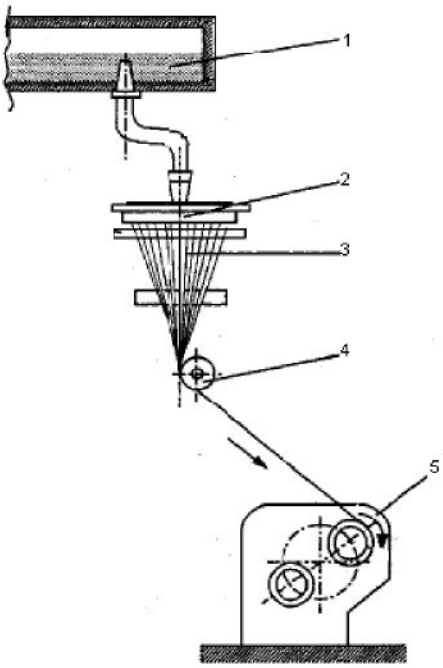
Tavení horniny je velmi náročný proces. Čedič se ve speciálních pecích taví při teplotě cca 1300 °C. Dle způsobu chlazení je získán jemně krystalický (rychlé zchlazení, krystalická struktura) nebo sklovitý produkt (pomalé zchlazení, amorfní struktura).

Pro výrobu čedičových vláken je nutno zvolit teplotu vyšší než 1300 °C, ta se pohybuje cca od 1500 °C do 1700 °C. Hornina je roztavena na požadovanou teplotu a následně protlačována tryskami a dloužena cca při teplotě 1300 °C. Poté dochází k pomalému nebo rychlému zchlazení.

Ne všechny čedičové horniny jsou vhodné pro výrobu vláken. Primární produkt musí splňovat jisté požadavky. Jeho chemické složení musí být konstantní s obsahem SiO_2 kolem 46 %. Důležitá je také schopnost tání bez pevných zbytků a tuhnutí bez výrazné krystalizace.

[3] Augit: má černohnědou až černou barvu, jeho tvar tvoří krátké sloupcovité krystaly s osmiúhelníkovým průřezem.

[4] bazičtější = zásaditější.



Obr. 2.2: Schematické znázornění výroby čedičových vláken

1 - roztavená surovina, 2 - trysky, 3 - čedičová vlákna, 4 - vedení rovingu, 5 - navíjení ochlazeného rovingu

Obr. 2.3: Cívka s rovingem z čedičových vláken

Nekonečná čedičová vlákna ve formě technického hedvábí jsou dále zpracovávána na příze - rovingy, skané příze, družené, aj. Dále se tento polotovar zpracovává do podoby plošných textilií, jako jsou tkaniny, pleteniny, netkané textilie.

Pro výrobu čedičových vláken je vhodný následující obsah chemických látek (viz. tab. 2.1).

Tab. 2.1: Rozbor čedičového vlákna [5]

Složka	Čedičové vlákno (% hmotnosti)
SiO_2	52
Al_2O_3	17,2
CaO	8,6
MgO	5,2
Fe_2O_3	<5
Na_2O	<5
K_2O, TiO_2	<1
Cr_2O_3, CoO, NiO	<0,1

SiO_2 zvýšený obsah v hornině » nutno zvyšovat i teplotu tavení.

Al_2O_3 rovněž zvyšuje tavící teplotu a viskozitu taveniny, zvýšený obsah Al_2O_3 » vlákna kratší a křehčí, odolnější proti vlivům zvýšených teplot a teplotním změnám a lépe odolávají chemickým vlivům

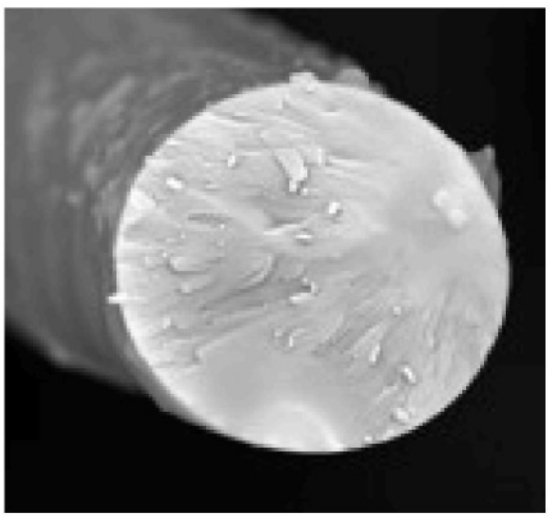
CaO snižuje viskozitu taveniny. Zvyšuje tavící teplotu. Vzniklé vlákno je krátké, křehké, CaO snižuje chemickou a hydrolytickou odolnost vláken.

MgO obdobně jako CaO, avšak ještě silněji. Nesnižuje tolik chemickou a hydrolytickou odolnost vláknitých materiálů jako CaO, zvyšuje teplotu odskelnění.

Fe_2O_3 působí jako tavidlo, snižuje tavící teplotu a viskozitu taveniny celkem rovnoměrně podle teplotní křivky. Dodává vláknu tmavou barvu.

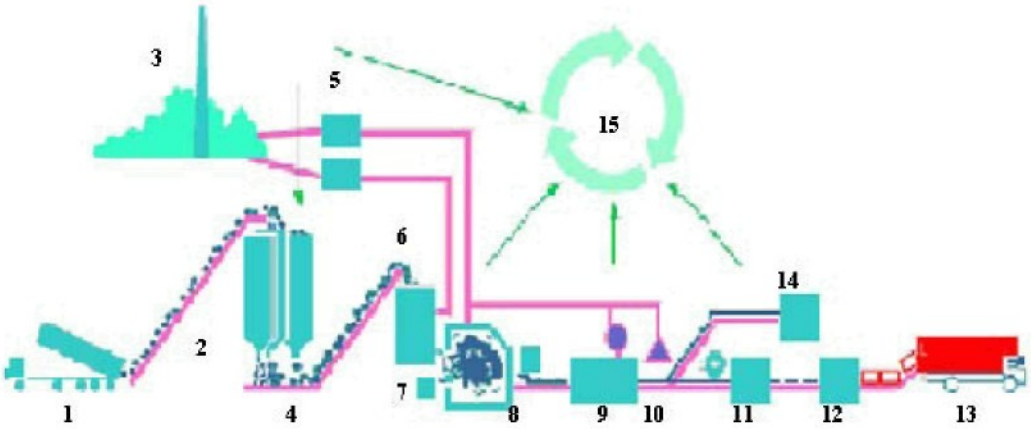
TiO_2 působí jako tavidlo a má podobné vlastnosti jako kysličník železnatý, je však vhodnější k výrobě vláknitých materiálů.

Na_2O, K_2O snižují viskozitu celkem rovnoměrně podle teplotní křivky. Zvětšují interval tekutosti taveniny. Do určitého procenta jsou v surovinách pro horninová vlákna vítaným tavidlem.



Obr. 2.4: Čedičové vlákno v lomu [7]

Prvním krokem výroby je roztavení čedičové horniny. Vznikne láva, která se při vytékání na rotující válce změní odstředivou silou na malé kapky, které odlétávají do usazovací komory. Tyto kapky se vlivem velké rychlosti natáhnou a vznikne jemné vlákno, což je základ izolace. Poté se do vlákna vstřikuje pojivo v podobě vodoodpudivých, protiplísňových a jiných přísad a putuje do vytvrzovací pece. Z té již vychází konečný produkt, který je upravován na potřebný rozměr. [6]

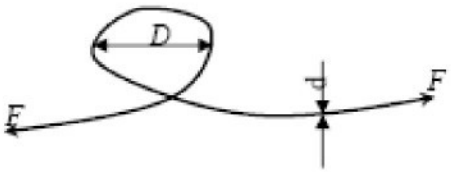


Obr. 2.5: Výroba kamenné vlny

1 - dodávka surovin, 2 - zásobníky surovin, 3 - komín, 4 - pásový dopravník s váhou, 5 - filtr, 6 - kupolová pec, 7 - přidání pojiva a oleje, 8 - rozvlákňovací a usazovací komora, 9 - vytvrzovací pec, 10 - chladící zóna, 11 - podélné a příčné pily, 12 - balička, 13 - přímá nakládka a distribuce, 14 - speciální zařízení pro speciální výrobky, 15 – recyklace [6]

2.2.3 Vlastnosti čedičových vláken

Čedičová vlákna se vyznačují velkým množstvím dobrých vlastností, díky nimž je možno je používat v široké škále oborů. Tato vlákna mají na jedné straně obrovskou pevnost a velmi nízkou tažnost. Na druhé straně jsou dost křehká, což je bráno za jednu z negativních vlastností. Tato vlastnost je schematicky naznačena a dokázána na obr. 2.6. Křehkost vlákna se dá popsat podílem průměru smyčky *D* a průměru vlákna *d*. [7]



Obr. 2.6: Schematické znázornění testu křehkosti vlákna [7]

Tepelným rozsahem použitelnosti (vlákna jsou téměř nehořlavá) se velmi podobají vláknům azbestovým, jež se také v posledních letech tato vlákna nahrazují z důvodu zdravotní závadnosti azbestu. Vlákna do sebe nepojímají téměř žádnou vlhkost, čili jsou nenasákavá (0,5%). Mezi chemické vlastnosti patří odolnost proti většině alkálií, organickým kyselinám, anorganickým kyselinám, organickým rozpouštědlům a jiným agresivním látkám.

Vlákna jsou tepelně nevodivá s vysokým tepelným odporem. Jejich velmi dobrou vlastností je odolnost proti eroznímu prostředí a proti UV záření, dále také vysoká odolnost proti plísním a jiným mikroorganismům. [5]

Tab. 2.2: Parametry základních čedičových vláken [5]

Sledované hodnoty	Hodnoty	Jednotky
Základní jemnost nitě	80,160,…2500…	tex
Poměrná pevnost	0,512	N/tex
Průměr fibril	9 - 12	μ-m
Obsah spalitelných látek	0,69	%
Obsah vlhkosti	0,061	%

Tab. 2.3: Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [5]

Vlastnosti fyzikální	Čedič	Sklo	Jednotka
Hustota (při 20 °C)	2900	2600	kg/m^3
Modul pružnosti v tahu	100 000	70 000	MPa
Navlhavost	0,5	1,0	%
Pevnost v tlaku	300	300	MPa
Pevnost v tahu	1850 - 2150	1850 - 2150	MPa
Vlastnosti chemické			
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod.			
v 2N HCl	81,8	53,9	%
v H_2O	99,8	99,3	%
Vlastnosti tepelné			
Pracovní teplota	-200 až + 700	-60 až + 460	° C
Měrná tepelná vodivost	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035	W/m.K
Vlastnosti elektrické			
Specifický odpor	10^{12}	10^{11}	Ω.m

Tab. 2.4: Porovnání tepelných vlastností čedičových a azbestových vláken [8]

Tepelné vlastnosti	Čedičové vlákno	Azbestové vlákno	Jednotka
Tepelná odolnost	700	500	° C
Teplota tavení	1450	1550	° C
Hustota Vláken	2800	2500	kg/m^3

2.2.4 Použití čedičových vláken

Ve 20. století s rozvojem petrurgie, slévárny z čediče produkují např. dlažby, žlaby nebo třeba otěruvzdorná potrubí, která se nejčastěji používají pro pneumatickou nebo hydraulickou dopravu abrazivních materiálů. Dlažby se používají i pro odolné průmyslové podlahy. Žlaby, cihly a trubky jsou pro své vlastnosti používány i pro kanalizace.

Čedičovou taveninu je možné rozvláknit, vznikají tak vlákna vysoce pevná a ohebná. Vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová. Tkaniny z čedičových vláken se dají použít ve stavebnictví, v leteckém průmyslu, k výrobě tepelných, zvukových a chemických izolací atd. Tato vlákna jsou zpracovávána při výrobě vysocepevnostních, tepelně odolných Hi-Tech šňůr a sítí. Dále se čedič používá na štěrk a kamenivo do betonů. [9]

Tab. 2.5: Porovnání složení čedičových a skleněných E vláken [2]

Chemické složení	Čedič [hm.%]	E-sklo [hm.%]
SiO_2	58	55
AL_20_3	17	15
Fe_20_3	10	0,3
CaO	8	18
MgO	4	3
Na_2O	2,5	0,8
TiO_2	1,1	-
K_2O	0,9	0,2
B_2O_3	-	7
F	-	0,3

Čedičová vlákna mají hustotu ρ = 2600 - 2800 kg/m^3, tj. mají menší měrnou pevnost než E sklo při teplotách pod 300 °C.

Čedičová vlákna začala v posledních letech velmi rychle nahrazovat doposud využívané materiály jako je azbest a sklo. Díky svým výborným mechanickým a chemickým vlastnostem jsou vhodným materiálem pro řadu průmyslových odvětví. Především se jedná o stavebnictví, letectví a další průmyslové aplikace.

Tab. 2.6: Porovnání vlastností čedičových a skleněných E vláken [2]

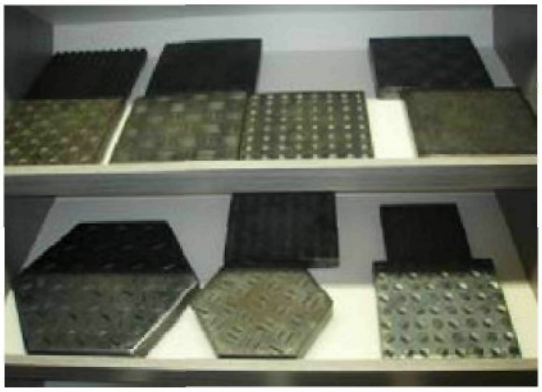
	Čedičové vlákno	Vlákno z E skloviny
Pracovní teplota pro tepelní izolace [°C]	820	600
Minimální teplota použití [°C]	-260	-60
Teplota tavení [°C]	1450	1400
Teplota skelného přechodu [°C]	1050	825
Hustota [kg/m^3]	2750	2600
Pevnost v tahu [MPa]	4840	3450
Modul pružnosti E [GPa]	89	77
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,7

Čedičová vlákna se využívají jako výztuž do plastických hmot a do různých technických výrobků. Dále například v podobě vaty s názvem „kamenná vlna“, jenž se využívá nejen k tepelným, protihlukovým nebo chemickým izolacím.

Díky vysoké tepelné odolnosti jsou tato vlákna používána při výrobě ohnivzdorných ochranných oděvů a jejich doplňků. Vzhledem k vysoké chemické odolnosti je lze využít také při výrobě kyselinovzdorných oděvů.

Své uplatnění nachází produkty z čediče také v sektoru bydlení a sice jako tapety a nehořlavé interiérové textilie. Díky své vysoké pevnosti je čedič využíván hojně ve stavebnictví. Často jej můžeme vidět v podobě podlah, které se vyznačují vysokou kvalitou a příjemným vzhledem. Ve formě broušeného kamene jej můžeme uplatnit jako součást obložení krbů či komínů.

Tato izolační vrstva se prokázala jako jedna z nejlepších v poslední době.



Obr. 2.7: Různé formáty čedičové dlažby s protiskluzovou úpravou [10]

Obr. 2.8: Povrstvená tkanina [5]

Jsou zde uvedené i vlastnosti skleněných vláken, protože se čedič často používá jako náhrada za tato vlákna.

Skleněné vlákno z E skloviny (tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-boro-křemičité sklo, sklo Eutal, eutektické složení s nejmenší teplotou tavení, sklo pro elektrotechniku) je nejlevnější (~70 Kč/kg) a přitom má dobré mechanické a elektrické vlastnosti (nevodivost, velký povrchový odpor, relativně malou relativní permitivitu a malé dielektrické ztráty (relativní permitivita se pohybuje mezi 5,9 až 6,4, ztrátový činitel tangens ztrátového úhlu při frekvenci 1 MHz je 0,0039) a poměrně dobrou odolnost proti hydrolýze (rozkladu v horké vodě). [2]

Skleněné vlákno z S skloviny s větším podílem oxidu křemíku a hliníku je pevnější než E sklo, má větší modul pružnosti, menší hustotu, větší teplotní odolnost a dobrou odolnost v prostředí kyselin. Je dražší (větší teplota tavení), takže jeho použití je většinou omezeno jen na aplikace v leteckém průmyslu. Používá se pouze v kompozitech s epoxidovou matricí. Na základě skla S je možno získat nové biomateriály. Tzv. HPBÔ vlákna jsou vhodná pro dočasné implantáty a jsou kompatibilní s řadou termoplastů, jako je polyetheretherketon (PEEK), polyetherimid (PEI) a polyfenylensulfid (PPS). Vlákna mají o 40 % větší pevnost v tahu a o 20 % větší modul pružnosti v tahu než standardní E sklo. Vlákna vyrábí firma AGY (USA). Kompozity jsou vhodné pro dentální implantáty, zubní korunky, zubní můstky a v orthopedii jako konstrukční materiál. HPBÔ vlákna jsou nabízena sekaná, jako příze anebo v podobě rovingu. [2]

2.2.5 Bezpečnost při zpracování a manipulaci s čedičem

Čedičový materiál je při běžné manipulaci zdravotně nezávadný. Je určen pro technické účely a je chemicky stálý, samovolně se z čedičového materiálu neuvolňují žádné škodlivé látky.

Při zpracování čediče je potřeba dodržovat základní hygienická opatření. Může dojít k mechanickému poškození pokožky, očí a horních cest dýchacích. Je doporučeno mít při manipulaci s tímto materiálem pracovní plášť a popřípadě roušku, zabraňující vdechnutí jednotlivých vláken. Případné mechanické poškození pokožky lze ošetřit běžnými krémy.

Vlákna během vlastního zpracování svůj průměr nemění a podélně se neštěpí. Průměr nekonečných čedičových vláken se pohybuje od 9 do 13 μm, což je hodnota, která zajišťuje čedičovým vláknům jejich zdravotní nezávadnost při vdechnutí, tudíž nepůsobí karcinogenně [5].

K likvidaci čedičových produktů není zapotřebí nijak zvláštního opatření, lze je bez rizika skladovat, protože nejsou pro přírodu nijak nebezpečné. Případně je můžeme recyklovat (jako u kamenné vlny) opětovným roztavením a vyrobením nového produktu.

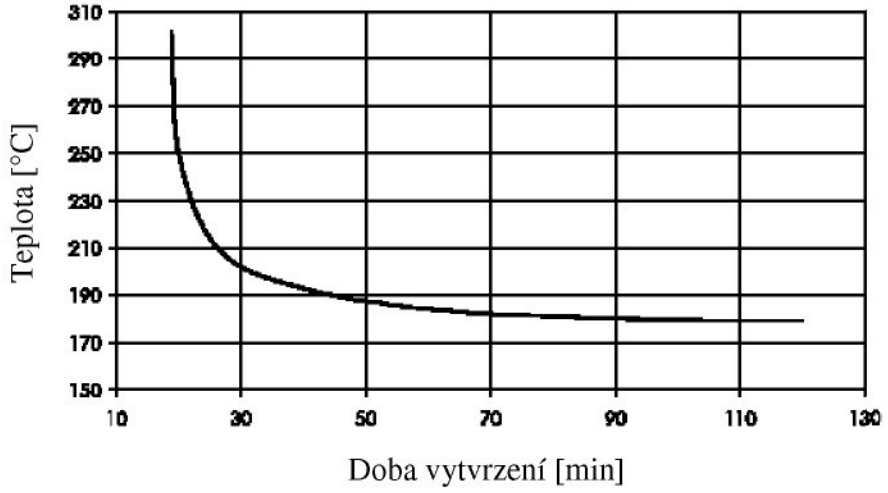
Z ekologického hlediska se tento materiál pochlubí hned několika plusy. Slouží jako plnohodnotná náhrada azbestových a skleněných vláken v různých průmyslových aplikacích. Jeho výroba je energeticky méně náročná než výroba právě zmiňovaných azbestových a skleněných vláken. V přírodě se vyskytuje ve formě vhodné k zvlákňování a další zpracování se obejde bez dalších přísad. [11]

[5] Minimální průměr vlákna, který můžeme vdechnout je 3 μm. Taková vlákna jsou zdraví nebezpečná, protože působí karcinogenně. Může jít například o azbest, který se z důvodu vdechnutí nepoužívá.

2.3 Lukosil M 130

Metylsilikonový lak Lukosil M 130, použitý jako matrice při experimentech, je moderní silikonový lak zasychající za pokojové teploty. Je to roztok silikonové pryskyřice v xylenu [6] jako rozpouštědle.

Lukosil M 130 je možné vytvrdit teplotou bez použití katalyzátoru. Závislost doby vytvrzení je znázorněna v grafu na obr. 2.9.



Obr. 2.9: Graf vytvrzování Lukosilu M 130 [12]

Při pokojové teplotě vytváří Lukosil M 130 pružný, nelepivý, částečně chemicky a mechanicky odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení tvrdosti a výrazného zlepšení mechanické a především chemické odolnosti. Film se stává odolným vůči působení organických rozpouštědel a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání.

K dalším vlastnostem patří :

- odolnost proti povětrnosti a UV záření
- hydrofobní vlastnost [12]

Tab. 2.7: Technické parametry Lukosilu M 130 [12]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Měrná hmotnost	1000 - 1020	kg/m^3
Viskozita	30 - 40	mPa.s/20°C
Doba schnutí	8	hod
Obsah netěkavých látek	50 +/- 2	%

[6] xylen = čirá, bezbarvá kapalina nasládlého zápachu.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úkolem této bakalářské práce bylo vytvoření kompozitů s využitím krátkovlákenného čediče v kombinaci s tkanou výztuží z čedičových vláken a kompozitů pouze s tkanou výztuží z čedičových vláken.

V další části se zabývá třemi různými měřícími způsoby v podobě mechanických a dynamických testů.

3.1 Příprava vzorků

1) V prvním kroku se připraví čedičová tkanina o rozměrech 220 x 220 mm (obr. 3.2). Je důležité zachovávat postavení osnovních a útkových nití, protože se v následujících pokusech rozděluje měření dle směru osnovy a útku.

Obr. 3.1: Tkanina z čedičových vláken

Obr. 3.2: Vytvořený vzorek

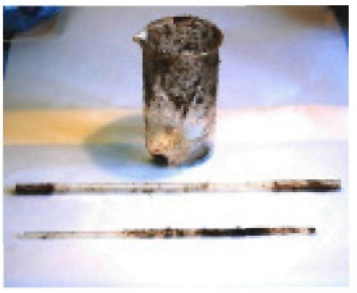
2) Z této čedičové tkaniny se vytvoří 2 druhy vzorků:

- Vzorek typu 1.
  - › je složen z čedičové tkaniny (2 kusy), tkanina je prosycena matricí (Lukosil M 130). Dále se vezme stejný vzorek. Tyto dvě tkaniny se přiloží na sebe (dále označen jako vzorek 1. typu).
- Vzorek typu 2.
  - › je složen taktéž z čedičové tkaniny (2 kusy), na kterou je aplikován Lukosil M 130, jako výztuž je zde použit krátkovlákenný čedičový odpad (z výroby kamenné vlny). Ten je v kádince rozmíchám s matricí (Lukosil M 130). A to v poměru takovém, aby se veškerý Lukosil adsorboval do čedičových vláken (dále označen jako vzorek 2. typu).

Na čedičovou tkaninu se rovnoměrně rozprostře čedičový odpad (obr. 3.3). Čedičový odpad je získán z výroby tepelně izolačních desek (obr. 3.4). Pomocí tyčinky ze skla se čedičový odpad vyvalí, aby vrstva byla pokud možno stejnoměrná v celém vzorku, a přiklopí se druhou vrstvou čedičové tkaniny.

Obr. 3.3: Čedičový krátko vlákenný odpad

Obr. 3.4: Izolační deska [13]



Obr. 3.5: Kádinka, dutinka, míchátko

3) Když jsou vzorky připravené, tak se vloží mezi plechové desky. Aby se vzorky nepřilepily, prokládají se teflonovým pečícím papírem (obr. 3.6). Desky se musí vzájemně stáhnout pro lepší stlačení a vytvoření kompozitu požadované tloušťky.

Obr. 3.6: Teflonový pečící papír

4) Vzorky se vkládají do horkovzdušné pece na teplotu 200 °C po dobu 6 hodin.

Obr. 3.7: Horkovzdušná pec (HS 122 A)

5) Hotové vzorky byly nařezány na rozměry potřebné pro jednotlivé testy na pile MUTRONIC typu DIADISC 4200 R. Každý měřící stroj má jiné požadavky na velikost vzorku, proto jsou velikosti vzorků odlišné. Specifikace velikostí vzorků dále v každé kapitole.

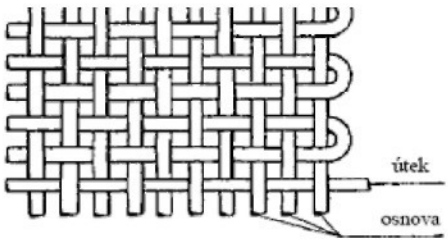
3.2 Vyhodnocení kompozitních materiálů

Pro experiment byly zvoleny 3 zkoušky, z nichž dvě (Falling test a Charpy test) byly prováděny v Maďarsku (Budapest University of Technology and Economics Department of Polymer Engineering) neboť toto zařízení není k dispozici na TUL. Zkouška na přístroji DMA DX04T byla prováděna v laboratořích TUL.

Zvolené zkoušky jsou destruktivního charakteru a popisují dynamicko - mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s textilní výztuží. Následující kapitoly jsou věnovány popisu jednotlivých přístrojů a zkoušek, které na nich byly provozovány.

Prvním krokem k testování vzorků bylo jejich nařezání na potřebné rozměry, které byly zvoleny v souladu s parametry jednotlivých přístrojů.

Od každého typu materiálu byly nařezány vzorky ve dvou směrech - ve směru útku a ve směru osnovy (obr. 3.8).



Obr. 3.8: Tkanina

Konečné rozměry vzorků potřebných k jednotlivým zkouškám:

3 point bending [7] DMA	40 x 10 mm (ve směru osnovy a útku)
Charpy test	40 x 10 mm (ve směru osnovy a útku)
Falling test	60 x 60 mm (na směru nezáleží)

[7] Trojbodý ohyb je odvozen od anglického názvu 3 - point bending.V textu je dále používáno pouze 3PB.

3.2.1 3 - Point bending na dynamicko - mechanické analýze

Dynamicko - mechanická analýza (DMA) je jedna z nejcitlivějších technik schopná charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu. Podstata metody DMA je založena na sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobeného malému oscilačnímu napětí. Metoda odděluje viskoelastickou odezvu materiálu na dvě komponenty modulu (E^*): reálná část, která reprezentuje elastický modul (E') a imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní složku (E'').

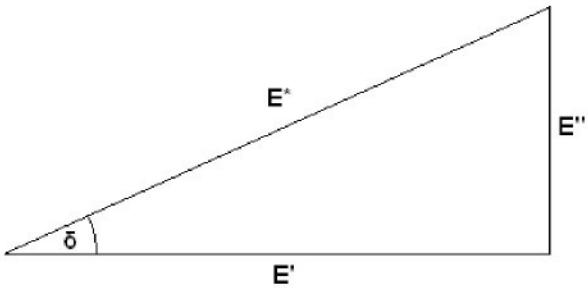
Celkový tzv. komplexní modul je $E^* = E' + iE''$. Tato separace měření do dvou komponent popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu: elasticitu (vratná složka) a viskozitu (ztrátová, disipační energie). [14]

Pro test 3-bodovým ohybem metodou DMA je zapotřebí zvolit potřebný typ čelistí (obr. 3.14).

Dynamicko - mechanická analýza je jednou z nejpřesnějších metod termické analýzy. Slouží k charakterizaci pevných látek, která je založena na vyhodnocování dynamicko - mechanických spekter pro jednotlivé materiály specifických vlastností (jsou funkcí specifického relaxačního procesu spojeného s určitým druhem molekulárního pohybu). Tato dynamická spektra se měří jako funkce teploty, frekvence, času, napětí nebo kombinace těchto parametrů. [15]

DMA může charakterizovat materiály závislostí modulu a ztrátového úhlu na teplotě (případně na čase, frekvenci). Tím poskytuje údaje o mechanických vlastnostech, které mají přímý vztah ke zpracování a užitným vlastnostem výrobků. DMA se zpravidla používá k identifikaci sekundárních přechodů v polymerních materiálech, ale je schopna zaznamenat i řadu dalších méně intenzivních přechodů odrážejících se v rázové houževnatosti vzorku.

Dynamicko - mechanická analýza je založena na principu jak mechanických, tak dynamických a tepelných odezev zkoumaného materiálu. [15]



Obr. 3.9: Rozklad absolutní hodnoty komplexního modulu

Obr. 3.10: Přístroj DMA DX04T

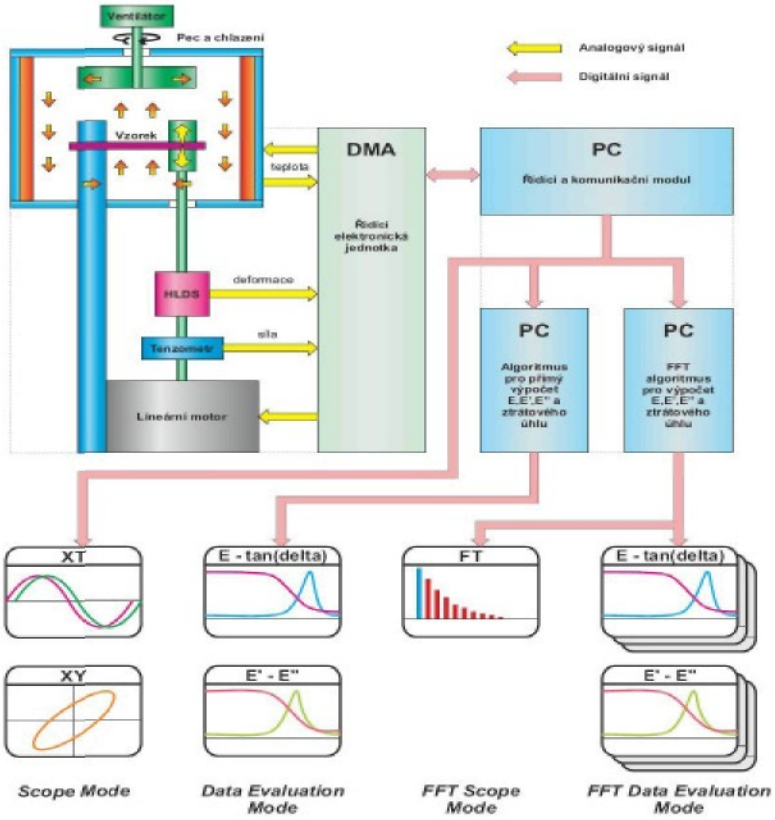
Přístroj DMA DX04T umožňuje měřit celý průběh skutečné síly působící na vzorek a celý průběh deformace vzorku, z těchto hodnot následně vypočítat mnoho údajů, například obě složky komplexního modulu E', E'' z jejich průběhů ztrátový činitel tgδ. Na rozdíl od přístrojů jiných firem (jak uvádí firma R.M.I.) je přístroj schopen zobrazovat hysterezní křivku, ze které lze zjistit energetické ztráty v materiálu.

Přístroj je plně řízen standardním PC. Pro tvorbu grafů a vyhodnocení dynamicko - mechanické analýzy je používán program DMA Grapher. Dynamicko - mechanický analyzátor DMA DX04T umožňuje současnou aplikaci dvou různých metod k určení průběhu modulu a ztrátového úhlu.

První metoda je přímé určení modulu z amplitudy kladné a záporné půlvlny síly a deformace (získáme dvě křivky modulu - E_{UP}, E_{DN}) a určení ztrátového úhlu z fázového posunu mezi náběžnými a sestupnými hranami průběhů síly a deformace

(získáme opět dvě křivky ztrátového úhlu tgδ_{UP}, tgδ_{DN}), přičemž příslušné dvojice křivek v případě správného měření splývají.

Druhá metoda je založena na zcela odlišném principu - data se zpracují pomocí FFT (Fast Fourier Transform) a výsledkem je průběh modulu a ztrátového úhlu v závislosti na teplotě nebo na čase pro každou harmonickou složku. Porovnání výsledků obou metod již v průběhu měření dává perfektní možnost rychlé a snadné kontroly správnosti měření. [15]



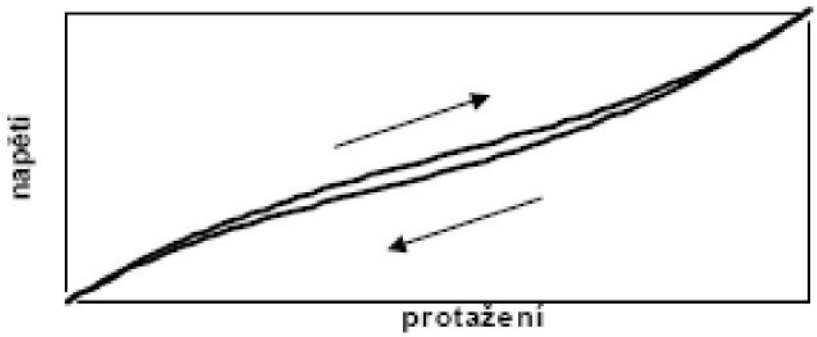
Obr. 3.11: Schéma přístroje DMA DX04T [15]

Základem přístroje jsou dvě vyvážená rovnoběžná ramena, uložená na speciálních čepech, umístěných blízko středu ramen. Čepy jsou vysoce přesné torzní pružiny. Mezi ramena se upíná vzorek, který vytváří rezonanční systém tj. rezonanční frekvence závislá na modulu a geometrii vzorku. Celé zařízení je umístěno v termostatovaném prostředí, což umožňuje jak izotermní měření tak měření při změně teploty, obvykle od - 150 °C až 500 °C. [14]

Hysterezní křivka

Vlákna jsou schopna ve větší nebo menší míře vracet se po deformaci do původních rozměrů a původního tvaru. Cyklickým zatěžováním a odlehčováním vláken zůstává určitá deformace vláken trvalá. Dalším zatěžováním neprobíhá proces deformace vlákna stejně a po uvolnění napětí se vlákno nevrací zpět do původního stavu. Dokonale elastické vlákno by se vracelo stejnou cestou do původního stavu a do původních rozměrů. U nedokonale pružných vláken se uvolňuje jen část energie vložené do vlákna při deformaci.

Křivky napětí-tažnost jsou při zatěžování vlákna odlišné od křivek napětí-tažnost při uvolňování napětí a vzniká hysterezní smyčka (obr. 3.12). Plocha smyčky hystereze udává rozdíl v množství spotřebované a navrácené energie. Čím je plocha smyčky větší, tím více energie zůstává po deformaci ve vzorku. Energie se mění na teplo. [14]



Obr. 3.12: Hysterezní křivka [14]

Využití přístroje DMA DX04T v praxi

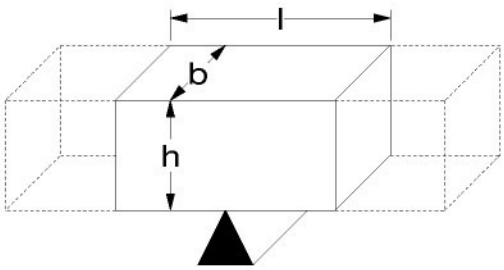
Vzhledem k tomu, že přístroj umožňuje měřit ve všech standardních deformačních modech (tlak, tah, tříbodový ohyb, jednoduchý a dvojitý vetknutý nosník a smyk) je možné jej v textilu využít nejen pro standardní měření vlákenného materiálu při tahovém namáhání, ale je možné zjišťovat také vlastnosti kompozitních materiálů.

Přístroj dává rychlé, přesné a velmi dobře reprodukovatelné výsledky při nenáročnosti přípravy měření. Na základě těchto poznatků je ideální jeho využití jak ve výzkumu, tak hlavně při kontrole jakosti materiálů.

Postup zkoušky:

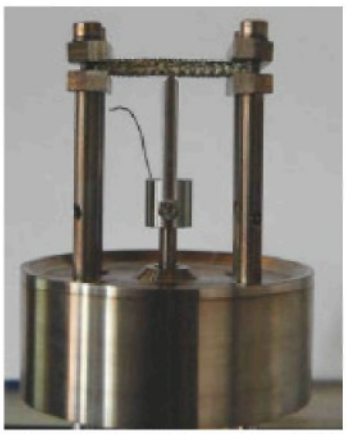
U vzorků o velikosti 40 x 10mm (činná délka 30 mm) bylo zapotřebí změřit tloušťku. Poté byl vzorek upnut do čelistí přístroje. Na připojeném počítači je možné během zkoušky sledovat její průběh. Do počítače byly nejprve vloženy vstupní hodnoty jednotlivých vzorků:

- předpětí vzorku – 205 +/- 5 mN;
- teplota – cca 23 °C (přibližně pokojová teplota);
- frekvence – 1 až 100 Hz; (dle typu vzorku);
- tloušťka vzorku (*h*) – různá, dle konkrétního vzorku;
- upínací délka vzorku (*l*) – 30 mm;
- šířka vzorku (*b*) – různá, dle konkrétního vzorku;



Obr. 3.13: Rozměry vzorku. [15]

Vzorek byl zakryt píckou a přístroj mohl být spuštěn pomocí ikony na připojeném počítači. Doba, po kterou byl vzorek testován, byla 30 minut. Po uběhnutí 30-ti minut byl vzorek vyjmut a proces se opakoval pro všechny testované vzorky. Od každého typu kompozitů bylo testováno 6 kompozitů bez čedičové výplně a 7 kompozitů s čedičovou výplní v obou směrech (ve směru kolmém na směr osnovy a směr útku).



Obr. 3.14: Upnutý vzorek v čelistech

Obr. 3.15: Zavřená pec (DMA DX04T)

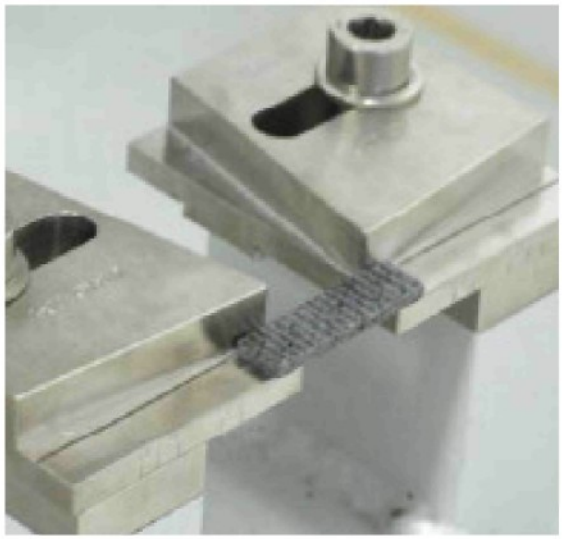
3.2.2 Charpy test

Charpy test byl prováděn na přístroji RESIL IMPACTOR americké firmy CEAST S. p.A dle normy MSZ EN ISO 179-1: 2001. Plastics. Determination of Charpy Impact Properties. Part 1: Non-Instrumented Impact Test. (ISO 179-1: 2000). [16]

Zkouška je vhodná jako simulace nárazů různých charakterů. Například pro materiály používané na stavby lodí, letadel, apod. Zkouškou se zjišťuje odolnost materiálu při dynamickém rázovém namáhání. Test slouží ke zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení vzorku.

Princip Charpy testu spočívá v nárazu kladivem na vzorek. Kladivo provádí pohyb po kruhové dráze. V první fázi se zdvihne a upevní v horní – počáteční poloze. V nejnižší poloze se umístí vzorek, na který je působeno kladivem, jež se pohybuje volným pádem rychlostí cca 3,7 m/s. Kladivo se po výkonu vrací do počáteční polohy. Detailní pohled na výkon testu je znázorněn na obr. 3.16. [17]

Obr. 3.16: Resil impactor



Obr. 3.17: Detail čelistí a umístění vzorku

Tab. 3.1: Specifikace přístroje Resil impactor [18]

Velikost [mm]	900 x 500 x 800
Hmotnost [kg]	180
Potenciální energie [J]	1 - 25

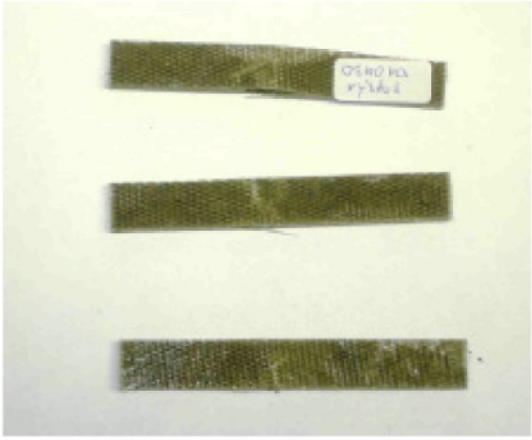
Postup zkoušky:

Vzorek o velikosti 40 x 10 mm je položen na podpěrky (obr. 3.17) a vystaven nárazu kladivem. Pro test byly připraveny vzorky dvou typů, ve směru osnovy a ve směru útku. V případě testování nárazu na kompozitech byl test vykonán ve směru kolmém na směr osnovy či útku. Zkušební kompozity po provedení Charpyho testu jsou zobrazeny na obr. 3.18-21.

Poznámka: Na dvouvrstvých kompozitech (čedičová tkanina - čedičová tkanina) nemohli být provedeny testy, protože výsledné parametry se pohybovaly mimo rozsah přístroje.

Obr. 3.18: Testovaný vzorek ve směru útku – pohled shora

Obr. 3.19: Testovaný vzorek ve směru útku – boční pohled



Obr. 3.20: Testovaný vzorek ve směru osnovy – pohled shora

Obr. 3.21: Testovaný vzorek ve směru osnovy – boční pohled

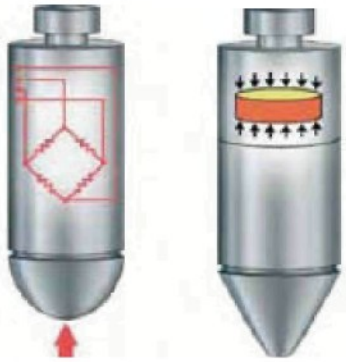
3.2.3 Falling test

Pomocí falling testu je možno na předložených vzorcích testovat simulované balistické zkoušky pomocí průrazu nebo zkoušky, jež simulují různý charakter nárazu.

U přístroje k falling testu pod názvem FRACTOVIS firmy CEAST S.p.A. existuje možnost modifikace, jež spočívá ve výměně závaží a hrotů různých tvarů, kterými se působí na kompozit (obr. 3.24). [19]

3.22: Detailní pohled na průrazovou tyč

3.23: Přístroj Fractovis



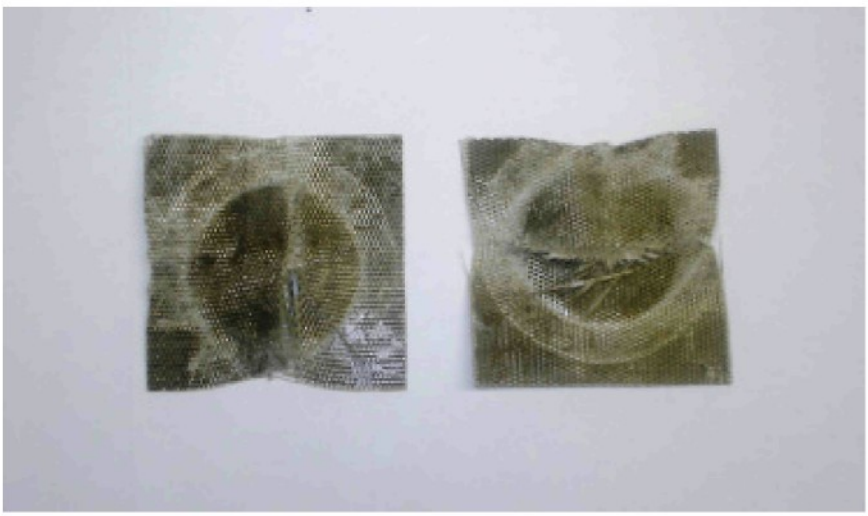
3.24: Výměnné hroty pro průrazovou tyč

Postup zkoušky

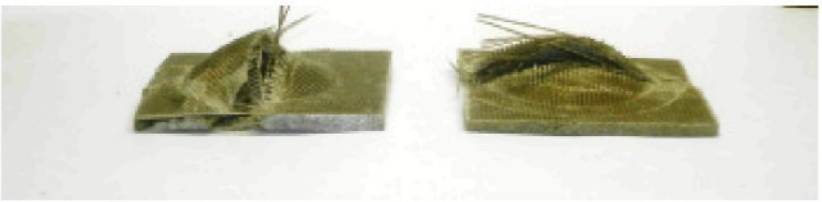
Vzorek o velikosti 60 x 60 mm byl umístěn na plochu s otvorem uprostřed. Poté byla uzavřena bezpečnostní dvířka a přístroj mohl být uveden do chodu. Vzorek je pomocí vzduchu přitlačen k pracovní desce. Průrazová tyč je spuštěna do pohybu silou danou velikostí závaží. Vzorek je prorážen tyčí (obr. 3.22).

Ukázku kompozitů po zkoušce je možno vidět na obr. 3.25-28.

Obr. 3.25: Kompozity bez výztuže s čedičových vláken - částeční boční pohled



Obr. 3.26: Kompozity bez výztuže s čedičových vláken - pohled shora



Obr. 3.27: Kompozity s výztuží s čedičových vláken - částeční boční pohled

Obr. 3.28: Kompozity s výztuží s čedičových vláken - pohled shora

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

4.1.1 3 Point bending na dynamicko – mechanické analýze

Zkouška byla prováděna u vzorků velikosti 40 x 10 mm (činná délka 30 mm). U kompozitů bez čedičové výplně bylo testováno 6 vzorků, to jak ve směru osnovy tak ve směru útku. O frekvenci 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz a 50 Hz. A u kompozitů s čedičovou výplní bylo testováno 7 vzorků, to jak ve směru osnovy tak ve směru útku. O frekvenci 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz a 100 Hz.

U kompozitů bez využití krátkovlákenné čedičové výplně při frekvenci 50 Hz nešlo měření uskutečnit. Ta samá situace nastala u kompozitům s krátkovlákennou čedičovou výplní, ale hodnota frekvence byla 100 Hz.

V tabulce 4.1 jsou zobrazeny průměrné hodnoty tlouštěk *h* [mm], komplexní modul pružnosti *E* [MPa], reálná složka modulu pružnosti E´, imaginární složka modulu pružnosti E´´ a ztrátového úhlu tan δ.

Teplota pro měření byla pokojová, což je 23 °C

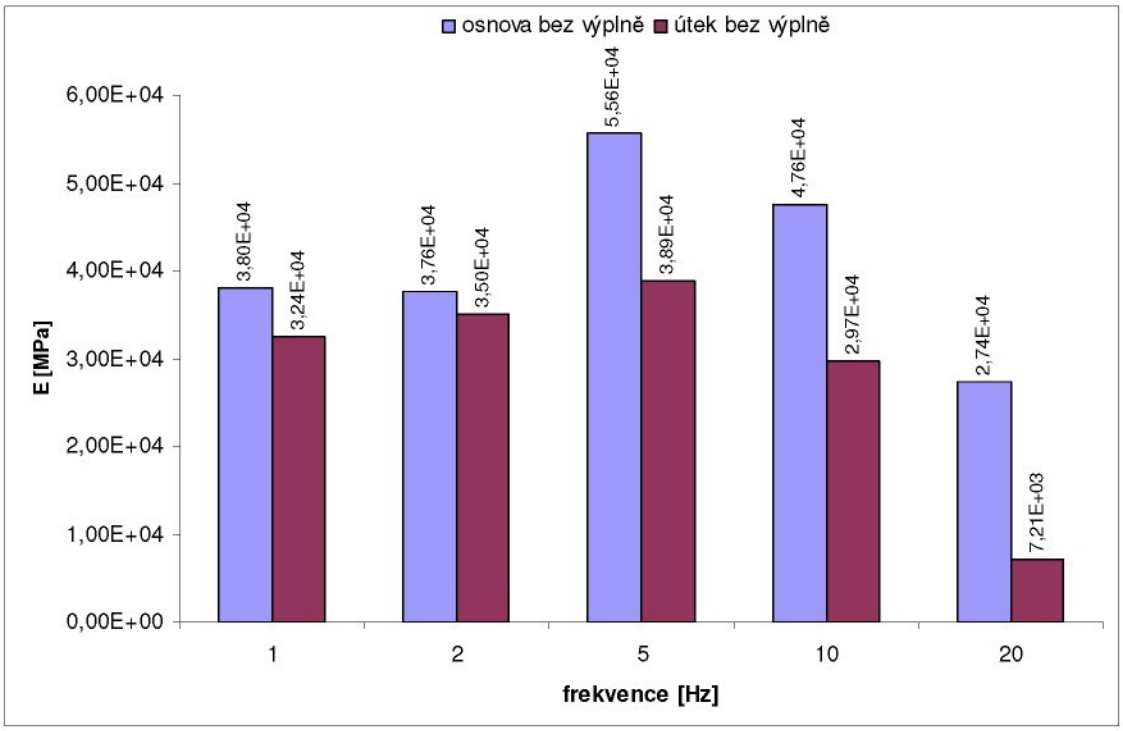
Tab. 4.1: Hodnoty pro směr osnovy bez krátkovlákenné čedičové výplně

	tloušťka vzorku	šířka vzorku	komplexní modul pružnosti	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	ztrátový činitel
frekvence [Hz]	h [mm]	b [mm]	E [MPa]	E´ [MPa]	E´´ [MPa]	tan δ [-]
1	0,55	10,50	3,80E+04	3,78E+04	2,31E+03	6,86E-02
2	0,55	11,50	3,76E+04	3,75E+04	2,18E+03	6,36E-02
5	0,50	11,80	5,56E+04	5,53E+04	2,67E+03	5,82E-02
10	0,50	10,85	4,76E+04	4,71E+04	2,61E+03	6,98E-02
20	0,50	10,65	2,74E+04	2,73E+04	2,11E+03	8,01E-02

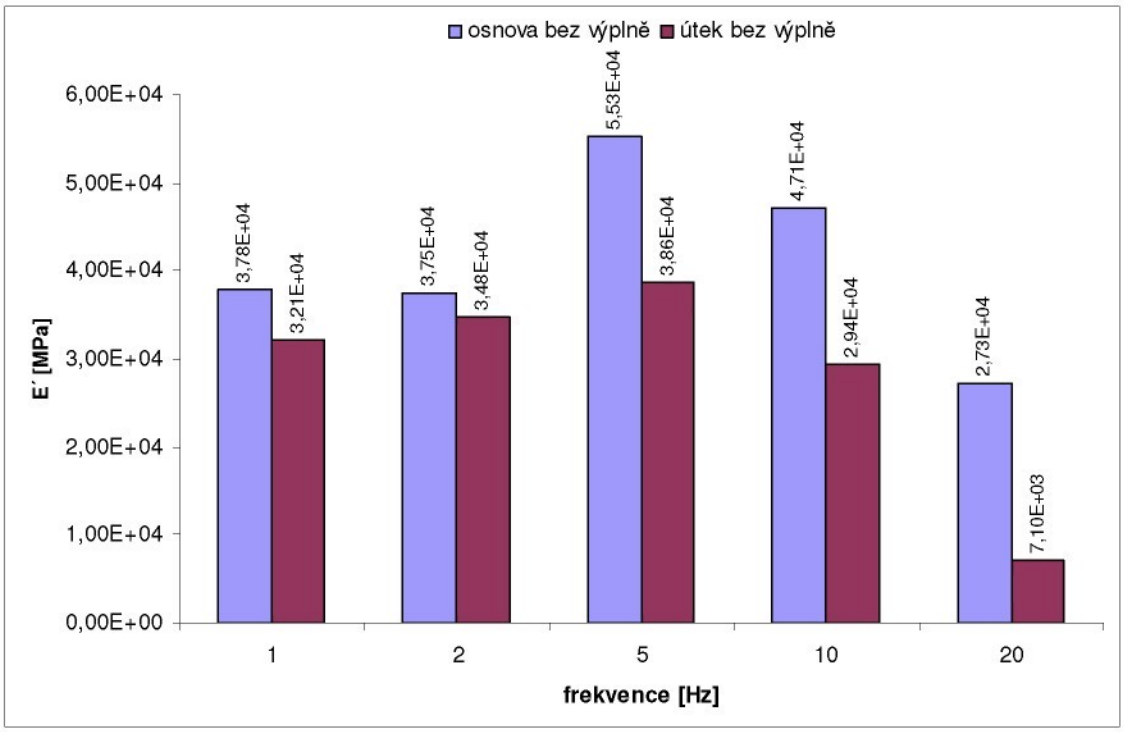
Tab. 4.2: Hodnoty pro směr útku bez krátkovlákenné čedičové výplně

	tloušťka vzorku	šířka vzorku	komplexní modul pružnosti	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	ztrátový činitel
frekvence [Hz]	h [mm]	b [mm]	E [MPa]	E´ [MPa]	E´´ [MPa]	tan δ [-]
1	0,55	12,00	3,24E+04	3,21E+04	1,62E+03	6,28E-02
2	0,50	12,00	3,50E+04	3,48E+04	1,37E+03	4,83E-02
5	0,50	10,75	3,89E+04	3,86E+04	1,64E+03	5,60E-02
10	0,55	11,55	2,97E+04	2,94E+04	1,35E+03	6,23E-02
20	0,55	11,95	7,21E+03	7,10E+03	7,33E+02	1,31E-01

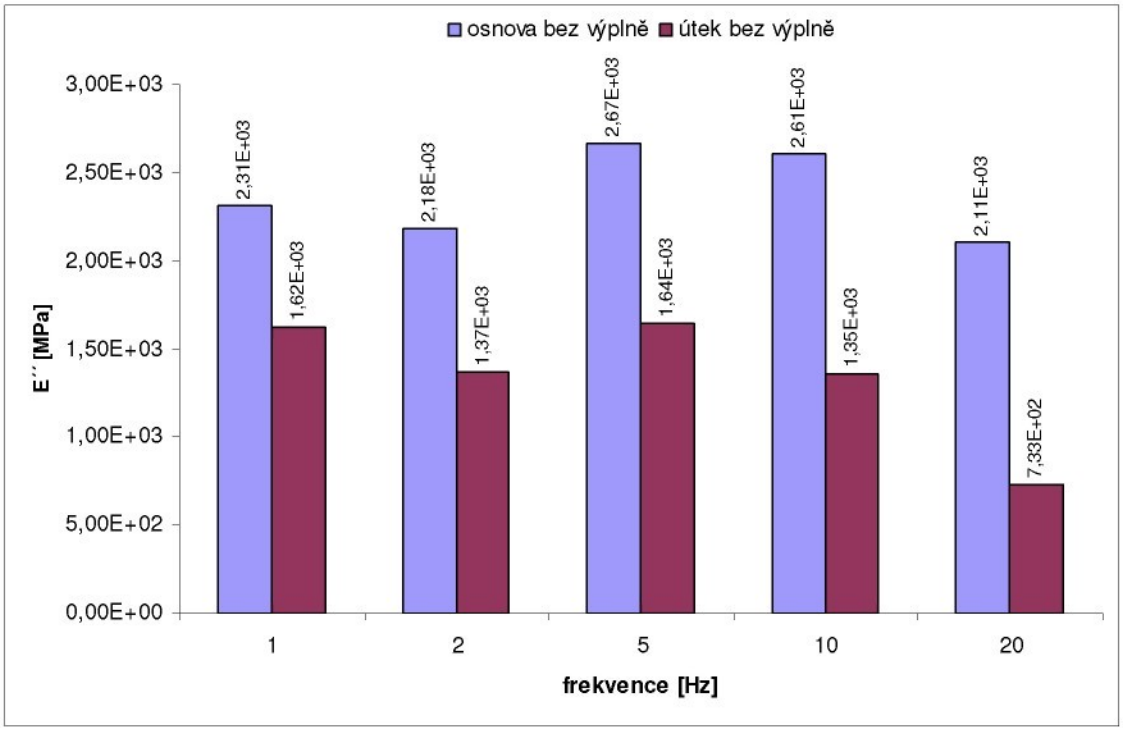
Následující grafy jsou společné pro obě tabulky. Je na nich porovnání mezi směrem osnovy a útku.



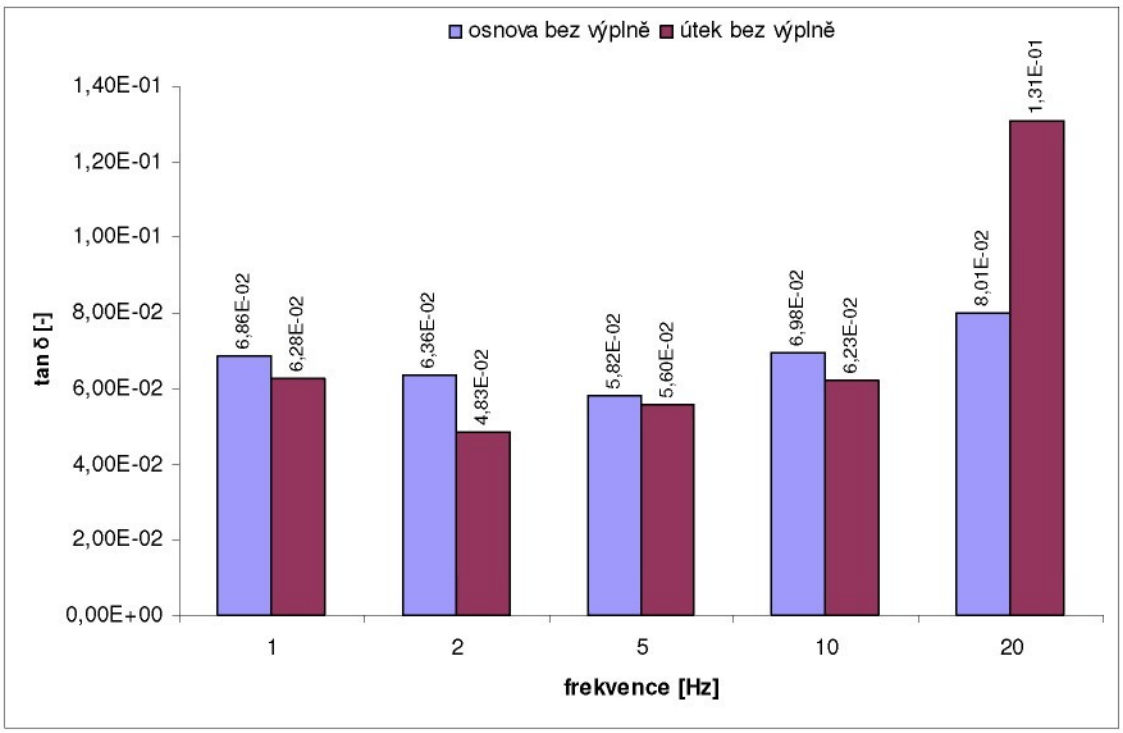
Obr. 4.1: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti *E* na frekvenci, pro osnovu a útek bez krátkovlákenné čedičové výplně.



Obr. 4.2: Graf závislosti reálného modulu pružnosti *E´* na frekvenci, pro osnovu a útek bez krátkovlákenné čedičové výplně.



Obr. 4.3: Graf závislosti imaginárního modulu pružnosti *E´´* na frekvenci, pro osnovu a útek bez krátkovlákenné čedičové výplně.



Obr. 4.4: Graf závislosti ztrátového úhlu tan *δ*[-] na frekvenci, pro osnovu a útek bez krátkovlákenné čedičové výplně.

Na předešlých grafech (4.1, 4.2, 4.3) kde na ose Y je znázorněn komplexní modul pružnosti E, reálná složka modulu pružnosti E´ a imaginární složka modulu pružnosti E´´nejsou vidět žádné markantní rozdíly. U hodnot do 5 Hz je charakter grafu stoupající a pak dále s přibývající frekvencí klesá. Sledovaná veličina má pro směr osnovy vyšší hodnotu. Nejvyšší hodnot modulu pružnosti *E* bylo dosaženo při frekvenci 5 Hz.

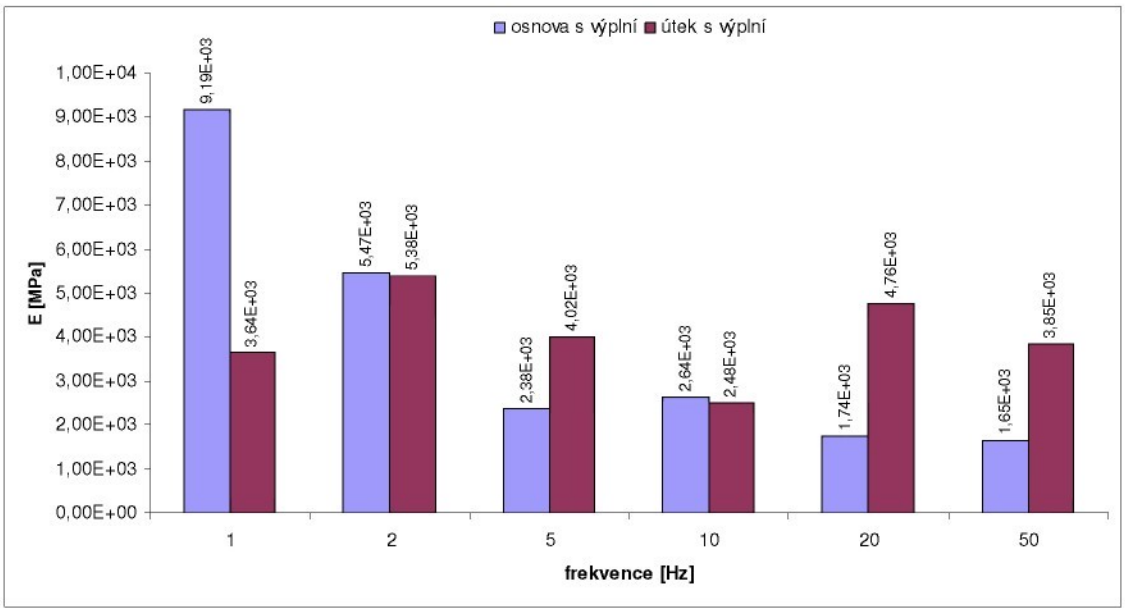
U grafu 4.4 je zobrazen ztrátový úhel v závislosti na frekvenci. Vidíme, že graf má stoupající charakter od frekvence 5 Hz.

Tab. 4.3: Hodnoty pro směr osnovy s krátkovlákennou čedičovou výplní

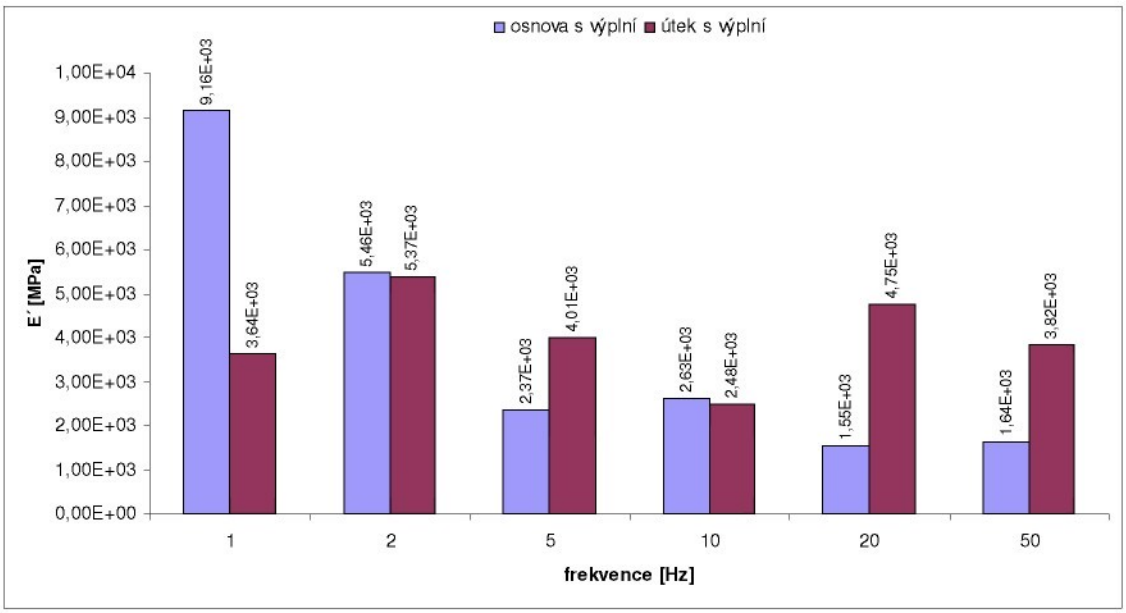
	tloušťka vzorku	šířka vzorku	komplexní modul pružnosti	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	ztrátový činitel
frekvence [Hz]	h [mm]	b [mm]	E [MPa]	E´ [MPa]	E´´ [MPa]	tan δ [-]
1	3,00	10,90	9,19E+03	9,16E+03	3,65E+02	3,97E-02
2	3,10	10,80	5,47E+03	5,46E+03	2,81E+02	5,14E-02
5	4,00	10,75	2,38E+03	2,37E+03	1,22E+02	5,78E-02
10	4,00	10,45	2,64E+03	2,63E+03	1,15E+02	4,49E-02
20	4,20	10,80	1,74E+03	1,55E+03	1,73E+02	9,45E-02
50	4,00	10,95	1,65E+03	1,64E+03	1,41E+02	9,15E-02

Tab. 4.4: Hodnoty pro směr útku s krátkovlákennou čedičovou výplní

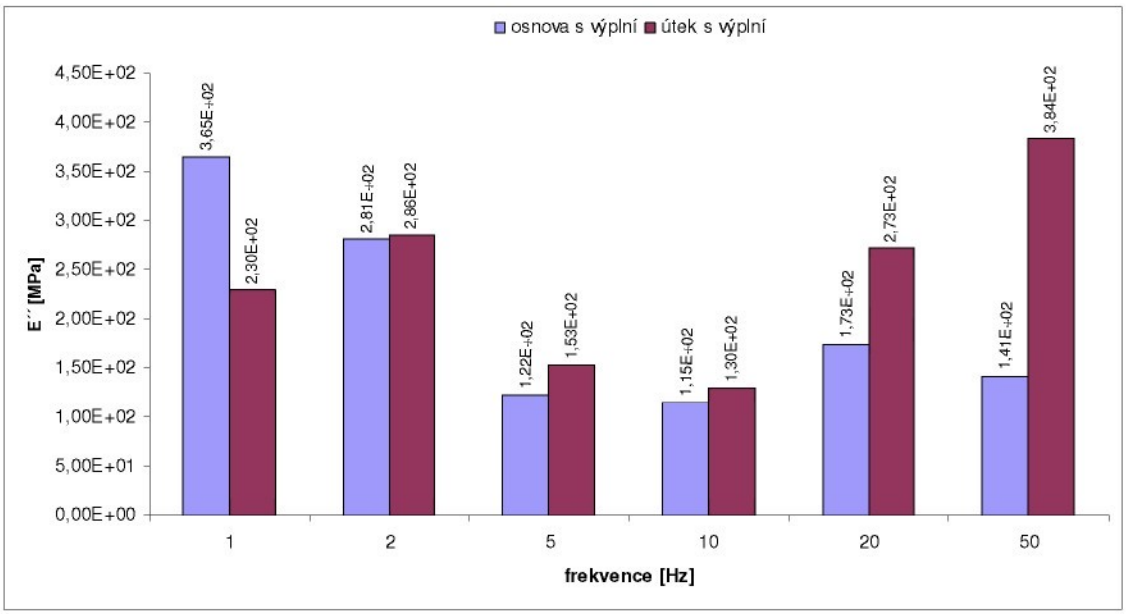
	tloušťka vzorku	šířka vzorku	komplexní modul pružnosti	reálný modul pružnosti	imaginární modul pružnosti	ztrátový činitel
frekvence [Hz]	h [mm]	b [mm]	E [MPa]	E´ [MPa]	E´´ [MPa]	tan δ [-]
1	3,40	10,80	3,64E+03	3,64E+03	2,30E+02	6,31E-02
2	3,10	10,80	5,38E+03	5,37E+03	2,86E+02	5,31E-02
5	3,80	10,90	4,02E+03	4,01E+03	1,53E+02	4,04E-02
10	4,00	10,75	2,48E+03	2,48E+03	1,30E+02	5,37E-02
20	3,60	10,60	4,76E+03	4,75E+03	2,73E+02	5,87E-02
50	3,85	10,90	3,85E+03	3,82E+03	3,84E+02	1,08E-01



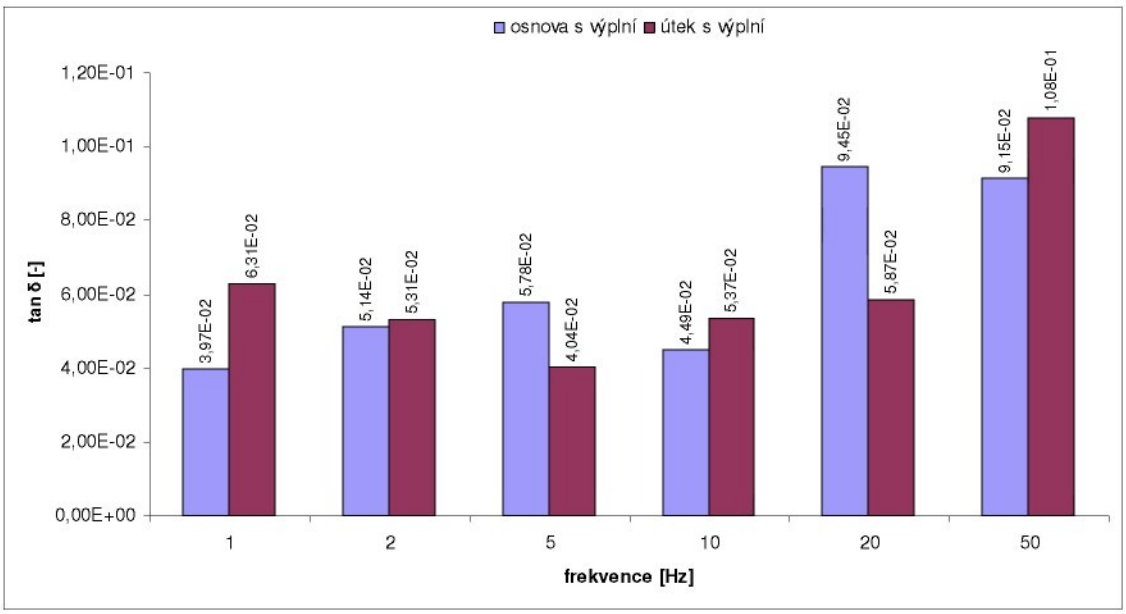
Obr. 4.5: Graf závislosti komplexního modulu pružnosti *E* na frekvenci, pro osnovu a útek s krátkovlákennou čedičovou výplní.



Obr. 4.6: Graf závislosti reálného modulu pružnosti *E´* na frekvenci, pro osnovu a útek s krátkovlákennou čedičovou výplní



Obr. 4.7: Graf závislosti imaginárního modulu pružnosti *E´´* na frekvenci, pro osnovu a útek s krátkovlákennou čedičovou výplní.

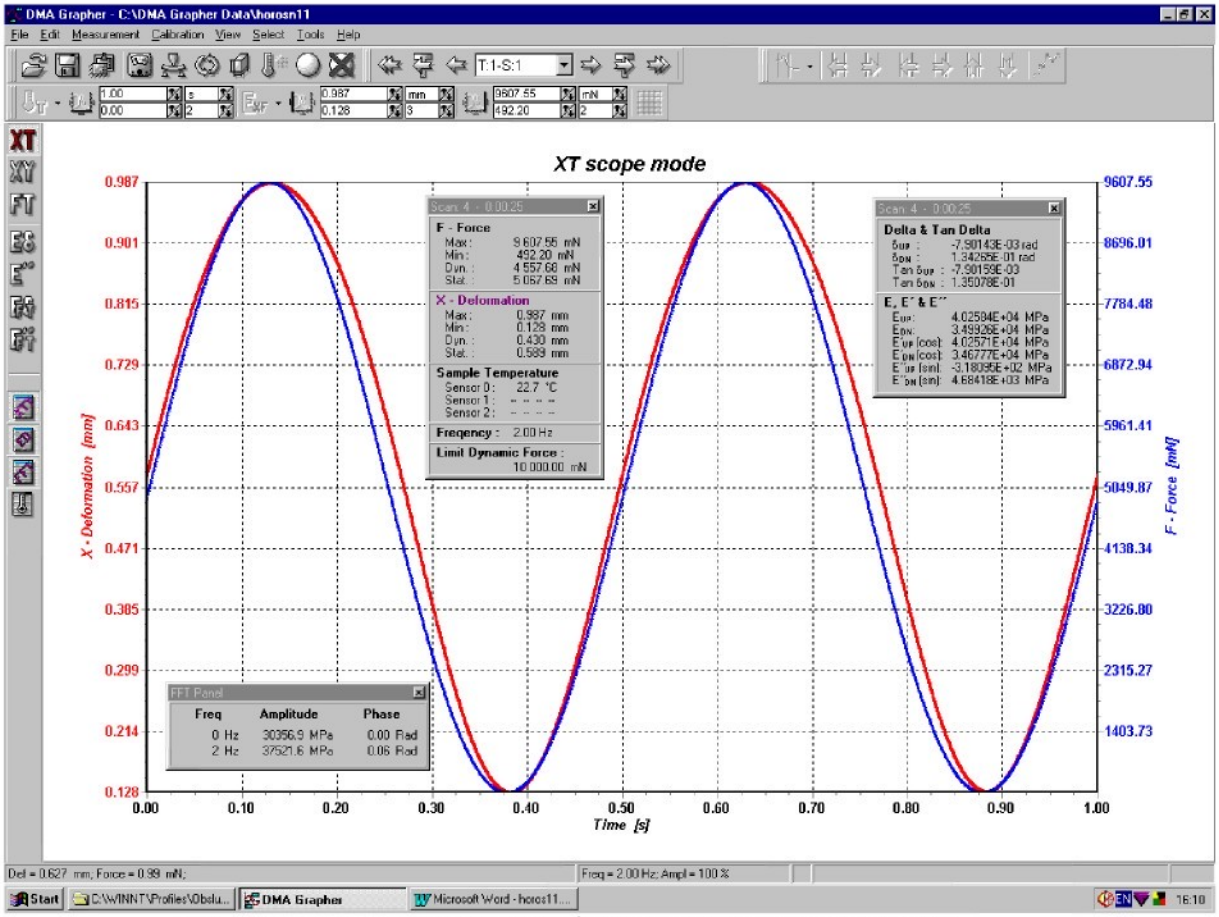


Obr. 4.8: Graf závislosti ztrátového úhlu tan *δ* [-] na frekvenci, pro osnovu a útek s krátkovlákennou čedičovou výplní.

U grafu 4.8 je zobrazen ztrátový úhel v závislosti na frekvenci. Vidíme, že graf má stoupající charakter od frekvence 5 Hz. U měření kompozitů bez čedičové výplně je graf stejného charakteru. Zde lze spatřit, že u frekvence 50 Hz je hodnota na maximu. Pak už nebylo možno provádět měření, protože přístroj DMA nemá jiné parametry mezi frekvencí 50 Hz a 100 Hz. Frekvence 100 Hz je hodnota tak vysoká, že nejde změřit.

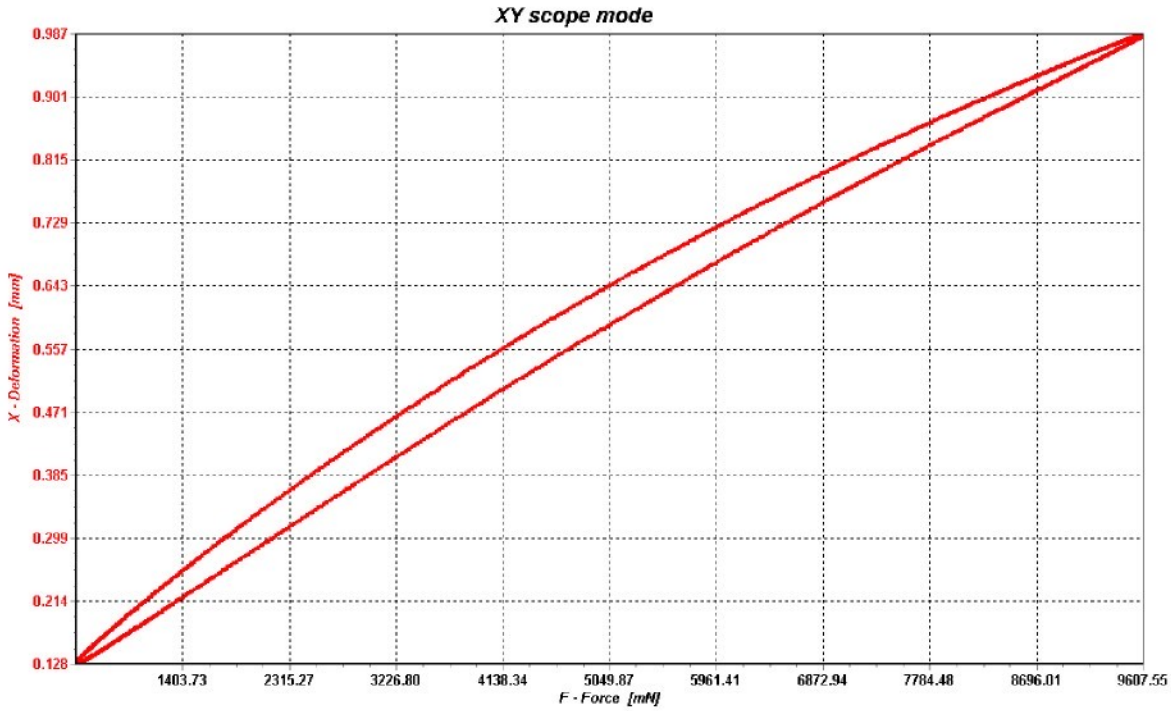
Třívrstvý kompozit (čedičová tkanina-čedičový krátkovlákenný odpad-čedičová tkanina) umožnil měření při vyšší frekvenci.

Zobrazení výstupních parametrů z DMA, pro frekvenci 2 Hz bez krátkovlákenné čedičové výplně.
Poznámka: Další ukázky grafů jsou na přiloženém CD.



Obr. 4.9: Graf ukazuje skutečné průběhy síly a deformace na vzorku.

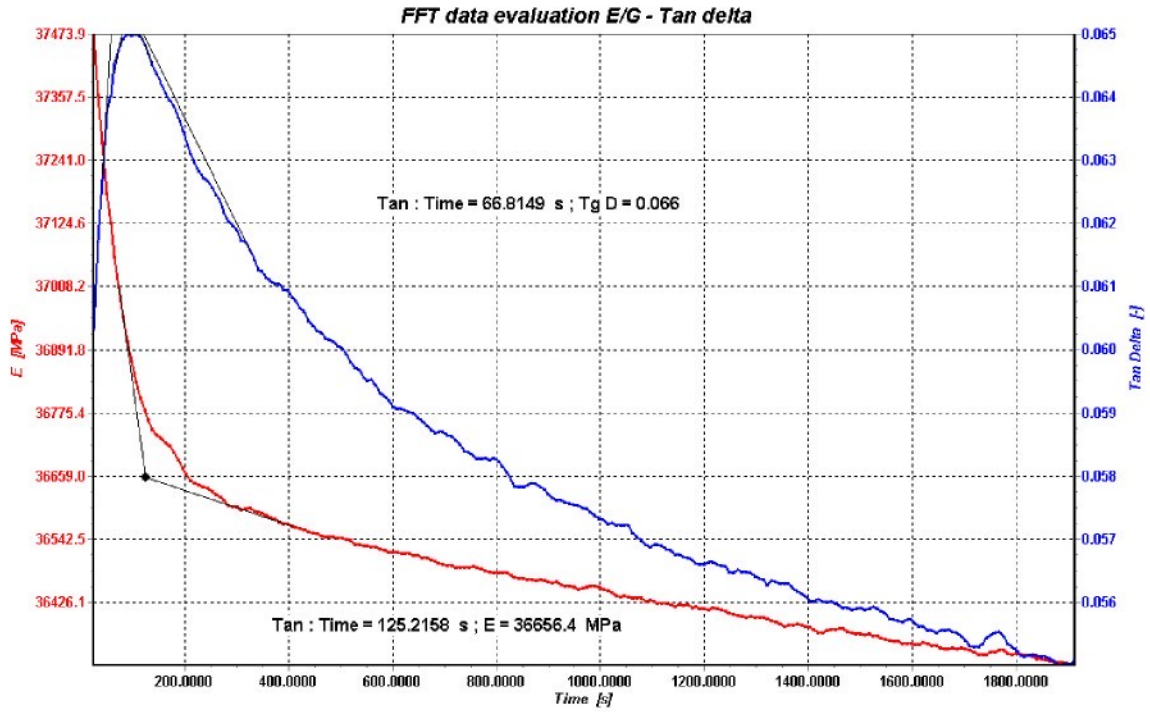
V obrázku (4.9) lze případně detekovat chybné měření (např. z důvodu špatného upnutí nebo poškození vzorku). Další detekcí je nalezení optimálního kompromisu mezi velikostí vkládané síly a deformací pro zajištění maximální přesnosti měření.



Obr. 4.10: Hysterezní smyčka vzorku.

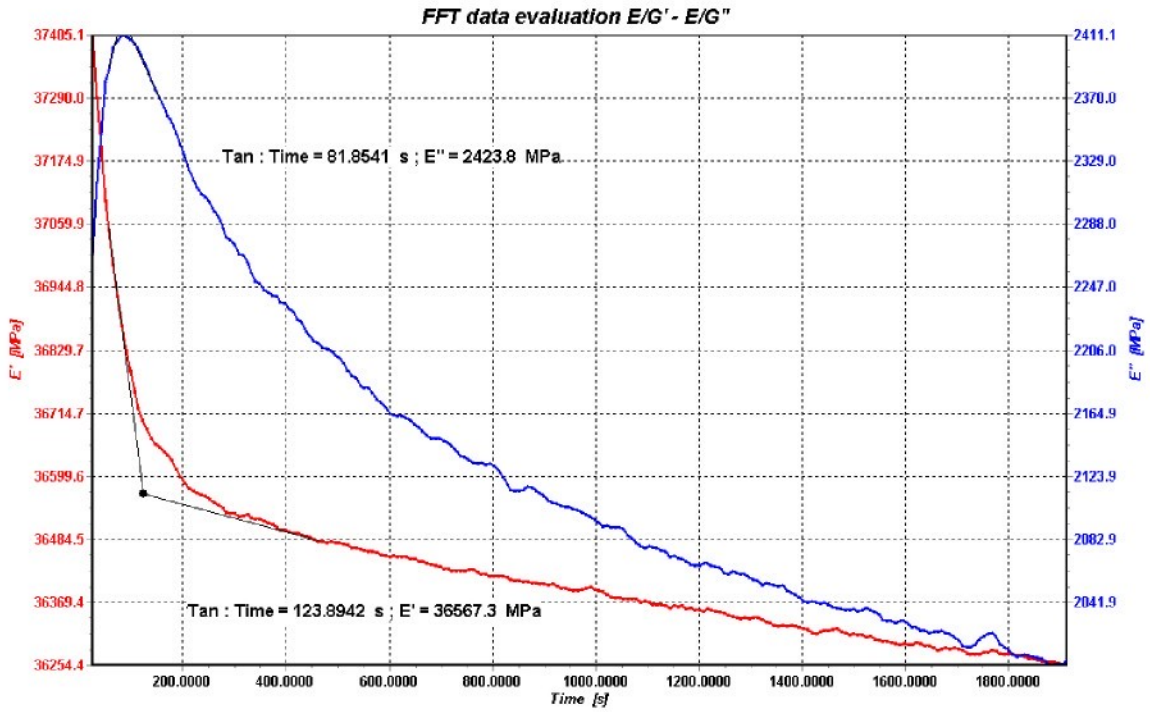
Z plochy u obrázku (4.10) je možné spočítat mechanické ztráty testovaného vzorku, které se mění na teplo. Zjištění je důležité k posouzení vlastností materiálů u mechanického namáhání nebo k určení jejich tlumících schopností.

Pokud je působící síla sinusová a odezva vzorku je lineární, má hysterezí smyčka tvar elipsy.



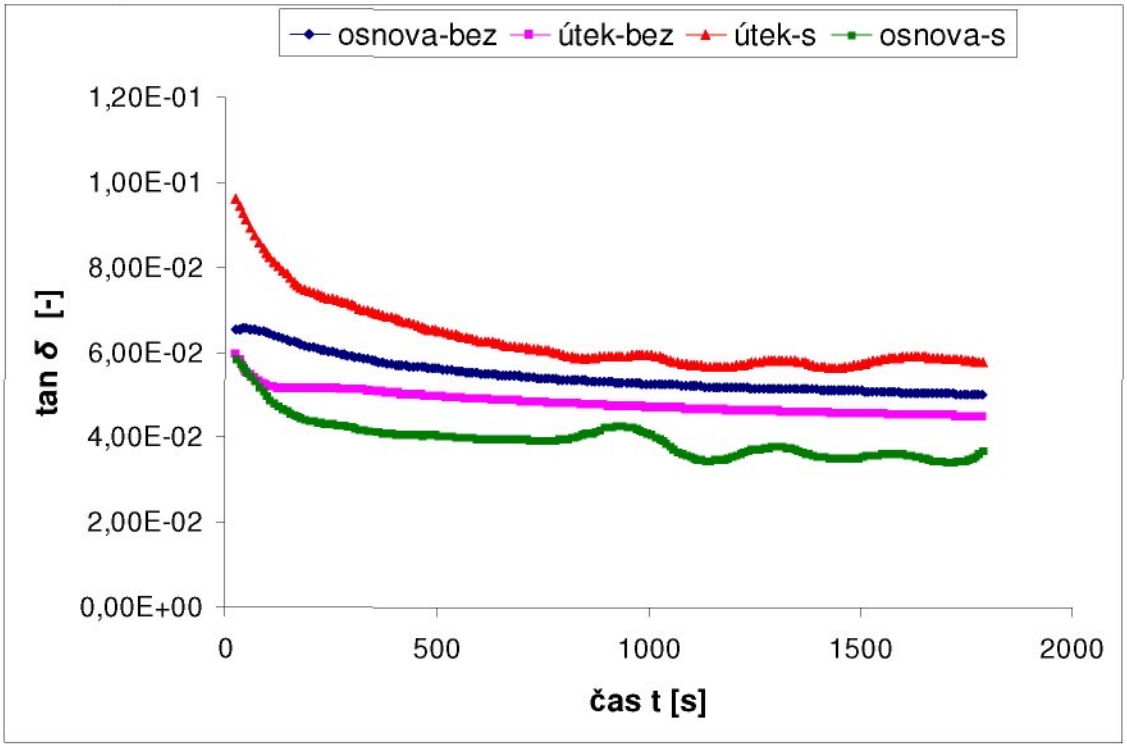
Obr. 4.11: Graf vlivu frekvence na komplexní modul pružnosti *E* a ztrátový činitel tan δ.

Na grafu je provedeno vyhodnocení pomocí dvou tečen.

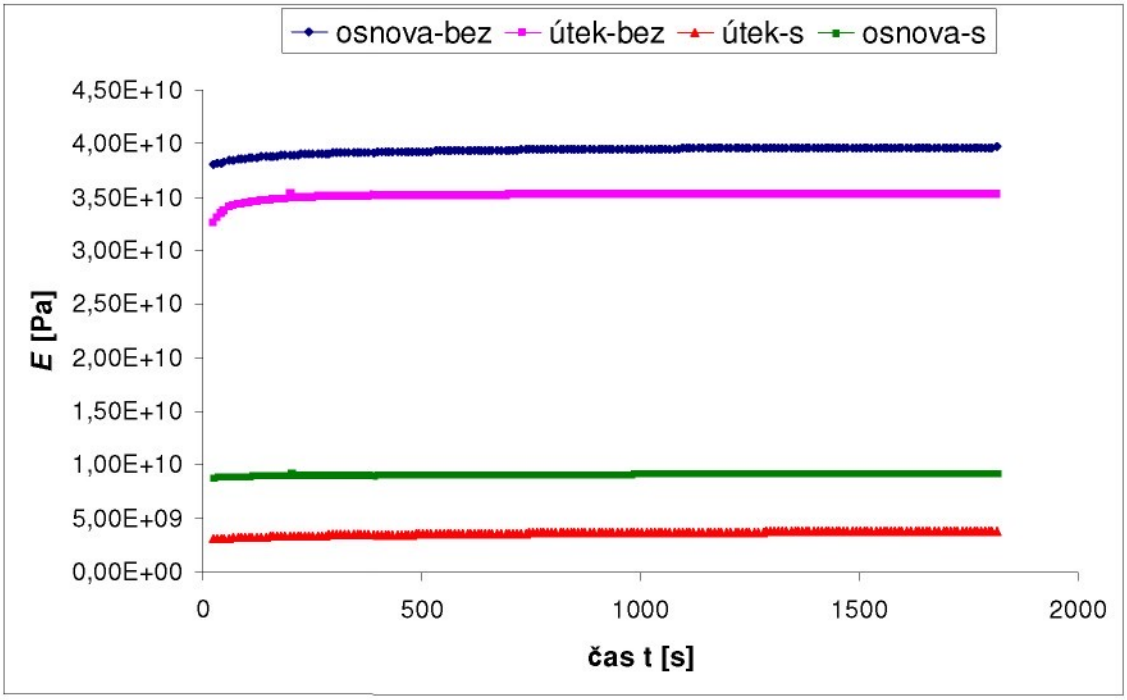


Obr. 4.12: Graf vlivu frekvence na reálnou *E´* a imaginární *E´´* složku modulu pružnosti

Grafické porovnání naměřených hodnot.

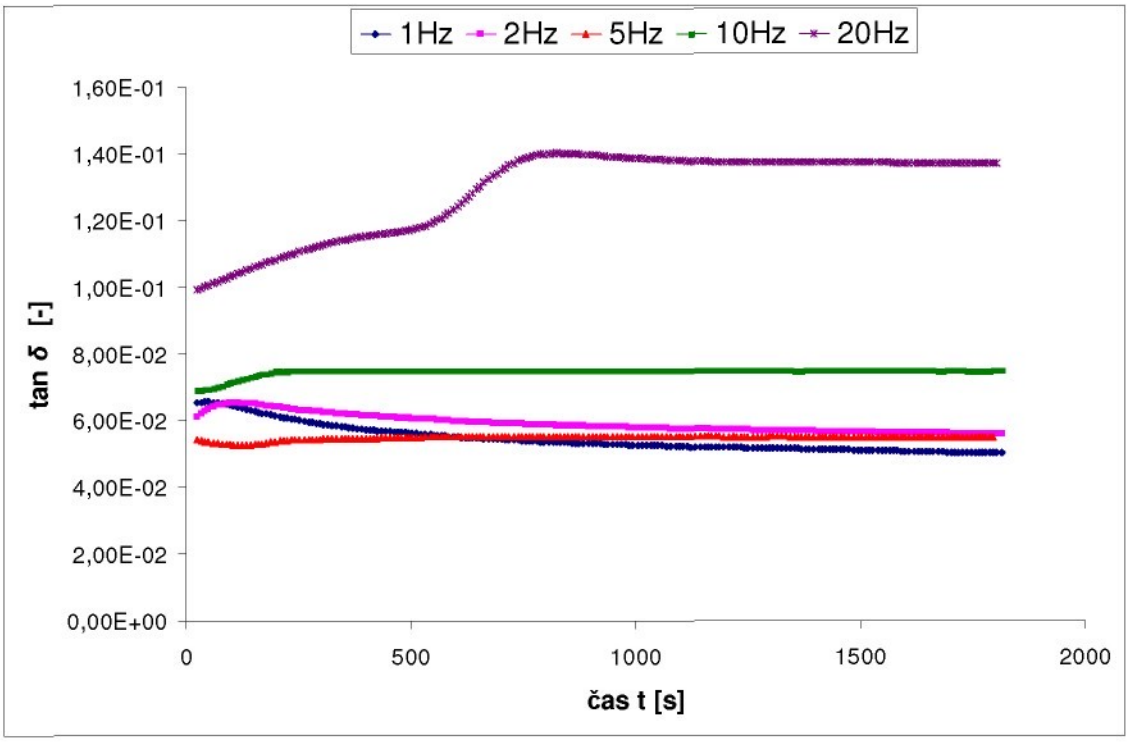


Obr. 4.13: Graf časové závislosti *t* [s] na ztrátové činiteli tan *δ* [-]

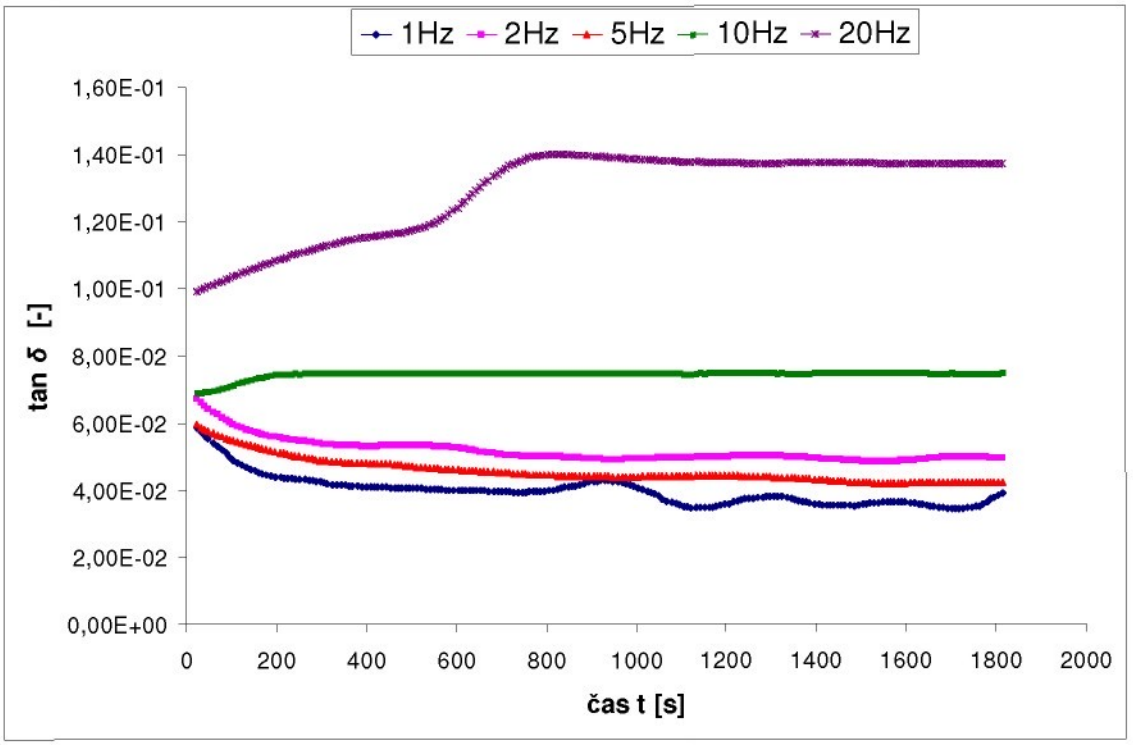


Obr. 4.14: Graf časové závislosti *t* [s] na modulu pružnosti *E* [Pa]

Na obrázku 4.13 vidíme graf průběhu ztrátového úhlu s klesající tendencí, čím je časový interval delší tím úhel *δ* klesá. Bez rozdílu postavení vláken nebo jestli je kompozit s čedičovou krátkovlákennou výplní nebo bez ní.

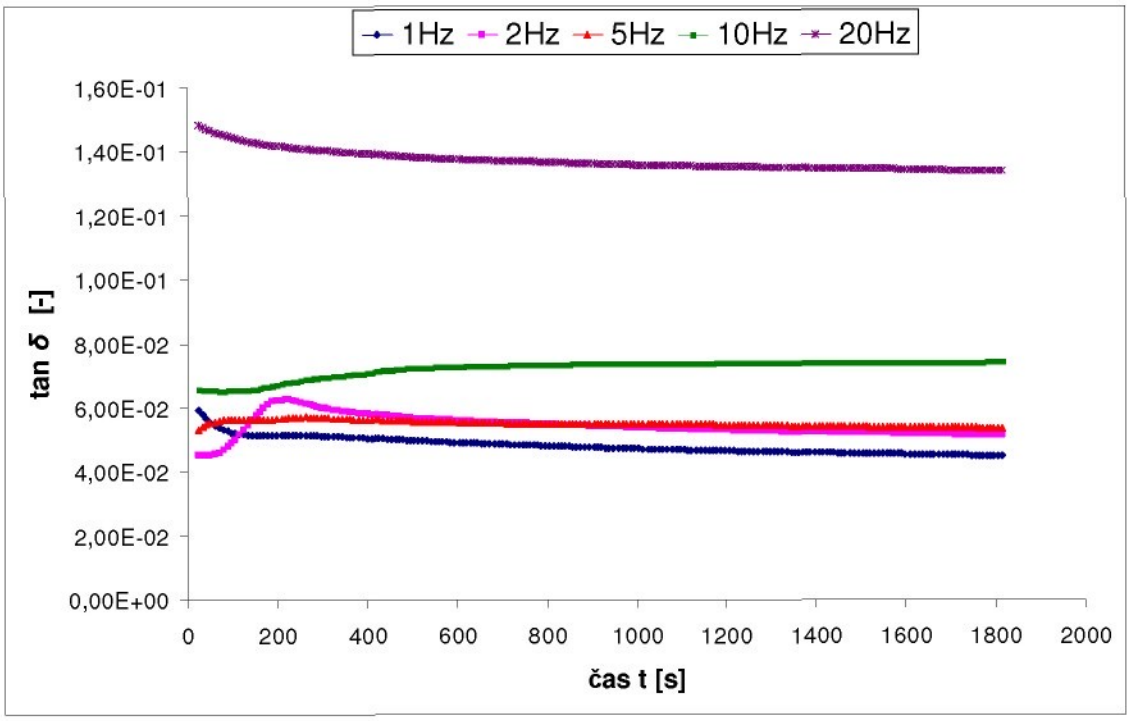


Obr. 4.15: Graf časové závislosti *t* [s] na ztrátové činiteli tan *δ* [-] dvouvrstvého kompozitu (čedičová tkanina-čedičová tkanina) ve směru osnovy

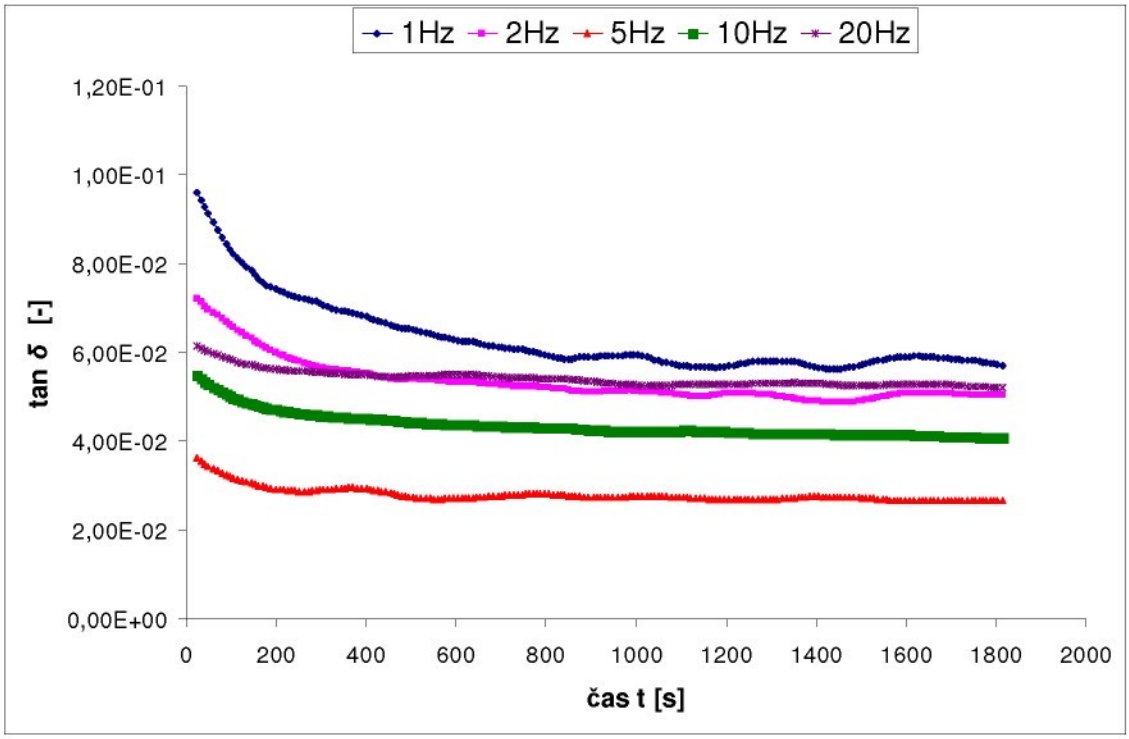


Obr. 4.16: Graf časové závislosti *t* [s] na ztrátové činiteli tan*δ* [-] třívrstvého kompozitu (čedičová tkanina-krátkovlákenný čedičový odpad-čedičová tkanina) ve směru osnovy

Na obrázcích 4.15 a 4.16 vidíme, že pokud je frekvence do 10 Hz, tak na grafech nejsou znatelné změny. Při větší frekvenci jako např. 20 Hz, může ztrátový úhel mít stoupající charakter.



Obr. 4.17: Graf časové závislosti *t* [s] na ztrátové činiteli tan *δ* [-] dvouvrstvého kompozitu (čedičová tkanina-čedičová tkanina) ve směru útku



Obr. 4.18: Graf časové závislosti *t* [s] na ztrátové činiteli tan *δ* [-] třívrstvého kompozitu (čedičová tkanina-krátkovlákenný čedičový odpad-čedičová tkanina) ve směru osnovy útku

Na grafu 4.17 jsou hodnoty totožné, a to v průběhu celého grafu. Jen u frekvence 20 Hz je počáteční hodnota vyšší, ale pak se ustálí na jedné hladině.

Čedičová výplň nemusela odolat frekvenci a proto je graf 4.18 klesajícího charakteru. Čím byla frekvence nižší, tím hodnota klesání grafu byla strmější.

Poznámka: Na přiloženém CD je víc grafů, na kterých je zřetelnější závislost času na ztrátovém činiteli.

4.1.2 Charpy test

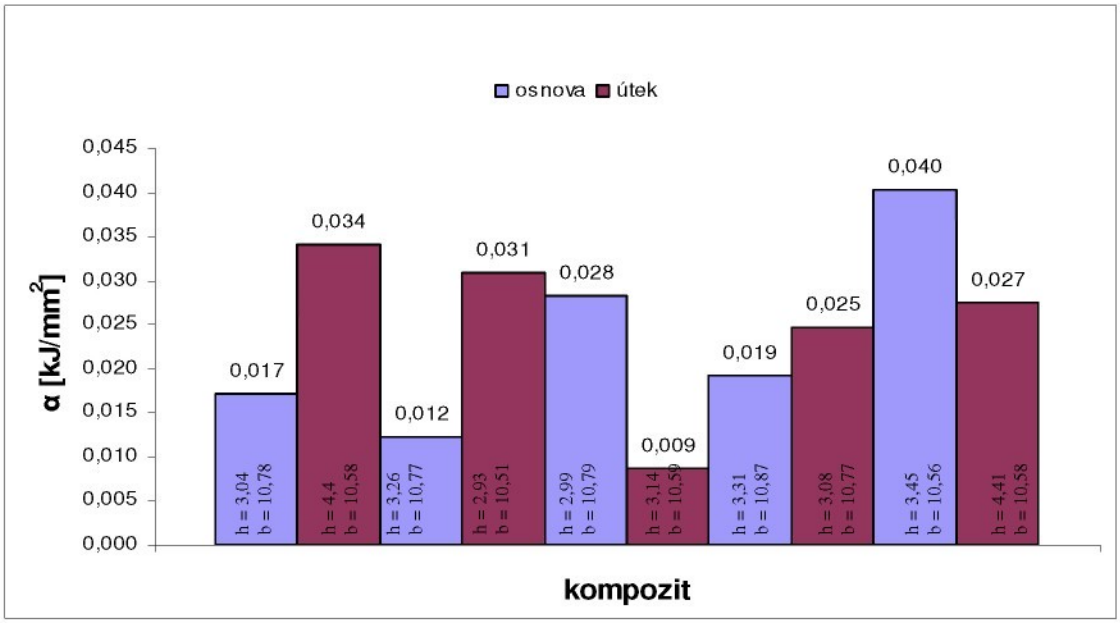
Charpy test byl prováděn na vzorcích velikosti cca 40 x 10 mm (přesné údaje v tab. 4.1) o různých tloušťkách, kde h [mm] je tloušťka vzorku, b [mm] je šířka vzorku, E_{max} [J] je konečná energie, kterou tyč naráží na zkoušený vzorek a α [kJ/mm²] je energie působící při nárazu na vzorek, jež je vypočítána dle vztahu 4.1.

Toto měření proběhlo pouze pro vzorky čedičová tkanina + čedičový odpad. Vzorky bez čedičové výplně nešly na Charpyho kladivu použít, protože byly mimo rozsah přístroje.

$$E = \frac{E_{max}}{h.b} \tag{4.1}$$

Tab. 4.5: Hodnoty pro Charpy test

kompozit	tloušťka	šířka	konečná energie	energie nárazu
	h[mm]	b[mm]	E_{max} [J]	α [kJ/mm^2]
osnova 1	3,04	10,78	0,56	0,017
osnova 2	3,26	10,77	0,43	0,012
osnova 3	2,99	10,79	0,91	0,028
osnova 4	3,31	10,87	0,69	0,019
osnova 5	3,45	10,56	1,47	0,040
útek 1	4,4	10,58	1,59	0,034
útek 2	2,93	10,51	0,95	0,031
útek 3	3,14	10,59	0,29	0,009
útek 4	3,08	10,77	0,82	0,025
útek 5	4,41	10,58	1,28	0,027



Obr. 4.19: Graf potřebné energie na průraz/tloušťka materiálu v přepočtu na [kJ/mm^2]

*Poznámka: Tloušťka vzorku **h** a šíře vzorku **b** je udávána v [mm].*

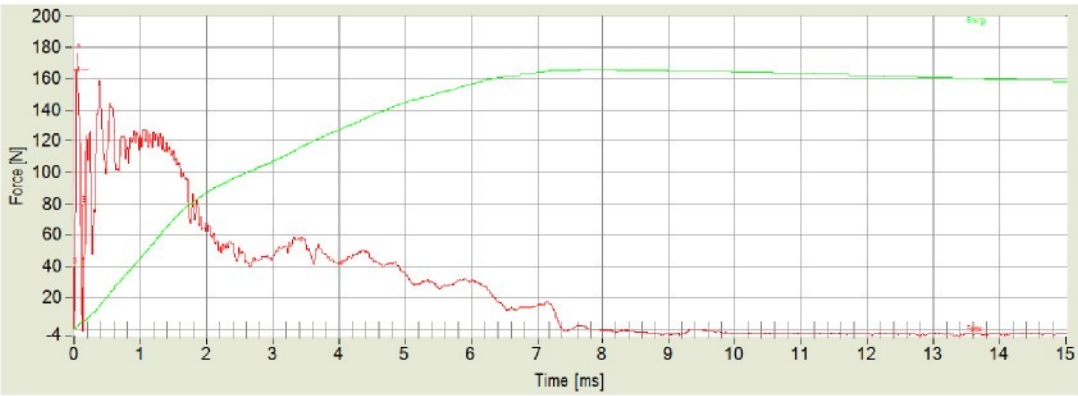
Pokud zkoušené kompozity budou stejných parametrů, stejná tloušťka a šířka tak hodnoty v tabulce 4.5 budou podobné. Čím je kompozit rozměrově větší tím i jeho hodnota v grafu 4.19 stoupá. Zde záleží na tom, zda kompozit byl správně vyroben a to bez bublin a defektů.

U vzorku typu 2 (konkrétně útek 3) je vidět, že hodnota je nízká oproti jiným. To může být způsobeno nedokonalým kompozitem, ve kterém mohly být bubliny nebo jiné defekty.

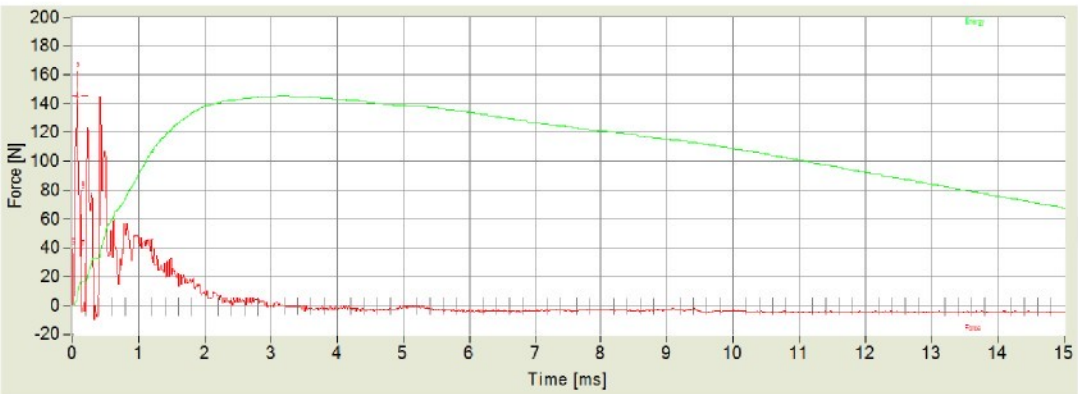
Vzorky kompozitů jsou teoreticky srovnatelné, protože je to přepočteno na průřez vzorku, ale vlivem defektů ve struktuře a jiného objemového poměru tkanina a krátkovlákenný čedičový odpad, jsou vidět rozdíly naměřených hodnot.

Nejlepší znázornění je u vzorku typu 2 (osnova 5 a útek 5), když je tloušťka u kompozitu typu 2 (útek 5) o 0,96 mm větší, tak přesto hodnota v grafu je menší. Proto záleží na směru (osnova nebo útek).

Osnovní dostava = 160 nití/10 cm a útková dostava = 70 nití/10 cm.



Obr. 4.20: Ukázka průběhu zkoušky kompozitním materiálu čedičová tkanina/čedičový odpad, při působení kladivem kolmo na směr osnovy (maximální hodnota).



Obr. 4.21: Ukázka průběhu zkoušky kompozitním materiálu čedičová tkanina/čedičový odpad, při působení kladivem kolmo na směr útku (minimální hodnota).

Ukázky grafů pro maximální a minimální hodnotu měření.

4.1.3 Falling test

Na přístroji Fractovis bylo falling testem proměřeno 5 vzorků o velikosti 60 x 60 mm. Průměrné naměřené hodnoty jsou umístěny do tabulky 4.6 a 4.7.

Pokud se D_i (ductility index) materiálu pohybuje kolem 1, vypovídá to o něm, že je velmi křehký, lámavý a bez plastické deformace. Je-li D_i materiálu hodnota kolem 0, charakterizuje se materiál jako tuhý, houževnatý, kdy je spotřebována vysoká deformační energie, je vysoká tuhost a plastická deformace v průběhu průrazu.

$$E_P = \frac{E_{\max}}{h} \tag{4.2}$$

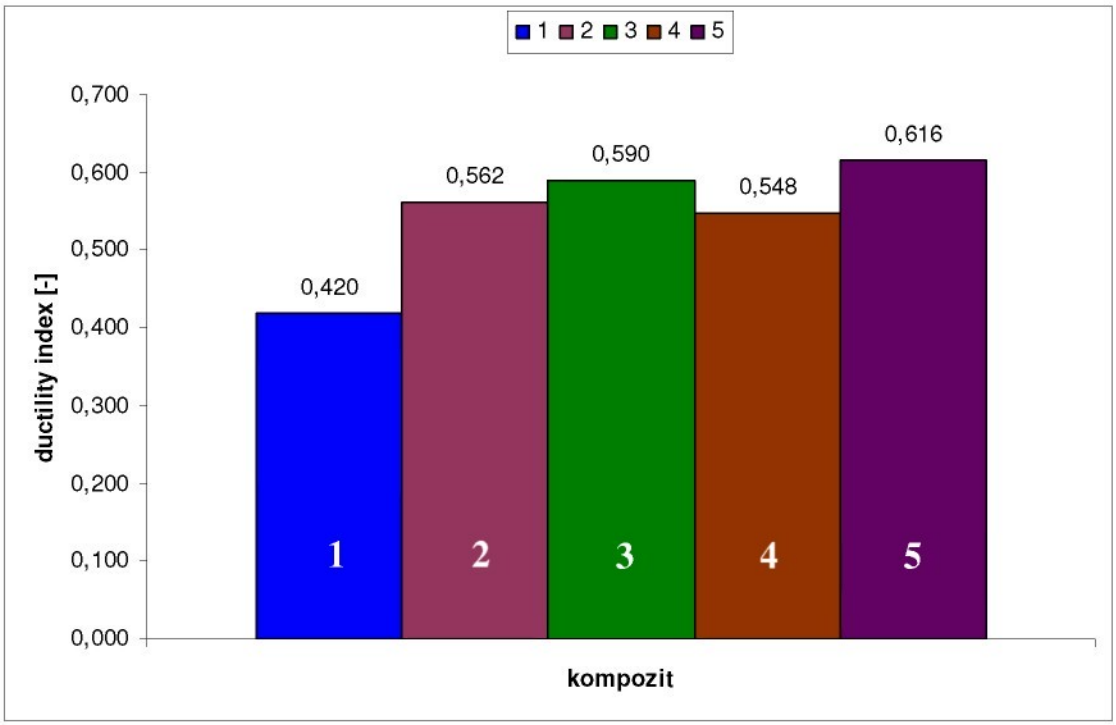
$$D_i = \frac{E_{\max} - E_{F\max}}{E_{\max}} \tag{4.3}$$

Kde h [mm] je tloušťka jednotlivých typů vzorků, E_{Fmax} [J] je počáteční energie, kterou průrazová tyč působí na vzorek, E_{max} [J] je konečná energie, E_p [J/mm] je energie, kterou je zapotřebí vynaložit při průrazu vzorku jež vychází ze vzorce 4.2, D_i [-] je index tažnosti, jež vychází ze vzorce 4.3.

Index tažnosti je charakterizován jako zkouška houževnatosti / tuhosti materiálu.

Tab. 4.6: Hodnoty naměřené pro falling test (kompozity bez výplně)

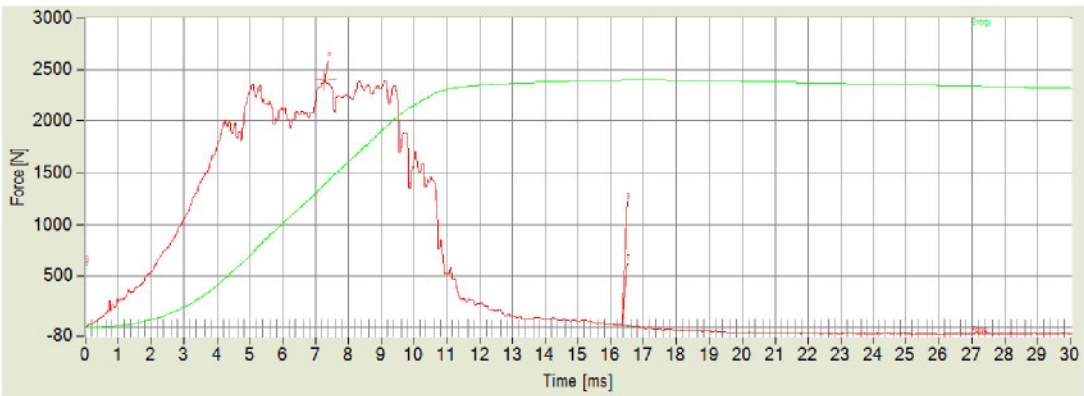
kompozit	h [mm]	E_{Fmax} [J]	E_{max} [J]	E_p [J/mm]	D_i [-]
1	0,57	25,61	44,17	77,491	0,420
2	0,58	11,82	26,99	46,534	0,562
3	0,58	8,54	20,83	35,914	0,590
4	0,59	9,15	20,26	34,339	0,548
5	0,59	10,33	26,89	45,576	0,616



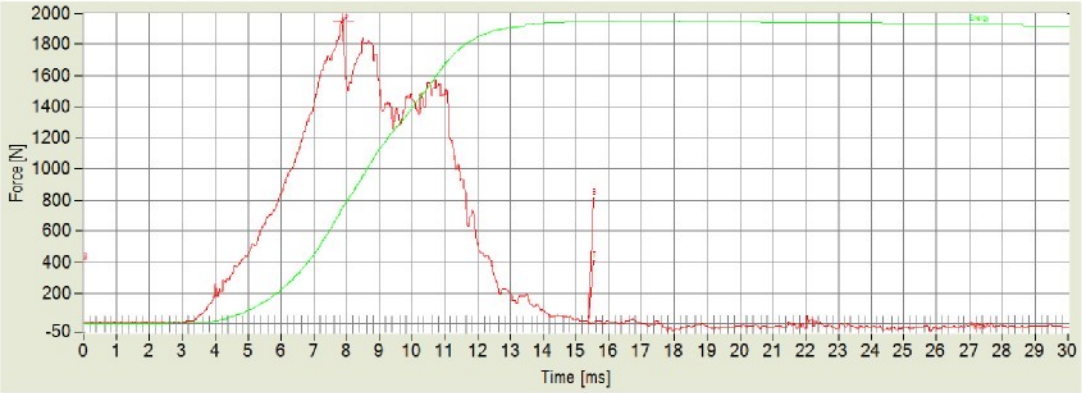
Obr. 4.22: Graf závislosti duktility indexu na tloušťce kompozitu bez použití krátkovlákenné čedičové výplně

Na obrázku č 4.22. vidíme, že u kompozitů bez čedičového odpadu tloušťka závisí na dokonalosti nasycení Lukosilem M 130 a podmínkách stlačení při vytvrzování kompozitu.

Tedy, čím je větší šířka vzorku, tak ductiliti index stoupá a to znamená, že vzorek je křehčí a lámavější. To může zapříčinit zbytečně velká vrstva matrice.



Obr. 4.23: Graf pro D_i = 0,420, průběh měření falling testu pro vzorek s minimální hodnotou D_i.

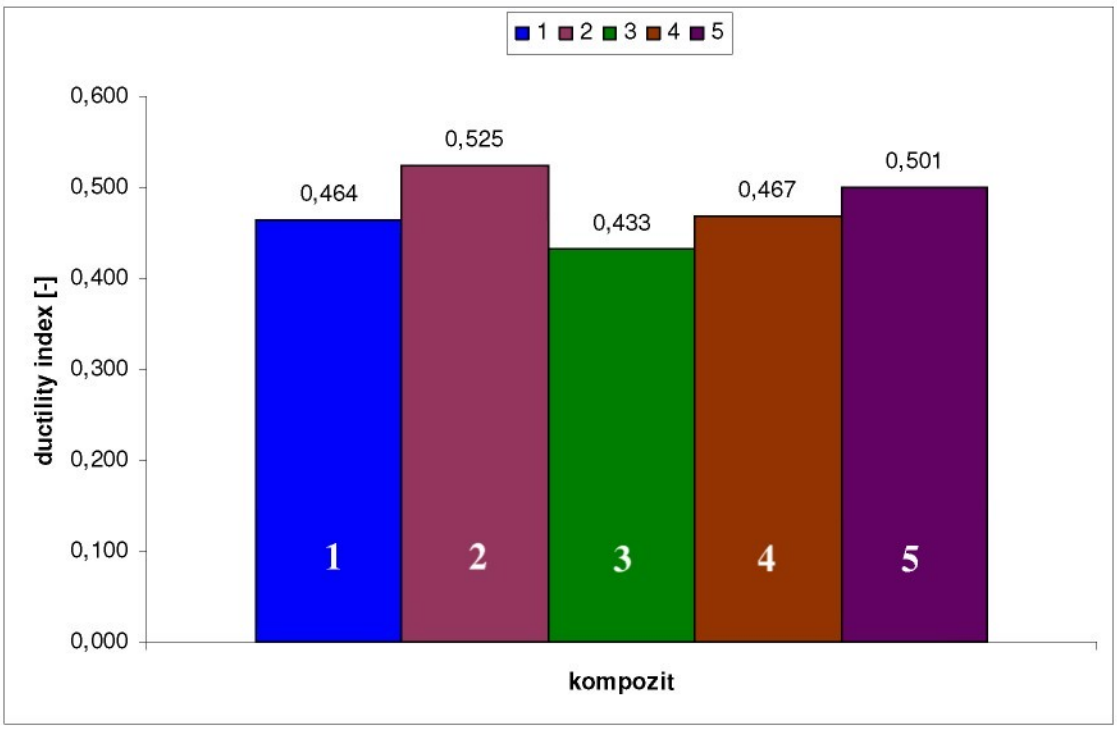


Obr. 4.24: Graf pro D_i = 0,616, průběh měření falling testu pro vzorek s maximální hodnotou D_i.

Ukázky obrázků 4.23 a 4.24 pro minimální a maximální hodnotu měření kompozitů bez čedičové krátkovlákenné výplně.

Tab. 4.7: Hodnoty naměřené pro falling test (kompozity s výplní)

kompozi	h [mm]	E_{Fmax} [J]	E_{max} [J]	E_p [J/mm]	D_i [-]
1	3,46	23,33	43,51	12,575	0,464
2	3,48	13,1	27,55	7,917	0,525
3	4,4	14,42	25,41	5,775	0,433
4	4,41	15,52	29,13	6,605	0,467
5	4,56	15,84	31,73	6,958	0,501



Obr. 4.25: Graf závislosti duktility indexu na tloušťce kompozitu s použitím krátkovlákenné čedičové výplně

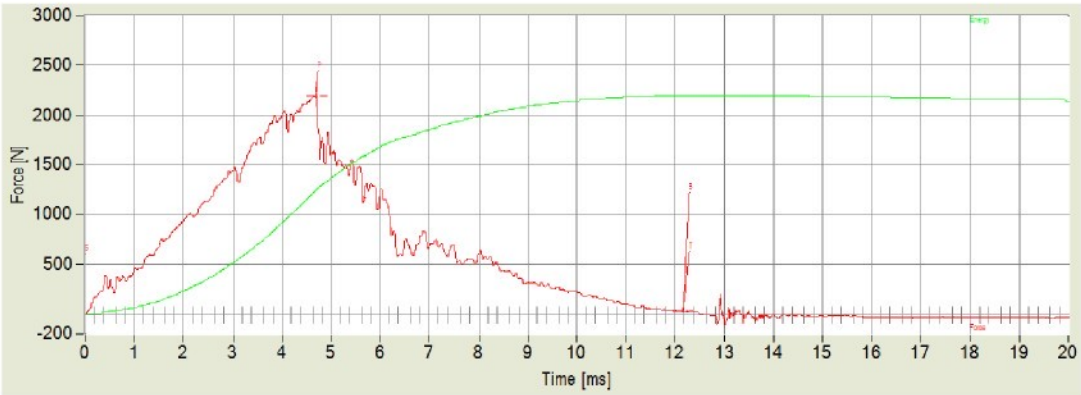
Na obr. č 4.25 máme závislost D_i kompozitu (tkanina - krátkovlákenný čedič – tkanina) na tloušťce h. U těchto kompozitů s čedičovým odpadem tloušťka závisí na dokonalém rozmístění čedičového odpadu, laku (Lukosilu M 130) a jeho následném lisování mezi desky.

Čedičový odpad mohl být nedokonale rozmístěn v kompozitu (kompozit 1 a 2), a proto došlo ke zkresleným měřením, mohlo dojít i k vytvoření bublin a jiných defektů při přípravě kompozitu.

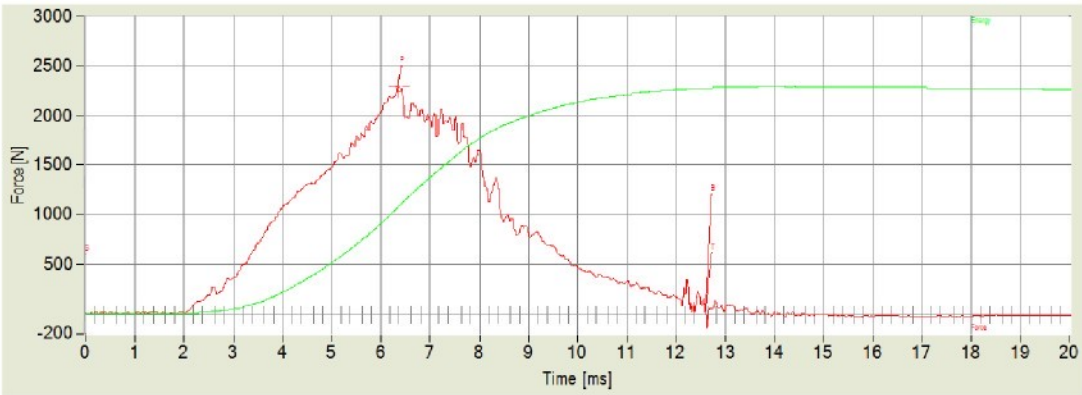
U třívrstvých kompozitů je daleko pravděpodobnější, že někde vznikne chyba, protože je tam mnohem větší vrstva a tedy větší pravděpodobnost defektu či chyby, které mohou být nedokonale uspořádány (čedičový odpad nebo lak).

U kompozitů 3, 4 ,5 je vidět, jak ductility index stoupá závisle na tloušťce kompozitu (tab. 4.7).

Kompozit se stává křehčím a lámavějším, když ductility index stoupá.



Obr. 4.26: Graf pro D_i = 0,433, průběh měření falling testu pro vzorek s minimální hodnotou D_i.



Obr. 4.27: Graf pro D_i = 0,525, průběh měření falling testu pro vzorek s maximální hodnotou D_i.

Ukázky obrázků 4.26 a 4.27 pro minimální a maximální hodnotu měření kompozitů s čedičovou krátkovlákennou výplní.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vyrobit a testovat kompozitní materiály s využitím krátkovlákenného čediče.

Kompozitní materiály jsou vyráběny v mnoha strukturách a modifikacích, jenž jsou určeny účelem použití materiálů do konkrétních průmyslových aplikací.

Pro experiment byly zvoleny 3 dynamicko – mechanické zkoušky: Fallowing test, Charpy test a 3 - point bending test na dynamicko – mechanické analýze DMA.

K sestavení kompozitů bylo zapotřebí čediočových vláken (odpadu). Tento odpadový materiál z výroby tepelných izolací nám byl poskytnut z Frýdlantských strojíren – Rasl a syn a.s.

Test na DMA byl prováděn s cílem zjistit odlišnosti chování materiálu při změně stupně namáhání. Testovány byly vzorky v obou směrech, kolmém na směr osnovy i útku.

Byly sledovány hodnoty komplexního modulu pružnosti E a ztrátového činitele tan δ. Vše bylo testováno pro frekvence 1 Hz, 2Hz, 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz a pro vzorky s krátkovlákenným čedičem, bylo uskutečněno měření při frekvenci 100 Hz. Dvouvrstvý kompozit (čediočová tkanina-čediočová tkanina) bylo možné proměřit do frekvence frekvenci 20 Hz, při vyšší frekvenci hlásil přístroj chybu měření. Stejná situace byla u třívrstvého kompozitu (čediočová tkanina-krátkovlákenný čediočový odpad-čediočová tkanina), ale hodnota frekvence byla 100 Hz. Frekvenční hodnoty mezi 50 Hz a 100 Hz neumožňuje přístroj naměřit.

U kompozitů bez čediočové výplně o nižších frekvencích 1 Hz, 2 Hz a 5 Hz hodnota komplexního modulu pružnosti stoupá a s přibývající frekvencí komplexní modul pružnosti klesá. Ztrátový činitel u těchto kompozitů bez čediočové výplně o frekvence 1 Hz, a 2 Hz byl naopak klesajícího charakteru, ale od frekvence 5 Hz hodnota stoupala.

Vlastnosti obou typů kompozitů byli nejlepší při frekvenci měření 5 Hz, jeví se tedy jako nejvhodnější pro testování tohoto typu kompozitů.

U Charpyho kladiva je soustředěna pozornost na energii, která je zapotřebí k destrukci materiálu při nárazu na vzorek. Testovány byly třívrstvé kompozity (čedičová tkanina-krátkovlákenný čedičový odpad-čedičová tkanina), protože kompozity bez čedičové výztuže byly mimo měřící rozsah přístroje.

Rozdíl mezi osnovou a útkem je minimální, ale musí souhlasit rozměrové veličiny *h* a *b*. Naměřená energie, potřebná pro destrukci vzorku, je sice přepočítávána na aktuální plochu průřezu vzorku, avšak mění se objemový poměr mezi tkaninou a množstvím krátkovlákenného čediče.

Falling test byl prováděn na stroji FRACTOVIS. U kompozitů bez čedičového odpadu tloušťka závisí na dokonalosti nasycení Lukosilem M 130 a podmínkách stlačení při vytvrzování kompozitu. U kompozitů typu 2 (čedičová tkanina - krátkovlákenný čedičový odpad - čedičová tkanina) je, vzhledem k větší tloušťce a charakteru použitého materiálu (zejména kratkovlákenného čedičového odpadu), větší pravděpodobnost výskytu defeku ve struktuře kompozitu. Pro získání přesnějších výsledků měření bude nezbytné zdokonalit přípravu pro vlastní výrobu kompozitu, poměr mísení krátkovlákenného čediče a Lukosilu M 130 pro minimalizaci defektů ve struktuře kompozitu (chuchvalců vláken,bublin a dutin).

Budoucnost těchto materiálů ještě nemůže být zcela přesně určena. Avšak díky vynikajícím dynamicko - mechanickým vlastnostem, díky své nízké hmotnosti a v neposlední řadě dobrým tepelně izolačním vlastnostem mohou být tyto materiály v budoucnosti využity například ve stavebním průmyslu.

6 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Internet [cit. 27-12-2009]: Skripta TUL Liberec
http://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-55-07.pdf

[2] Internet [cit. 27-12-2009]:
http://www.volny.cz/zkorinek

[3] Internet [cit. 3-2-2010]: Wikipedia
http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cedi%C4%8D

[4] Internet [cit. 11-11-2009]:
http://mineraly.wz.cz/magma.html#mine

[5] Internet [cit. 10-2-2010]: Společnost Basaltex a.s.
www.basaltex.cz

[6] Internet [cit. 3-1-2010]: Rockwool a.s.
www.rockwool.cz

[7] Internet [cit. 15-2-2010]: Odetka a.s.
http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx

[8] Jamborová, J.: Pevnost čedičových vláken, Diplomová práce, TU Liberec 2003

[9] Internet [cit. 25-2-2010]:
http://www.kameny.eu

[10] Internet [cit. 16-2-2010]: EUTIT s. r. o.
http://www.eutit.cz/cz/,

[11] Kunteová P.: Dynamicko mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží, Diplomová práce, TU Liberec 2009

[12] Internet [cit. 12-1-2010]: Lučební závody Kolín
http://www.lucebni.cz/main.php?action=detail&id=1

[13] Internet [cit. 12-12-2010]: Frýdlantské strojírny – Rasl a syn a.a.s.
http://www.frystroj.cz/vyroba-linky-na-mineralni-vatu.php

[14] Internet [cit. 27-12-2009]: Skripta TUL Liberec
http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf

[15] Manuál přístroje DMA DX04T (1999)

[16] Norma pro Charpy test: MSZ EN ISO 179-1: 2001 Plastics. Determination of Charpy Impact Properties. Part 1: Non-Instrumented Impact Test. (ISO 179-1: 2000)

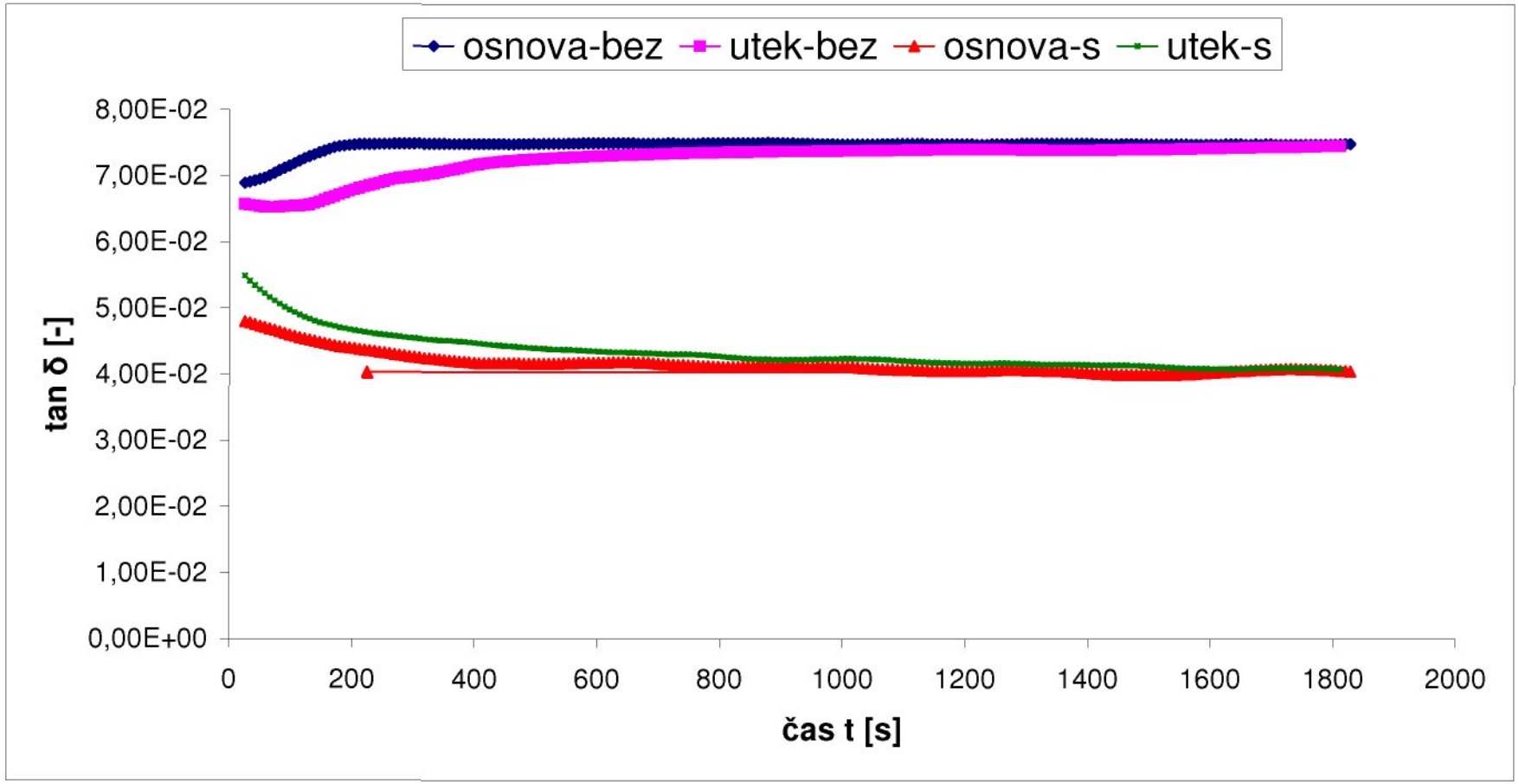
[17] Internet [cit. 15-1-2010]: Zkouška rázová-ohybová-vrubová
www.strojari.wz.cz/kom/razova_zkouska.htm

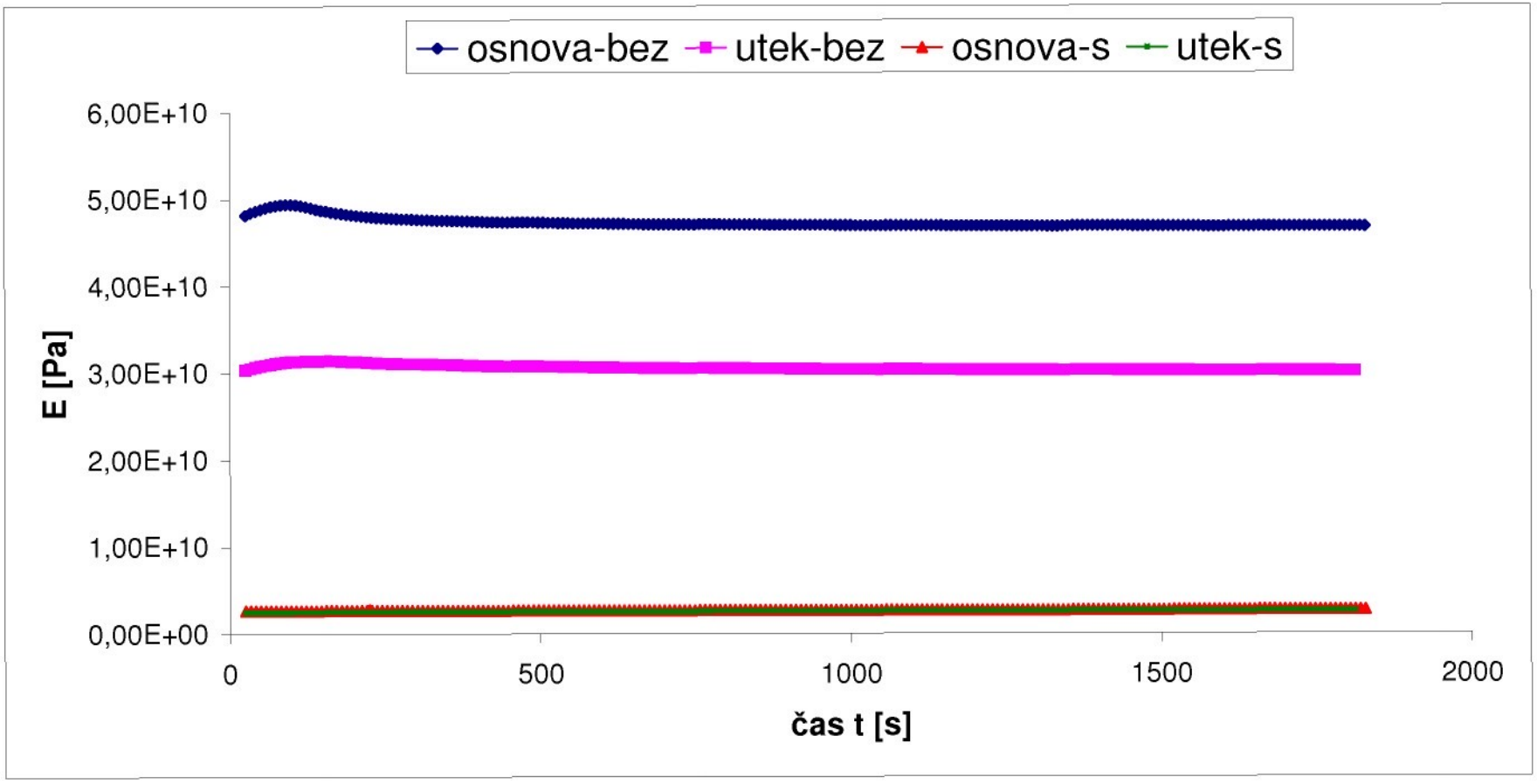
[18] Internet [cit. 2-2-2010]:
http://www.ccsi-inc.com/p-impact-ceast-resil-impactor-6963.htm

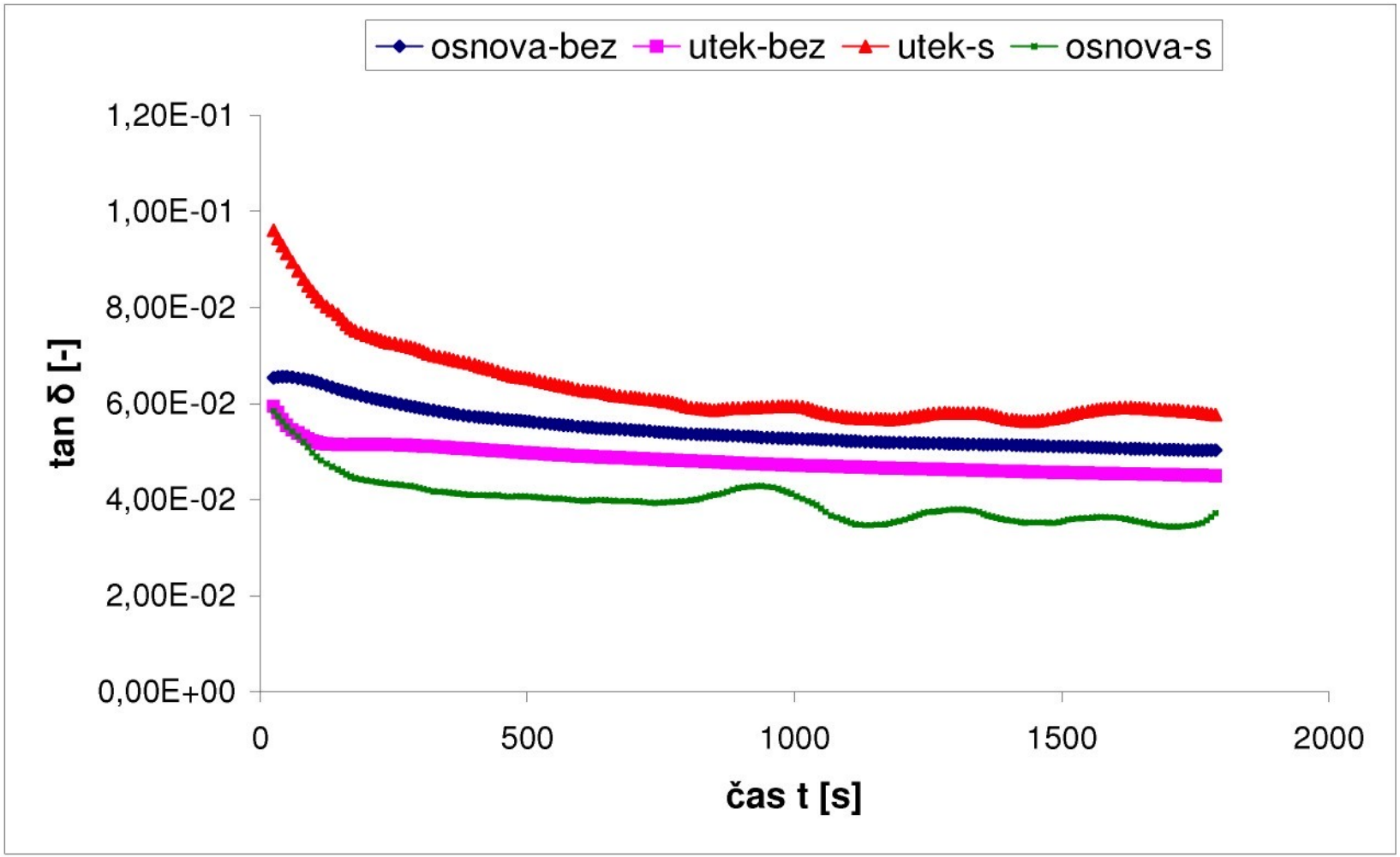
[19] Internet [cit. 2-2-2010]:
http://www.ceast.com/ceastrel2/FamiglieProdotti.asp?idt=40

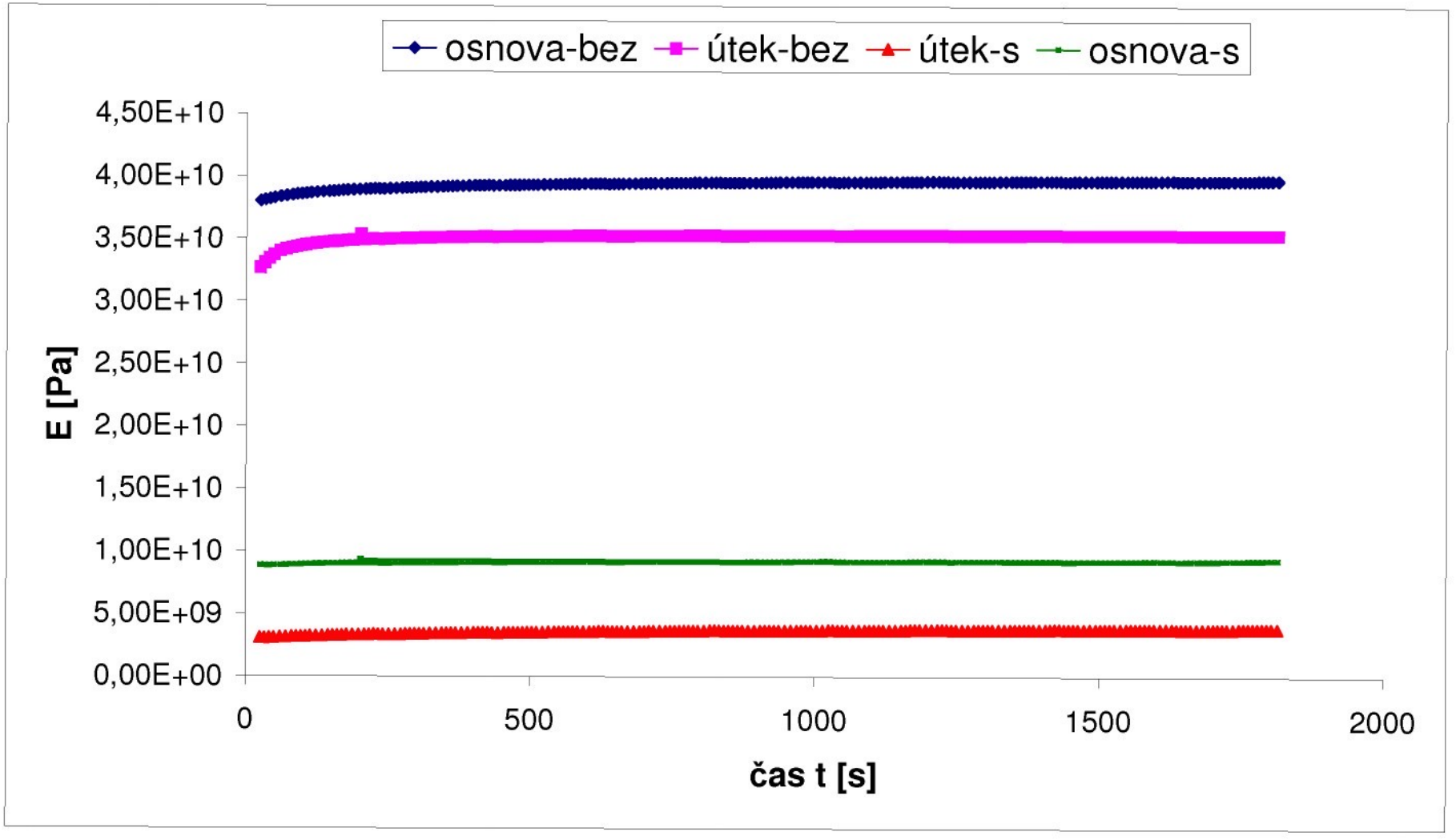
7 SEZNAM PŘÍLOH

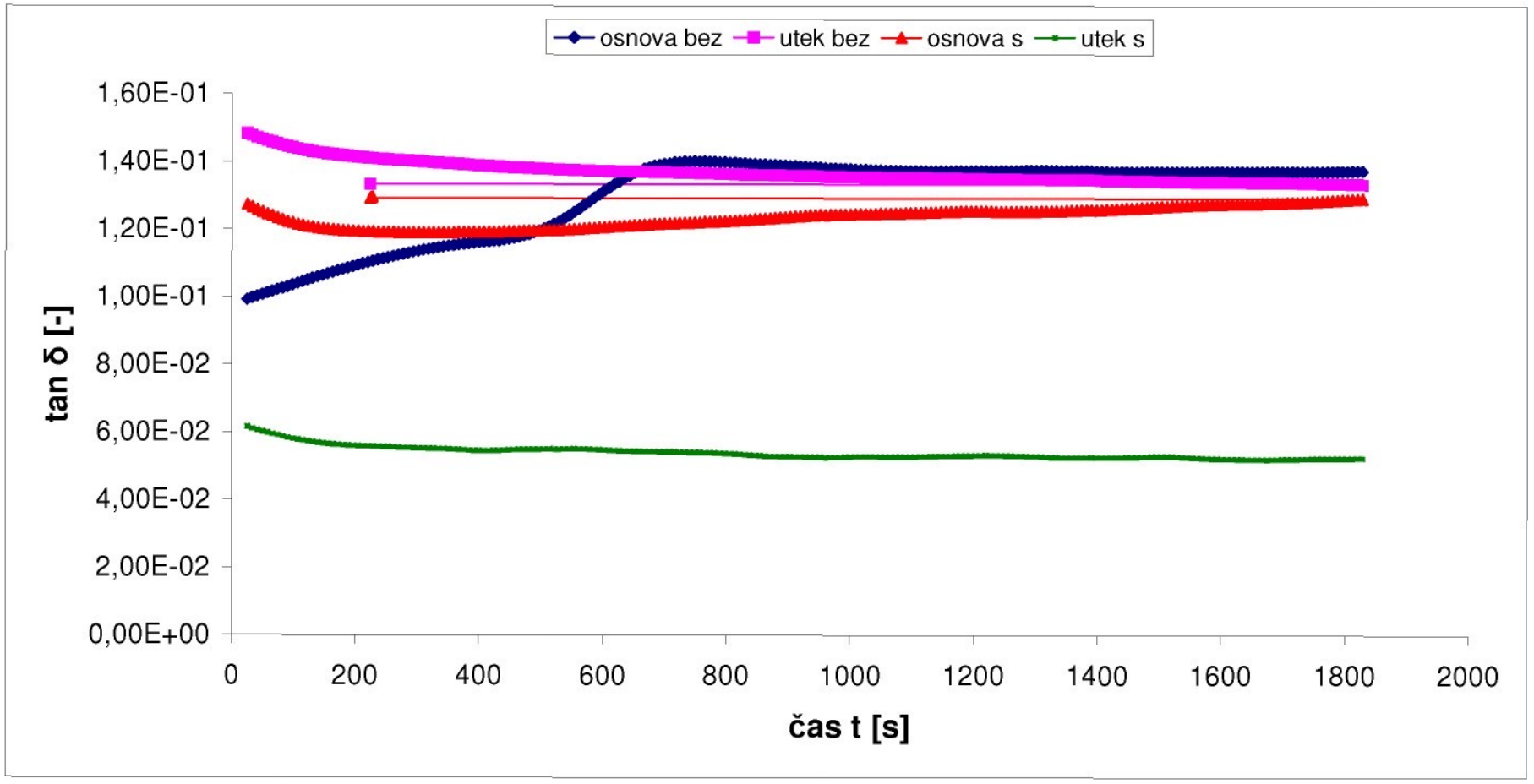
příloha č. 1: CD s grafy s DMA, Charpy testu a Falling testu

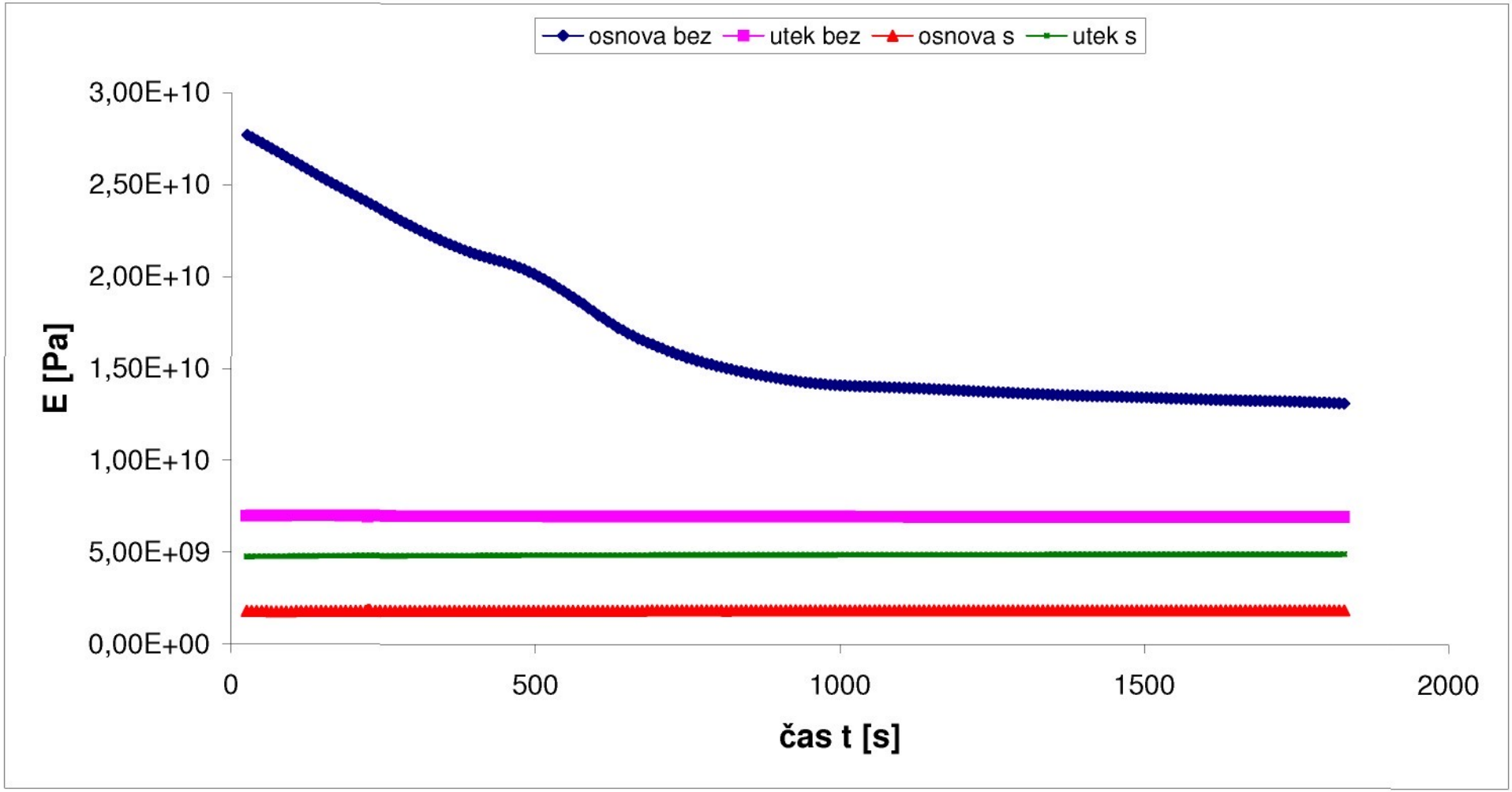

osnova-bez
utek-bez
osnova-s
utek-s
8,00E-02
7,00E-02
6,00E-02
5,00E-02
4,00E-02
3,00E-02
2,00E-02
1,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

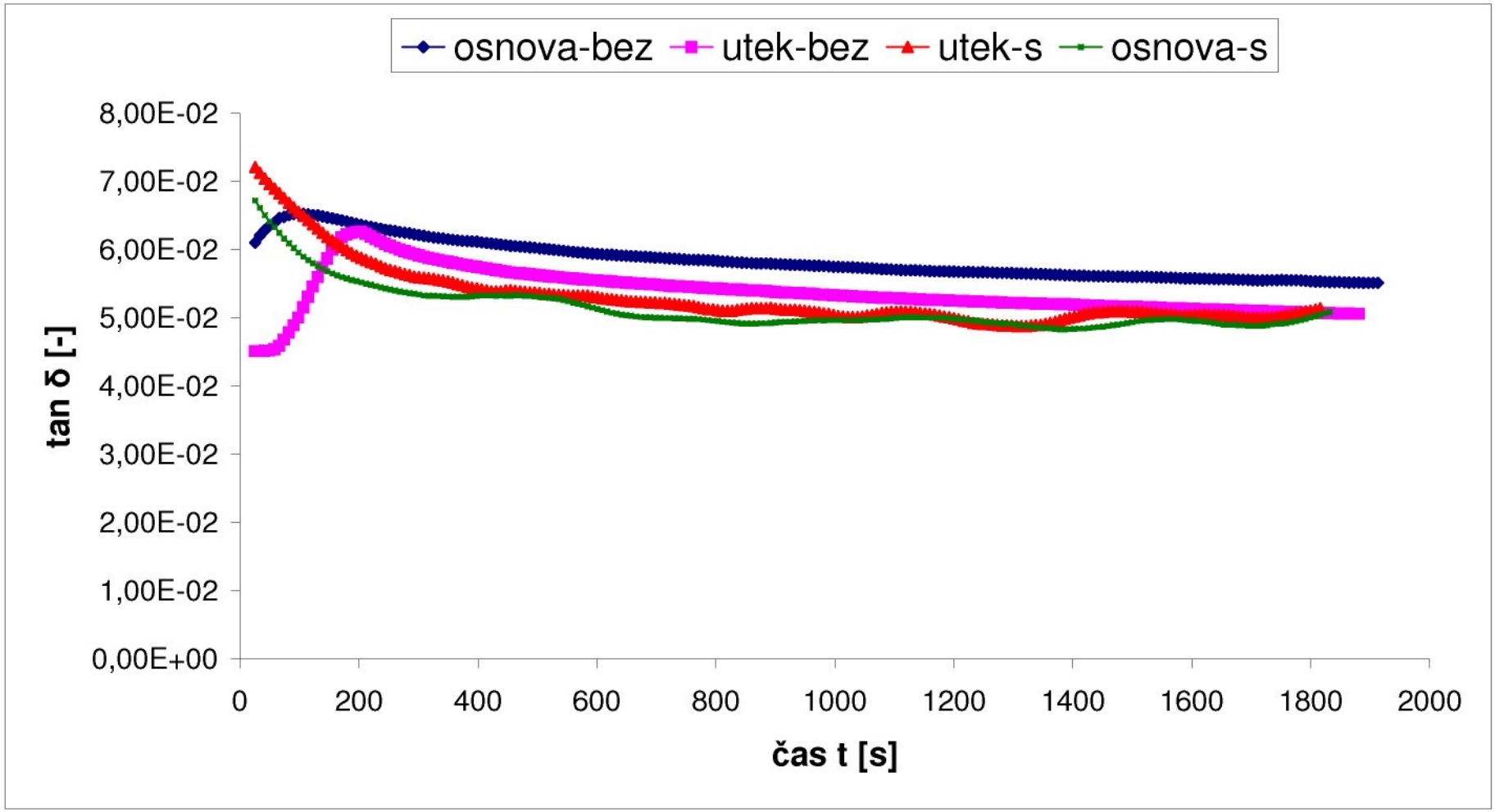

osnova-bez
utek-bez
osnova-s
utek-s
6,00E+10
5,00E+10
4,00E+10
3,00E+10
2,00E+10
1,00E+10
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

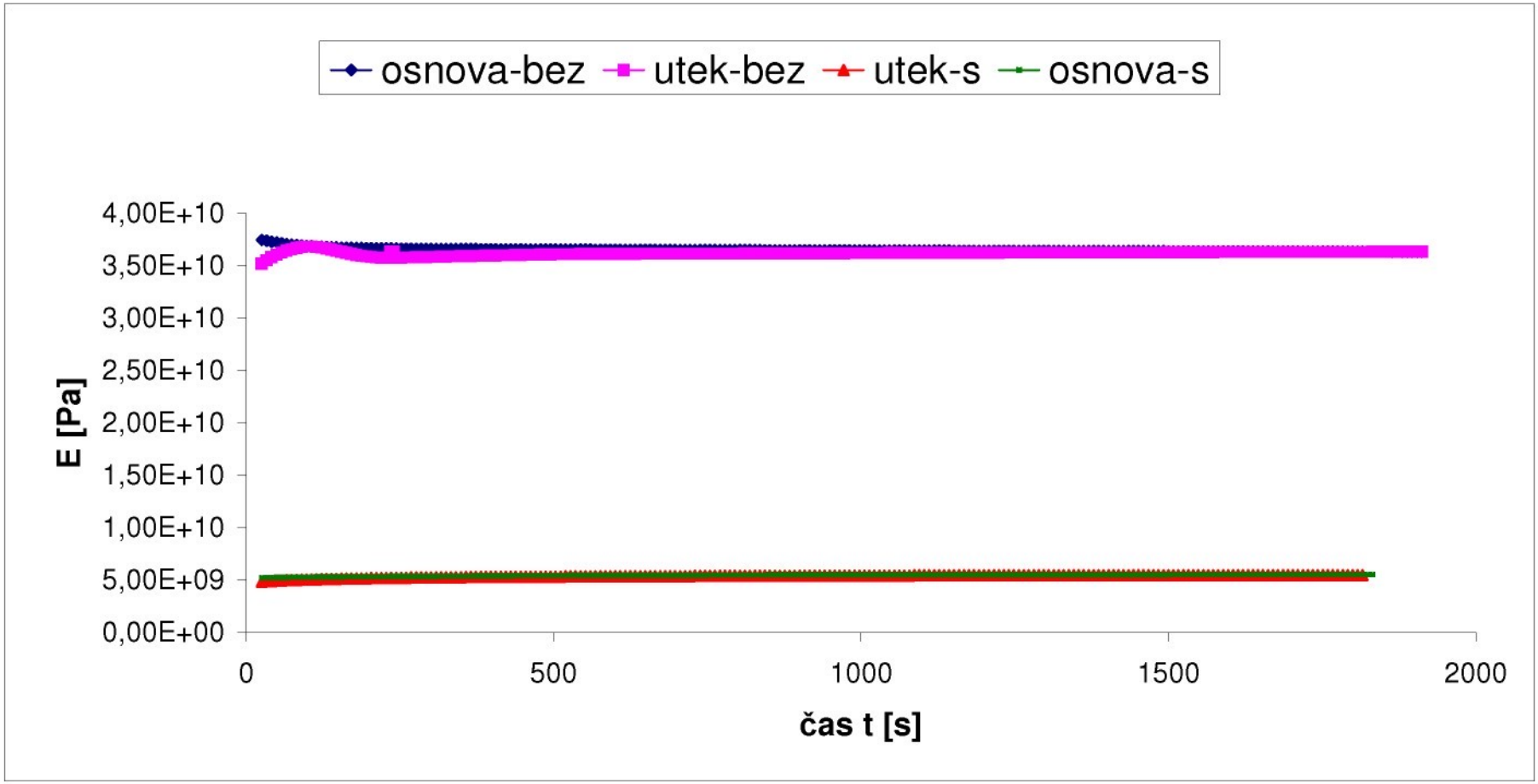

osnova-bez
utek-bez
utek-s
osnova-s
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

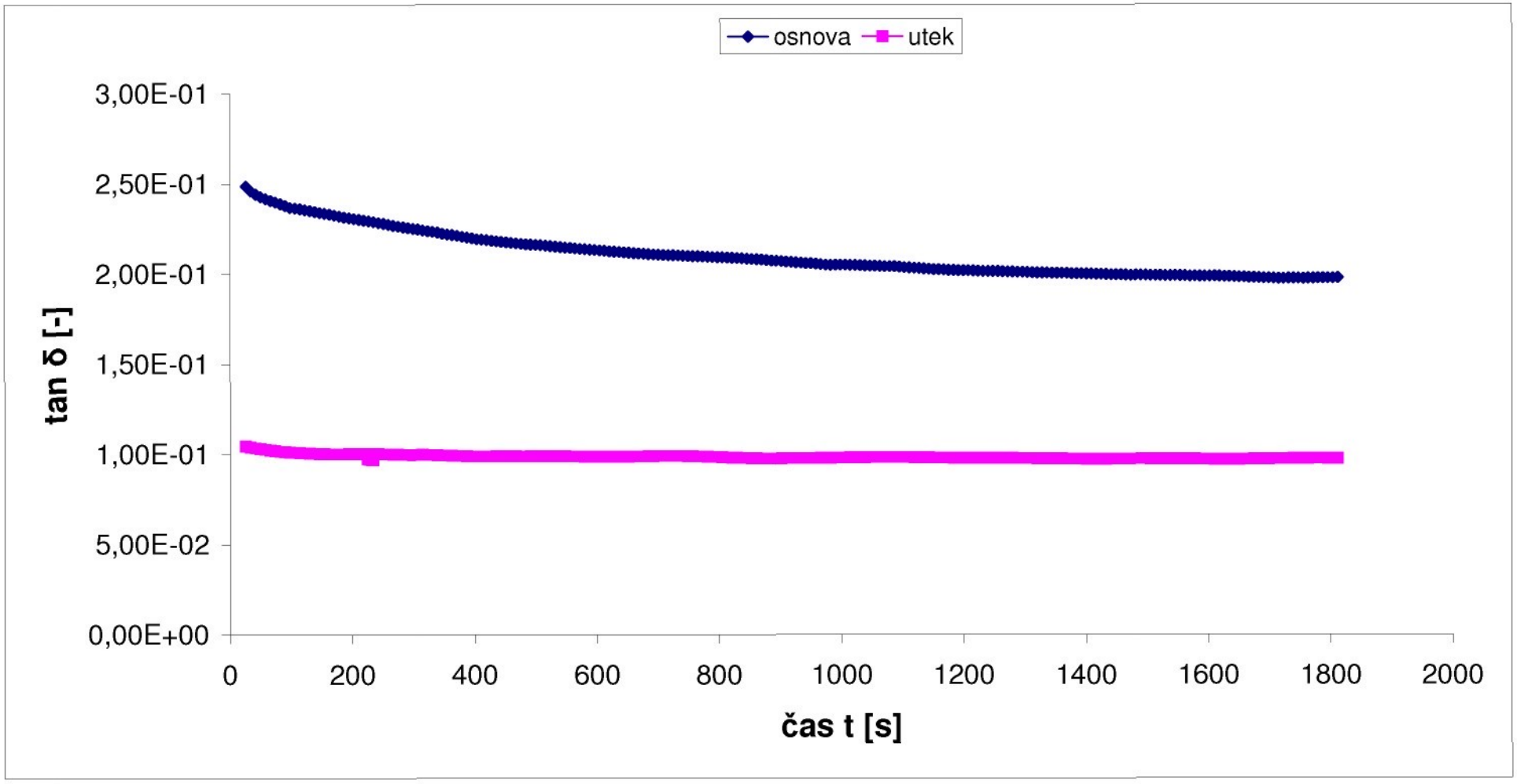

osnova-bez
útek-bez
útek-s
osnova-s
4,50E+10
4,00E+10
3,50E+10
3,00E+10
2,50E+10
2,00E+10
1,50E+10
1,00E+10
5,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

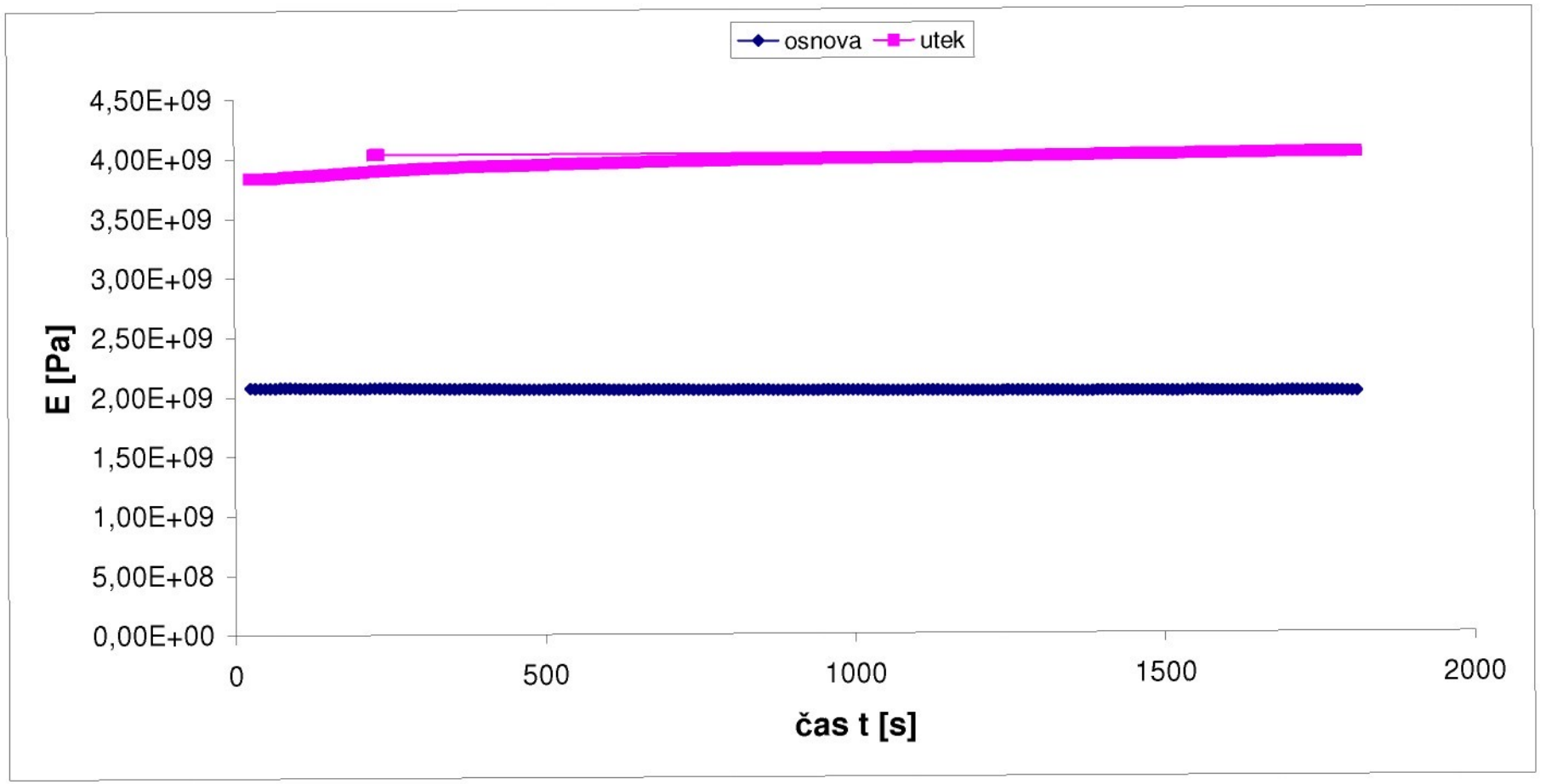

osnova bez
utek bez
osnova s
utek s
1,60E-01
1,40E-01
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

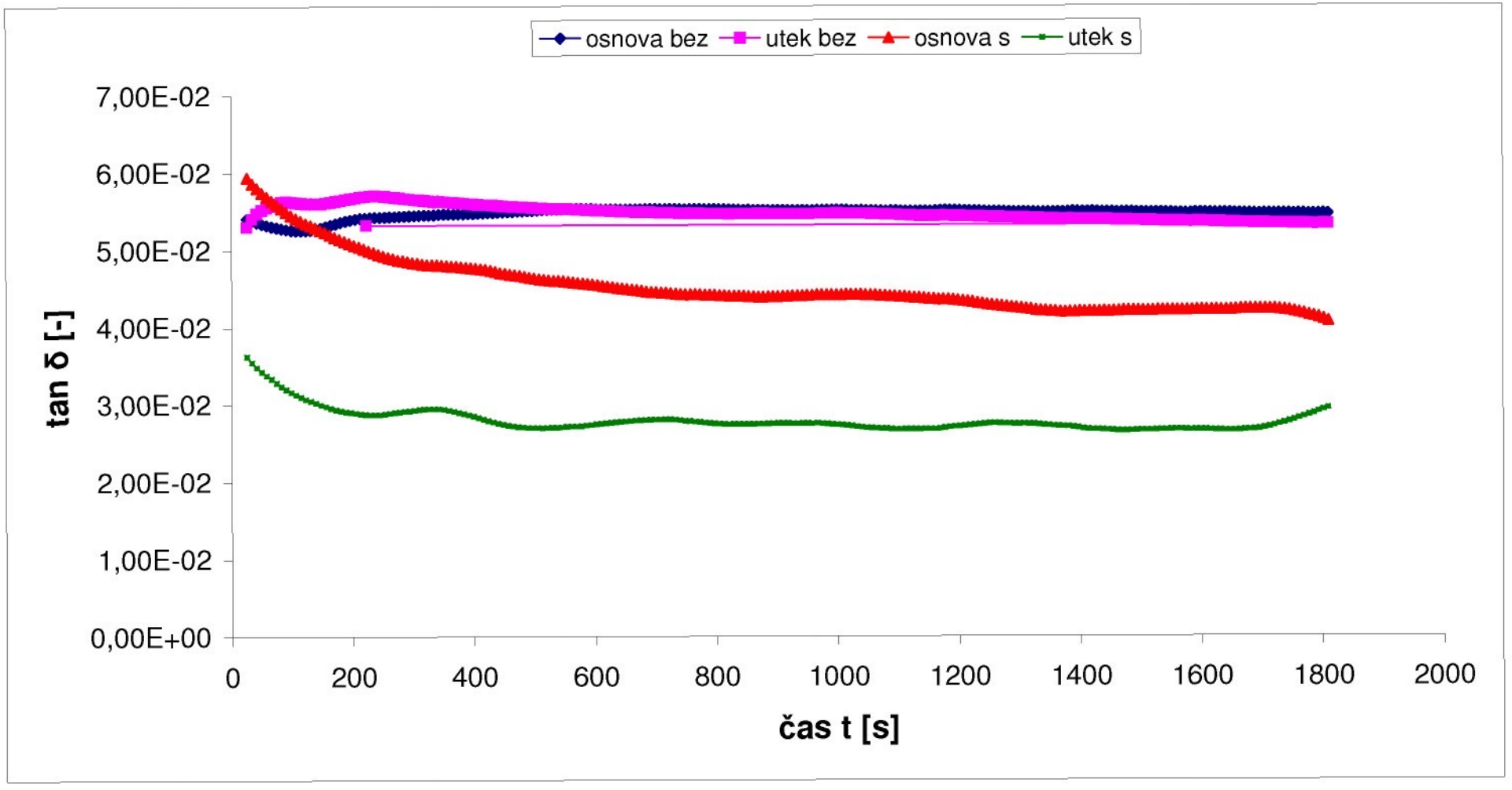

osnova bez
utek bez
osnova s
utek s
3,00E+10
2,50E+10
2,00E+10
1,50E+10
1,00E+10
5,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

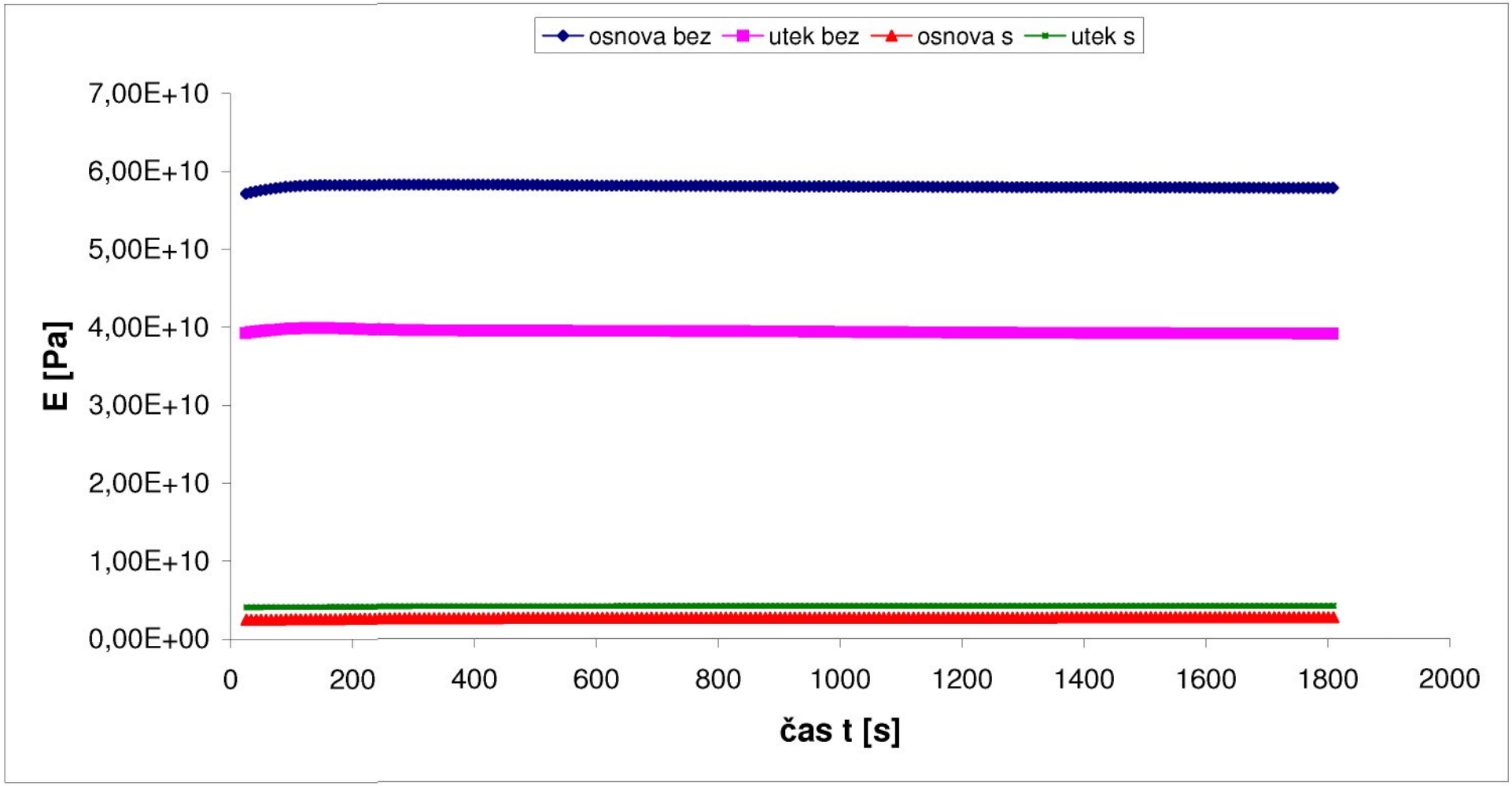

osnova-bez
utek-bez
utek-s
osnova-s
8,00E-02
7,00E-02
6,00E-02
5,00E-02
4,00E-02
3,00E-02
2,00E-02
1,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

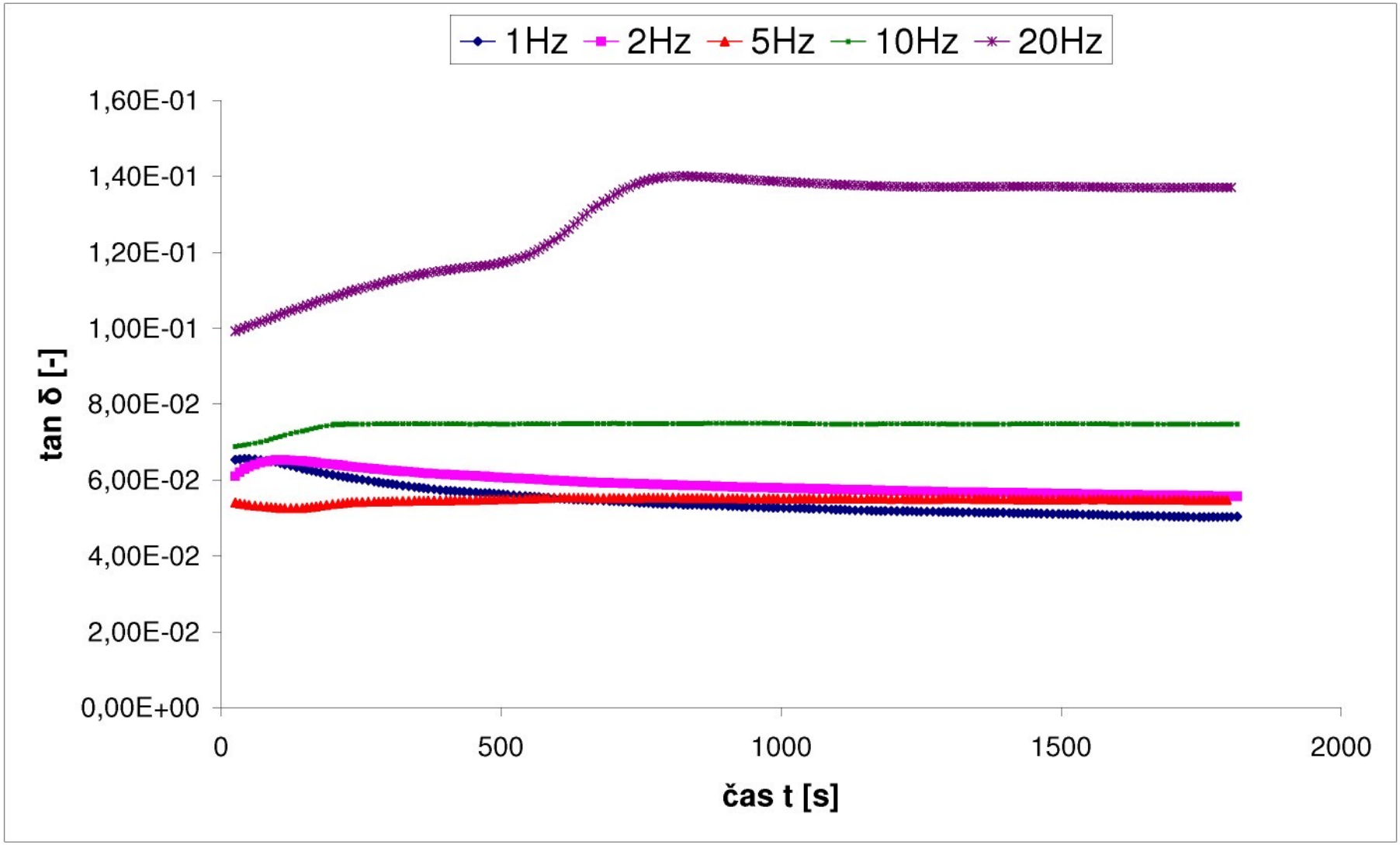

osnova-bez
utek-bez
utek-s
osnova-s
E [Pa]
4,00E+10
3,50E+10
3,00E+10
2,50E+10
2,00E+10
1,50E+10
1,00E+10
5,00E+09
0,00E+00
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

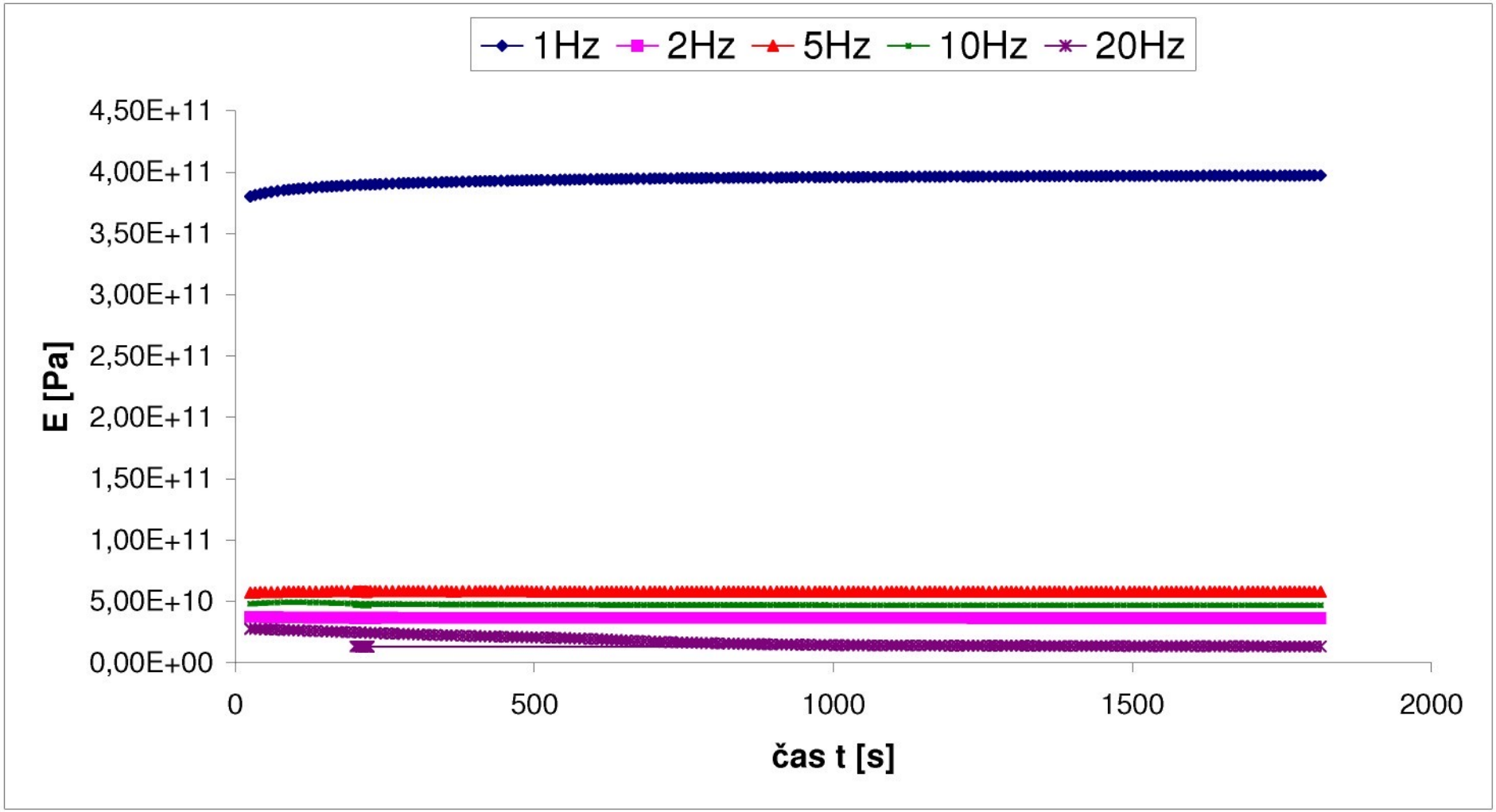

osnova
utek
3,00E-01
2,50E-01
2,00E-01
1,50E-01
1,00E-01
5,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

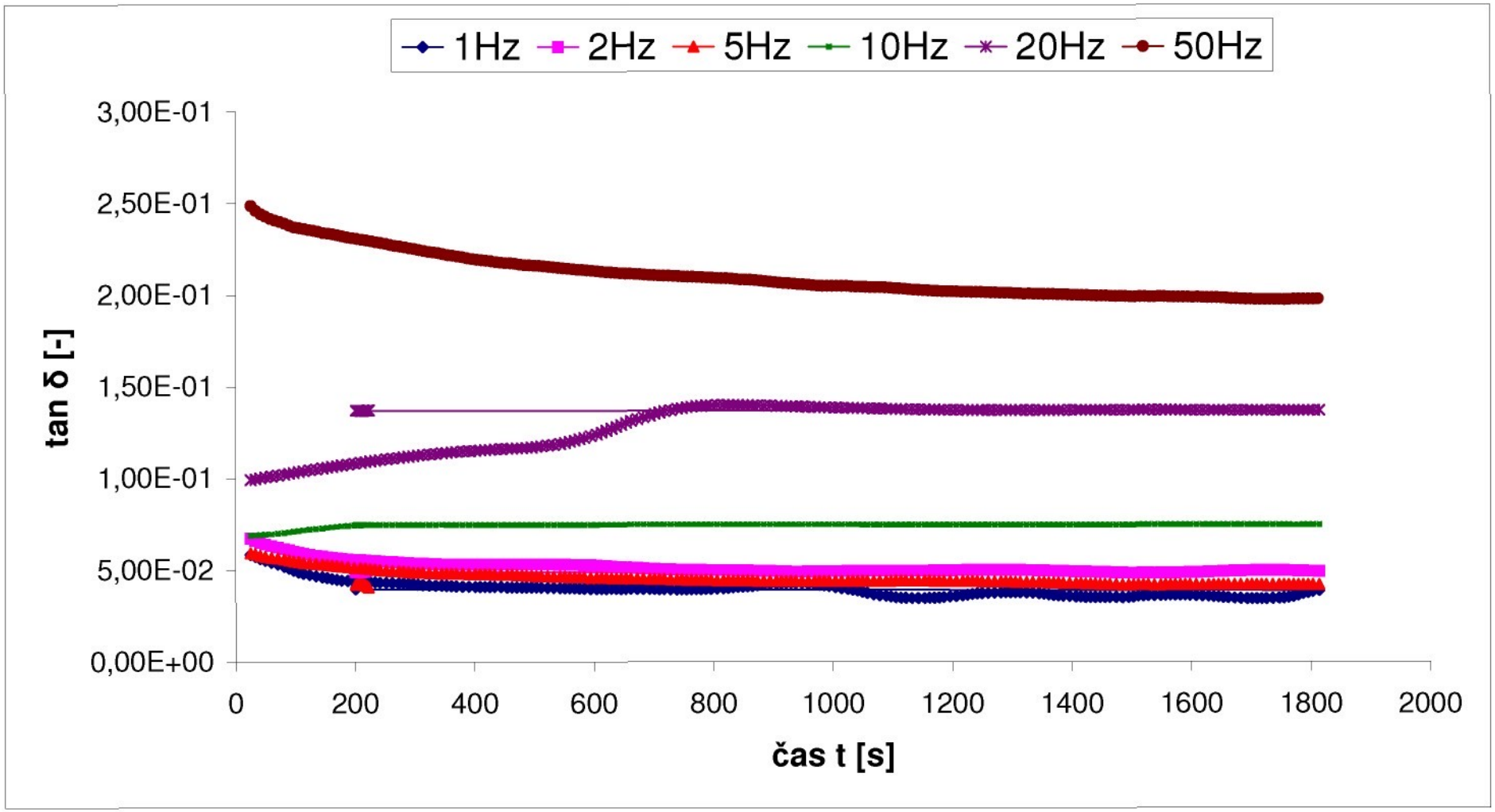

osnova
utek
4,50E+09
4,00E+09
3,50E+09
3,00E+09
2,50E+09
2,00E+09
1,50E+09
1,00E+09
5,00E+08
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

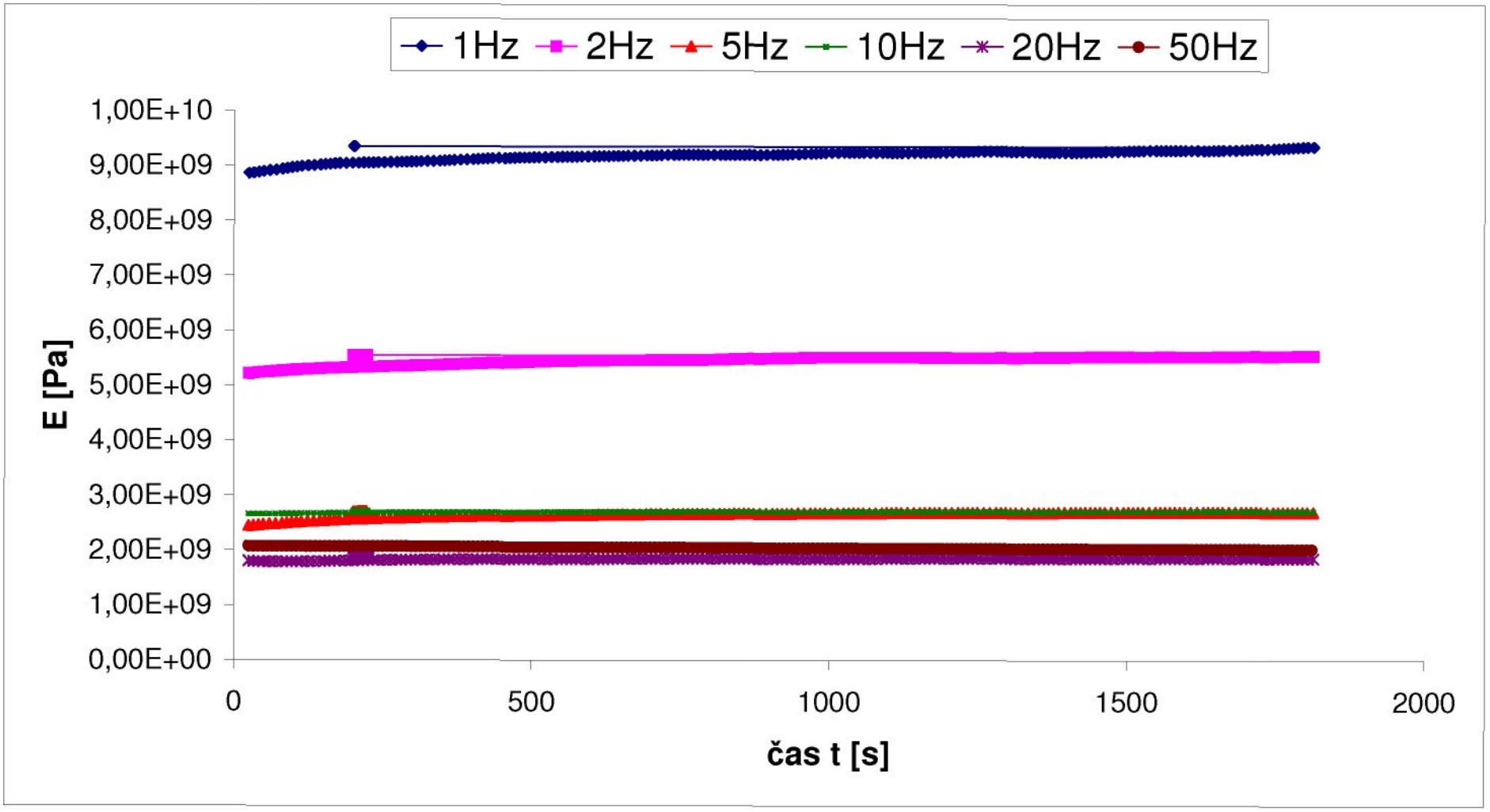

osnova bez
utek bez
osnova s
utek s
7,00E-02
6,00E-02
5,00E-02
4,00E-02
3,00E-02
2,00E-02
1,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

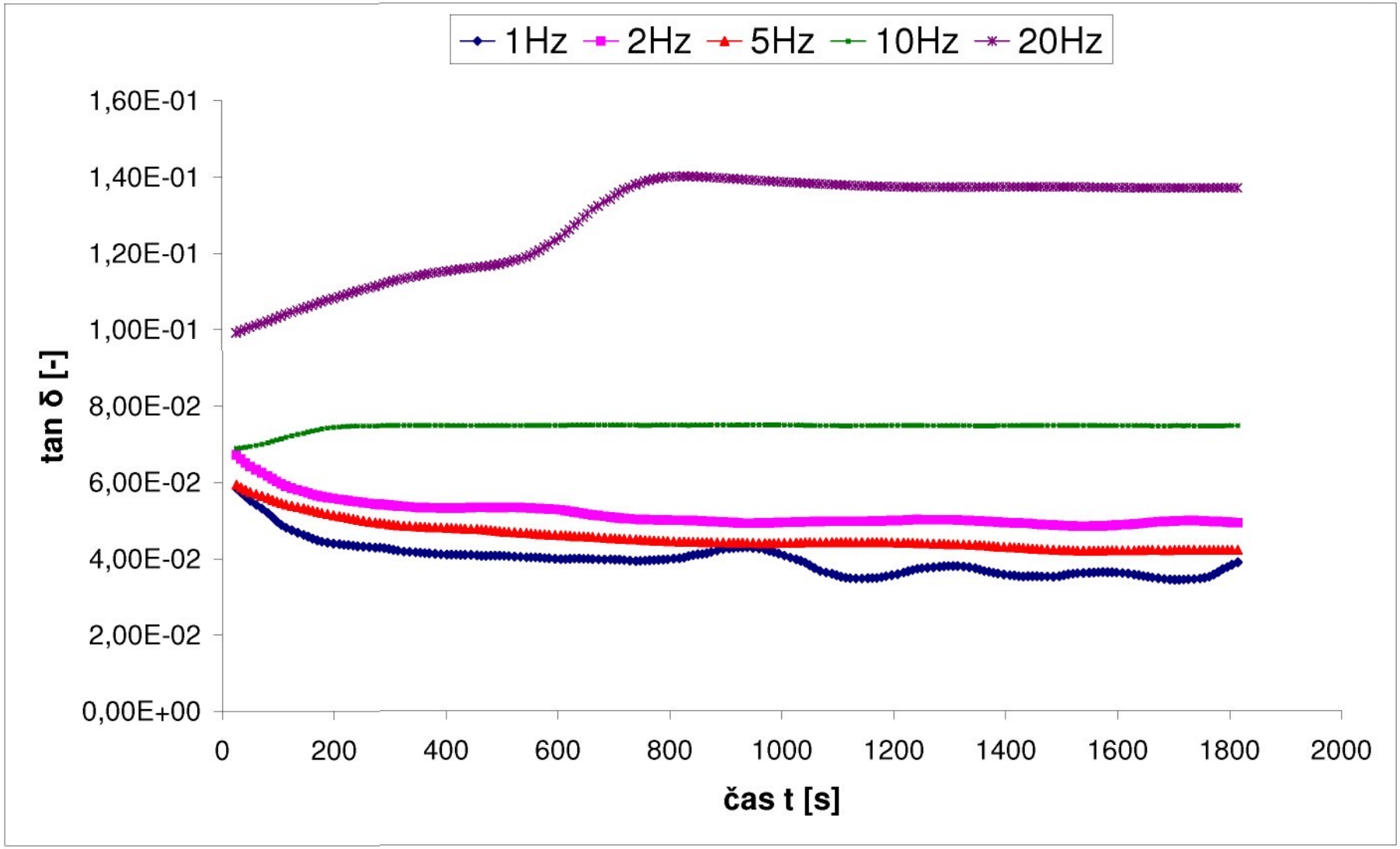

osnova bez
utek bez
osnova s
utek s
7,00E+10
6,00E+10
5,00E+10
4,00E+10
3,00E+10
2,00E+10
1,00E+10
0,00E+00
E [Pa]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]

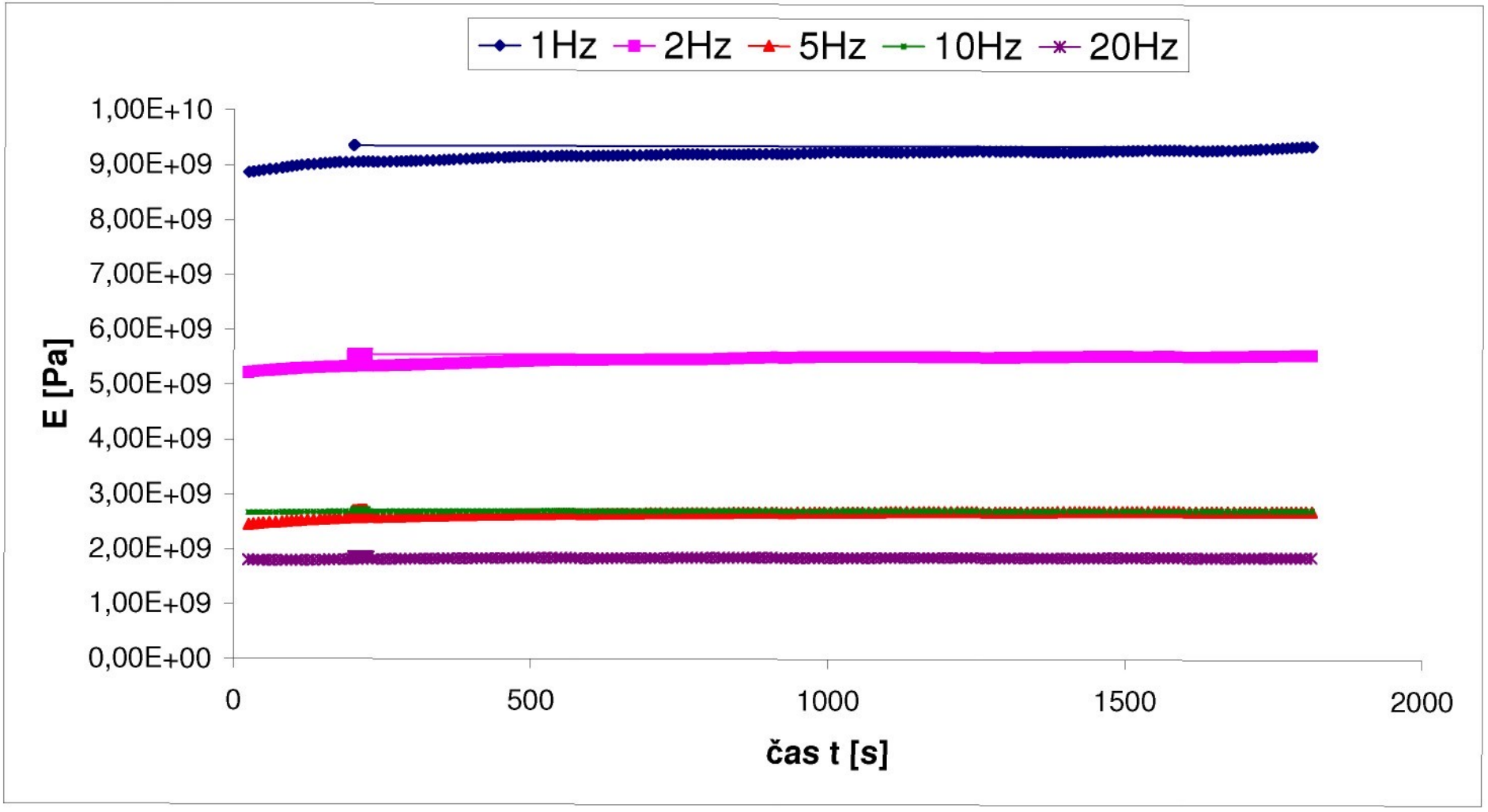

1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
1,60E-01
1,40E-01
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
4,50E+11
4,00E+11
3,50E+11
3,00E+11
2,50E+11
2,00E+11
1,50E+11
1,00E+11
5,00E+10
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
50Hz
3,00E-01
2,50E-01
2,00E-01
1,50E-01
1,00E-01
5,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
50Hz
1,00E+10
9,00E+09
8,00E+09
7,00E+09
6,00E+09
5,00E+09
4,00E+09
3,00E+09
2,00E+09
1,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
1,60E-01
1,40E-01
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
1,00E+10
9,00E+09
8,00E+09
7,00E+09
6,00E+09
5,00E+09
4,00E+09
3,00E+09
2,00E+09
1,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

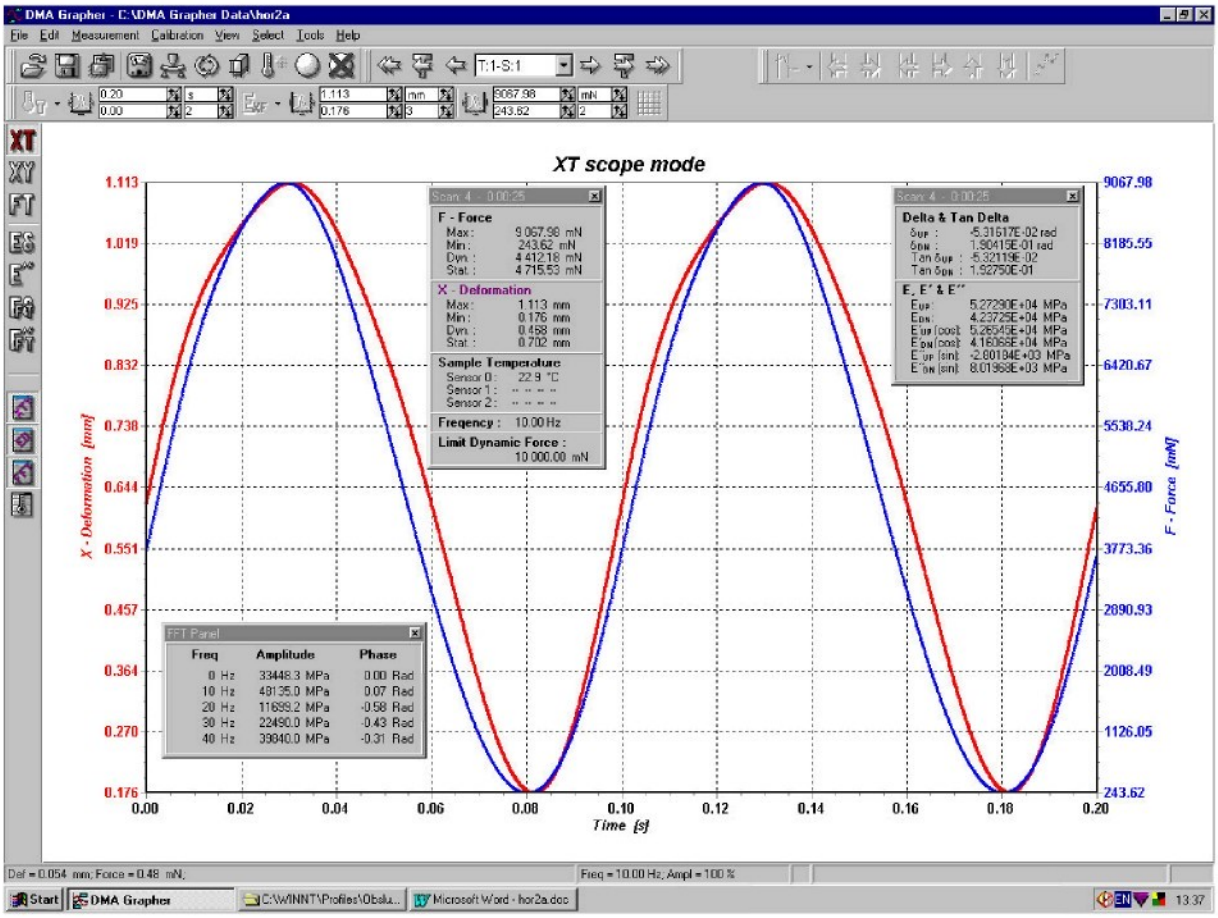
Experiment identification
- Measurement name: hor2a
- Measurement date: 4.11.2009 10:31:25
- Sample: hor2a
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 344.0 mN
- Operator: JH
- Comment

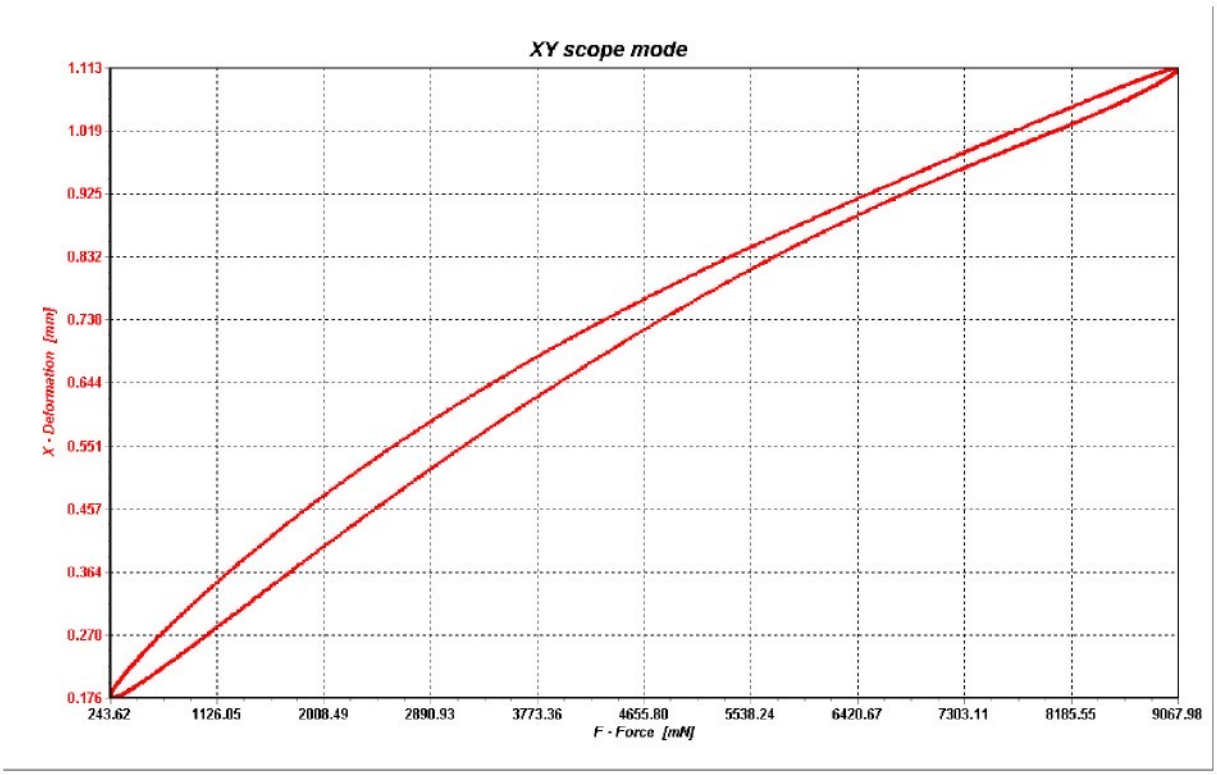
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

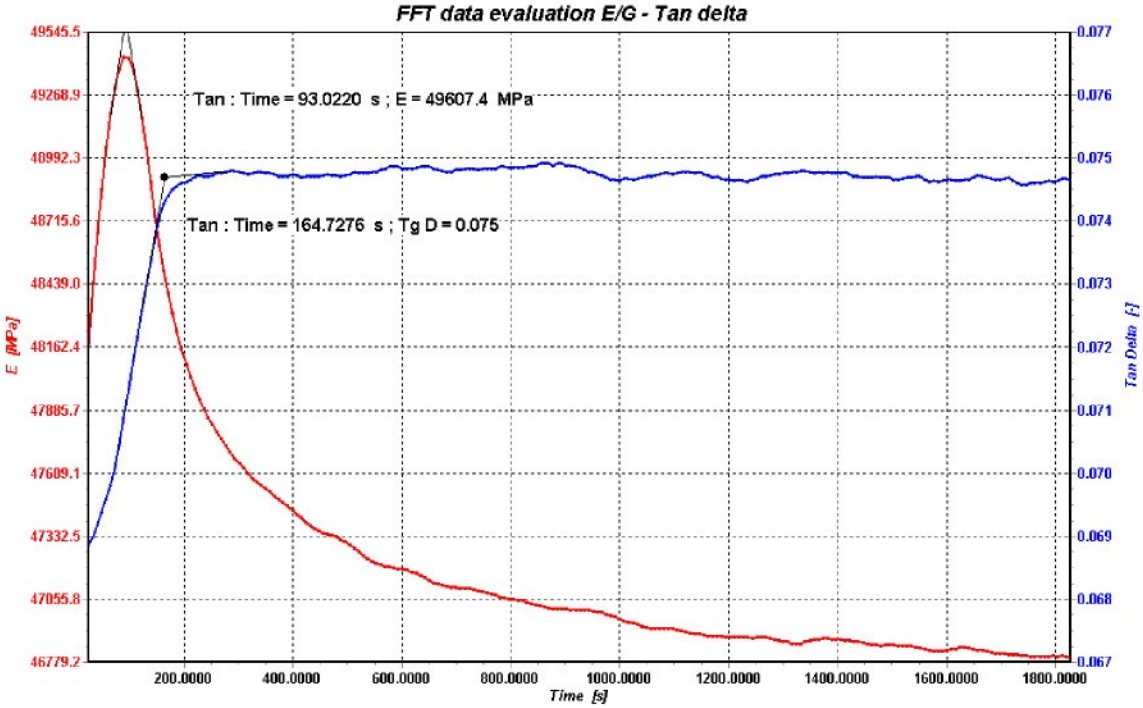
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 10 Hz
- Force limit : 10 000 mN

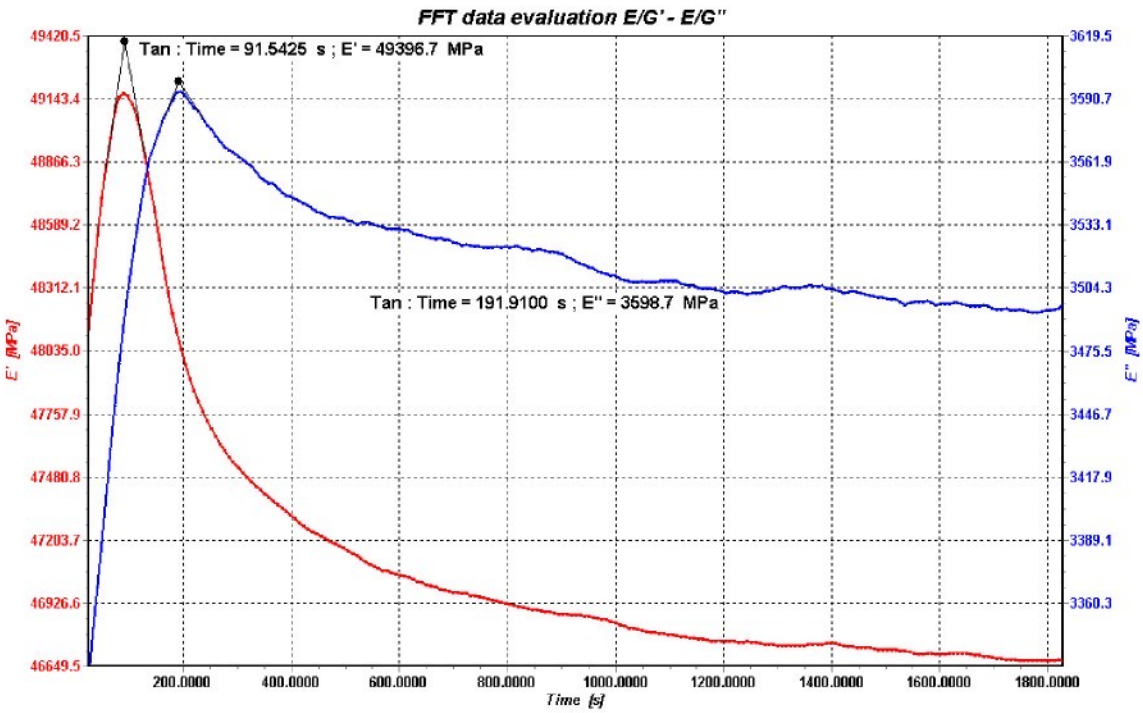
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.850 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 4.97696E+06

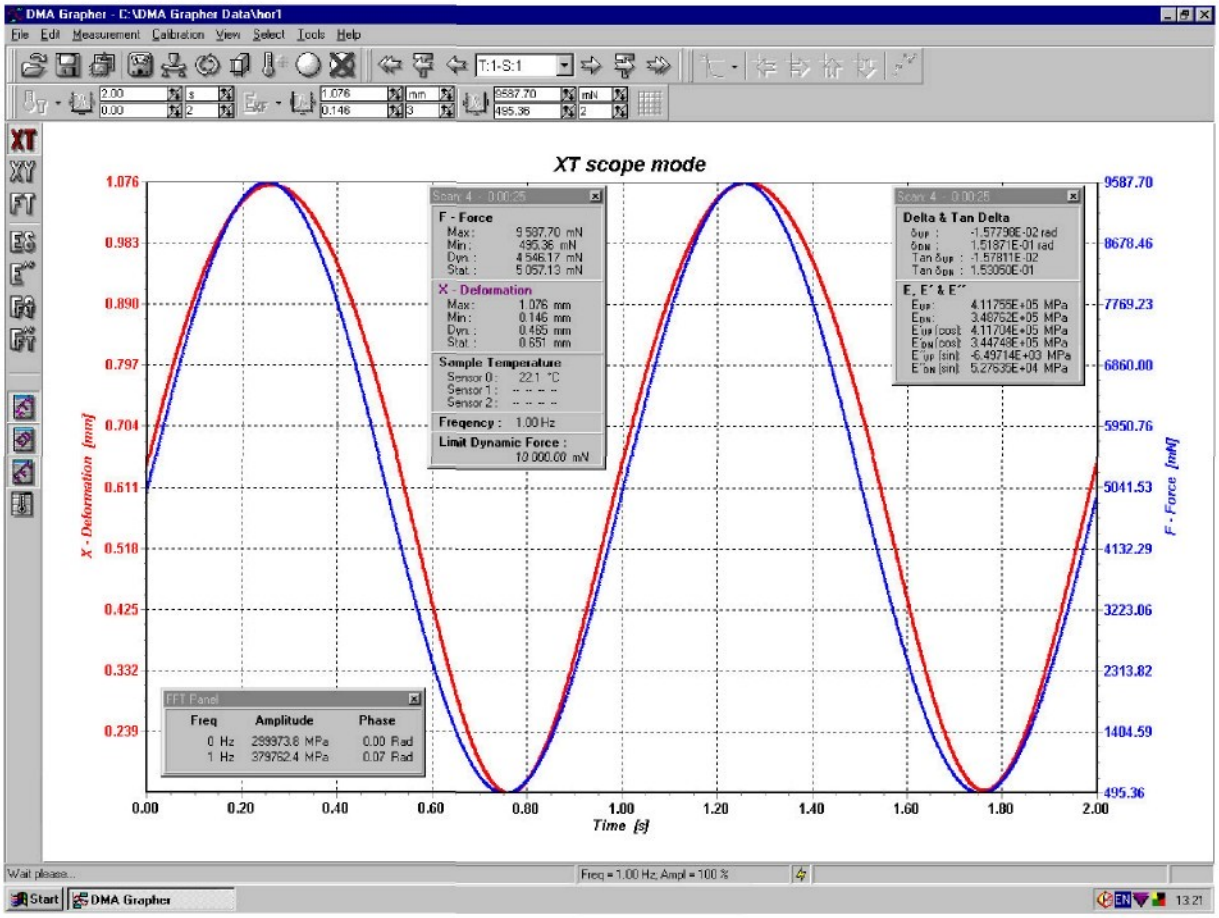
Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\hor2a
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 9 067.98 mN
Min: 243.62 mN
Dyn: 4 412.18 mN
Stat: 4 715.53 mN
X - Deformation
Max: 1.113 mm
Min: 0.176 mm
Dyn: 0.458 mm
Stat: 0.702 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 22.9 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 10.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
Sup: -5.31617E-02 rad
Sdw: 1.90415E-01 rad
Tan Sup: -5.32119E-02
Tan Sdw: 1.92750E-01
E, E' & E''
Eup: 5.27290E+04 MPa
Edw: 4.23725E+04 MPa
Eup (cos): 5.26045E+04 MPa
Edw (cos): 4.16368E+04 MPa
E'up (sin): -2.80184E+03 MPa
E'dw (sin): 8.01968E+03 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 33448.3 MPa 0.00 Rad
10 Hz 48135.0 MPa 0.07 Rad
20 Hz 11699.2 MPa -0.58 Rad
30 Hz 22490.0 MPa -0.43 Rad
40 Hz 39840.0 MPa -0.31 Rad
Def = 0.054 mm; Force = 0.48 mN;
Freq = 10.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - hor2a.doc
13:37


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 93.0220 s ; E = 49607.4 MPa
Tan : Time = 164.7276 s ; Tg D = 0.075
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
49545.5
49268.9
48992.3
48715.6
48439.0
48162.4
47885.7
47609.1
47332.5
47055.8
46779.2
0.077
0.076
0.075
0.074
0.073
0.072
0.071
0.070
0.069
0.068
0.067
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 91.5425 s ; E' = 49396.7 MPa
Tan : Time = 191.9100 s ; E'' = 3598.7 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
49420.5
49143.4
48866.3
48589.2
48312.1
48035.0
47757.9
47480.8
47203.7
46926.6
46649.5
3619.5
3590.7
3561.9
3533.1
3504.3
3475.5
3446.7
3417.9
3389.1
3360.3
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000



Experiment identification
- Measurement name: hor1
- Measurement date: 4.11.2009 09:41:31
- Sample: hor1
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 355.0 mN
- Operator: JH
- Comment

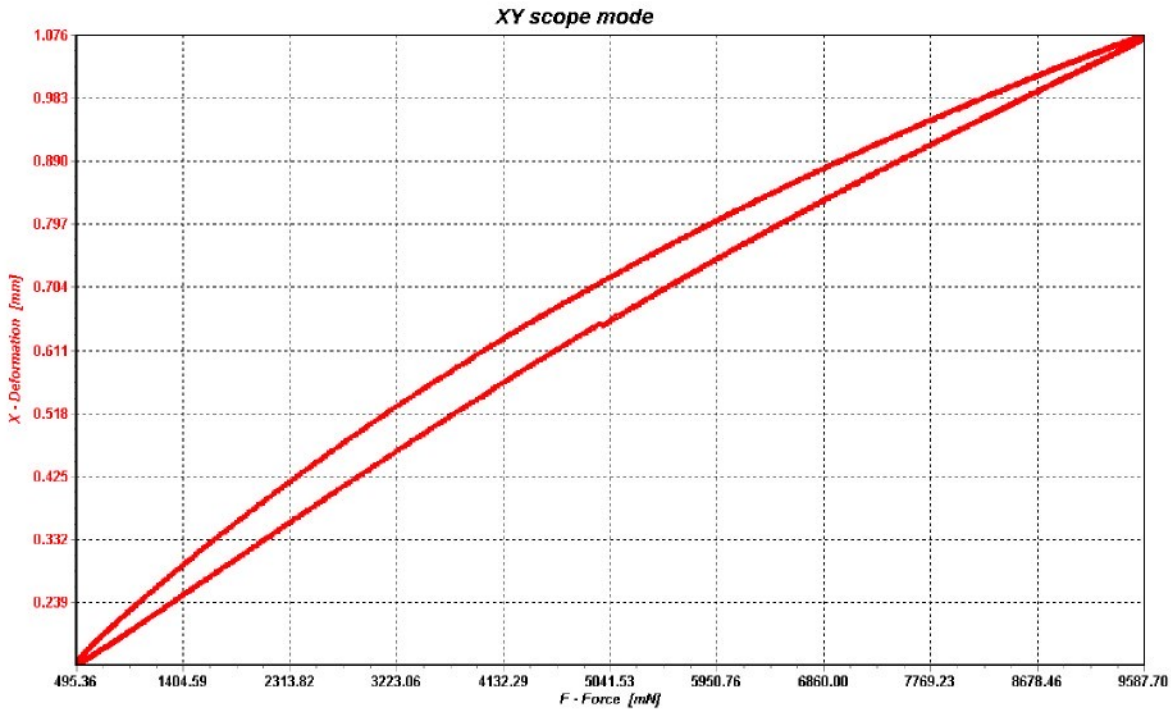
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

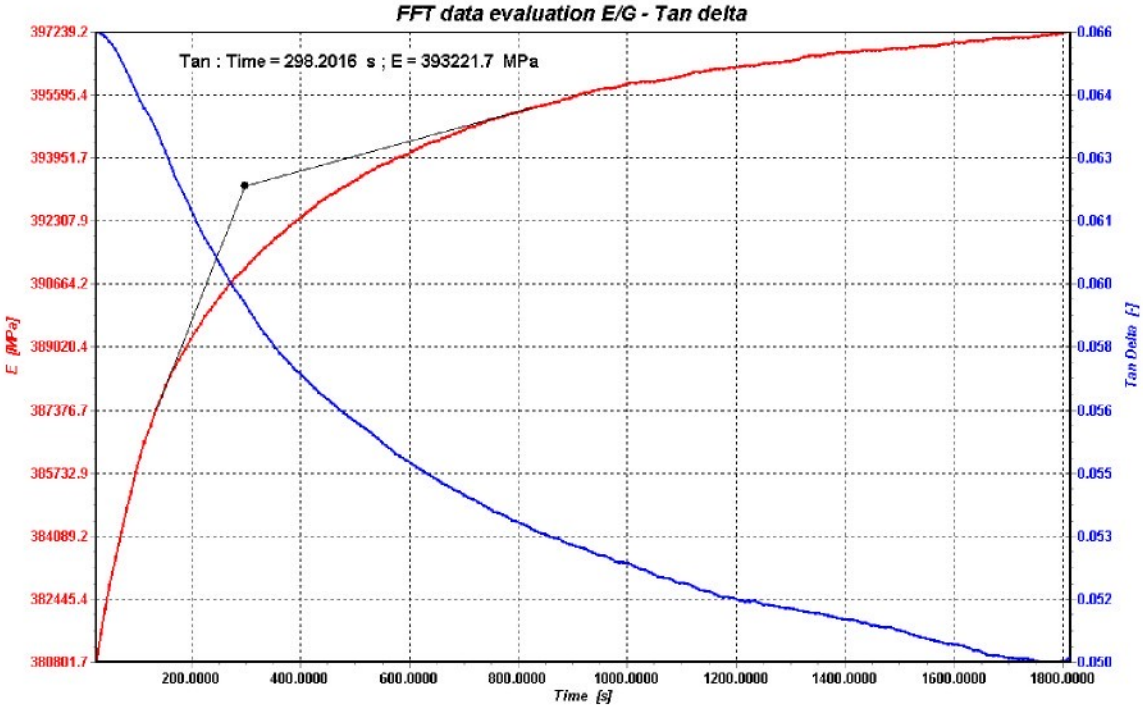
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 1 Hz
- Force limit : 10 000 mN

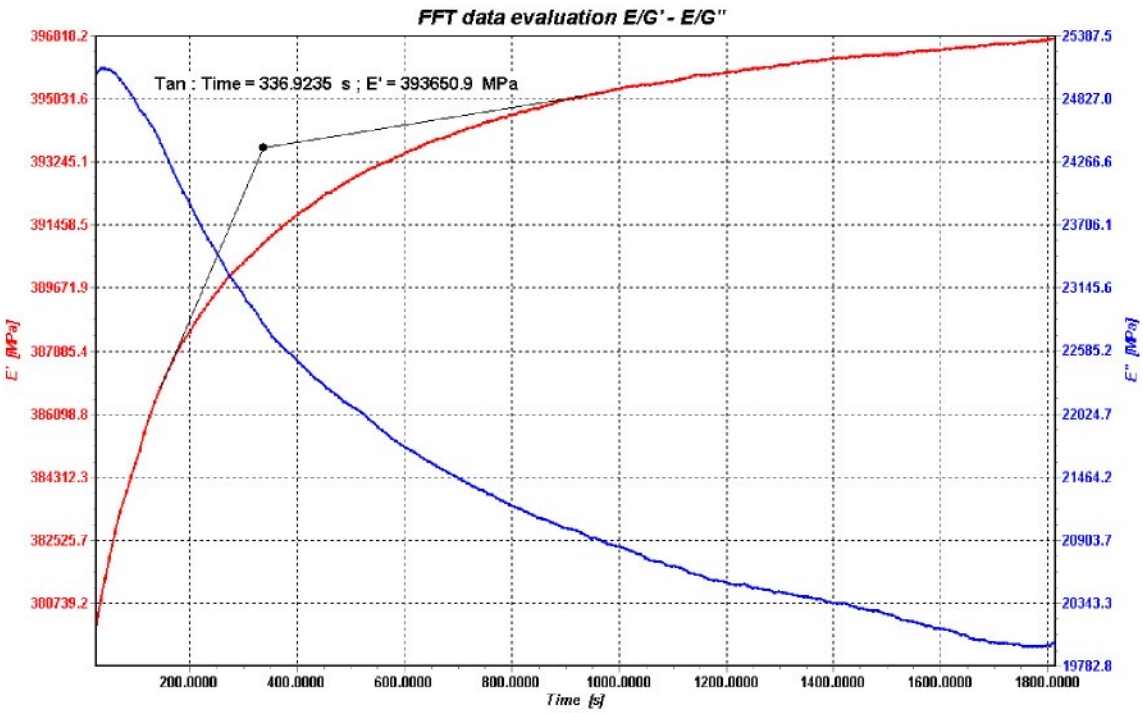
Sample parameters

Type of enter: By proportion
Sample shape: Rectangle
Sample dimensions
Width: 1.050 mm
Height: 0.550 mm
Length: 30.000 mm
K: 3.86390E+07

Temperature program
Row: 1
End temperature: 25 °C
Heat/cool rate: 5.0 °C/min
Dwell: 20 min
Save interval
Temperature: 0.5 °C
Time: 6 s




FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 298.2016 s ; E = 393221.7 MPa
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
397239.2
395595.4
393951.7
392307.9
390664.2
389020.4
387376.7
385732.9
384089.2
382445.4
380801.7
0.066
0.064
0.063
0.061
0.060
0.058
0.056
0.055
0.053
0.052
0.050
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 336.9235 s ; E' = 393650.9 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
396818.2
395031.6
393245.1
391458.5
389671.9
387885.4
386098.8
384312.3
382525.7
380739.2
25387.5
24827.0
24266.6
23706.1
23145.6
22585.2
22024.7
21464.2
20903.7
20343.3
19782.8
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

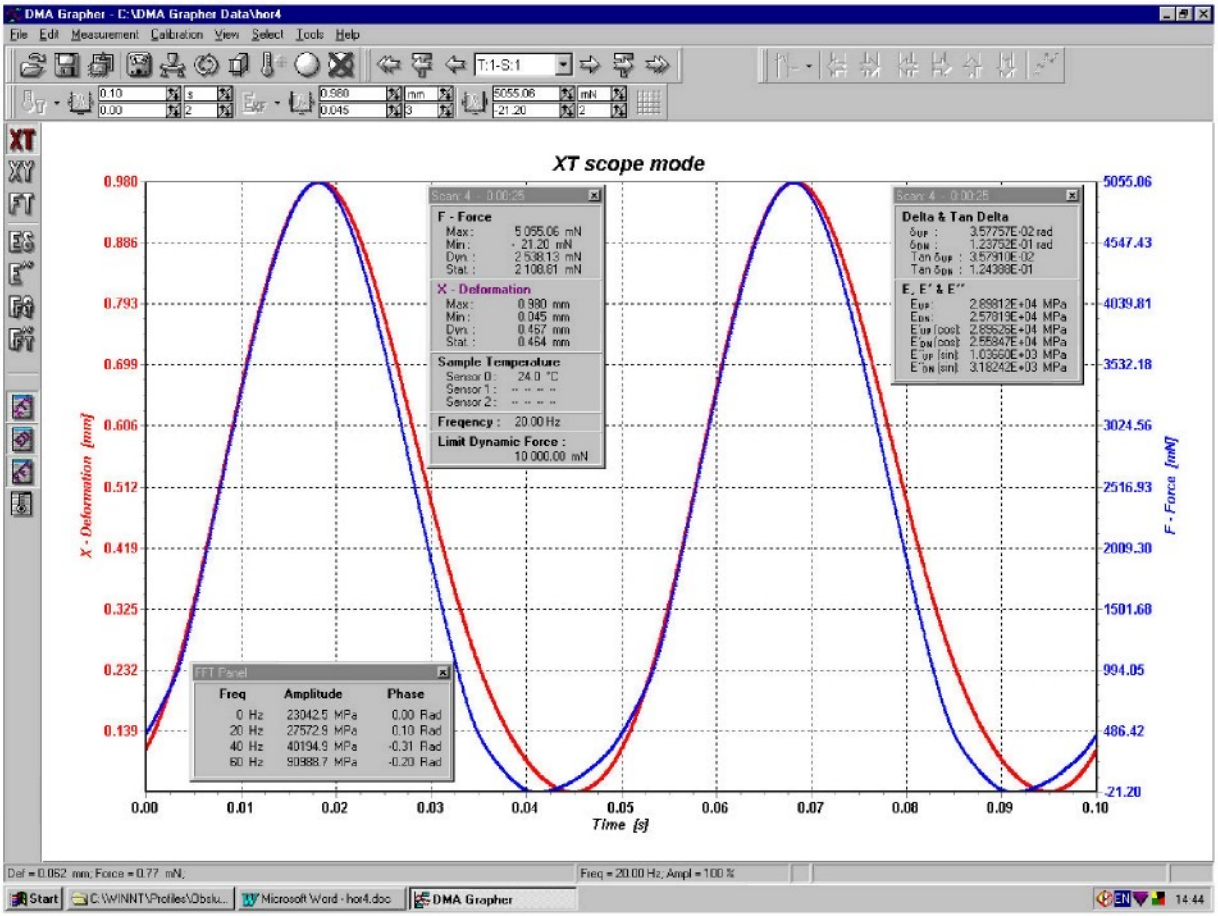
Experiment identification
- Measurement name: hor4
- Measurement date: 4.11.2009 11:54:09
- Sample: hor4
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 210.0 mN
- Operator: JH
- Comment

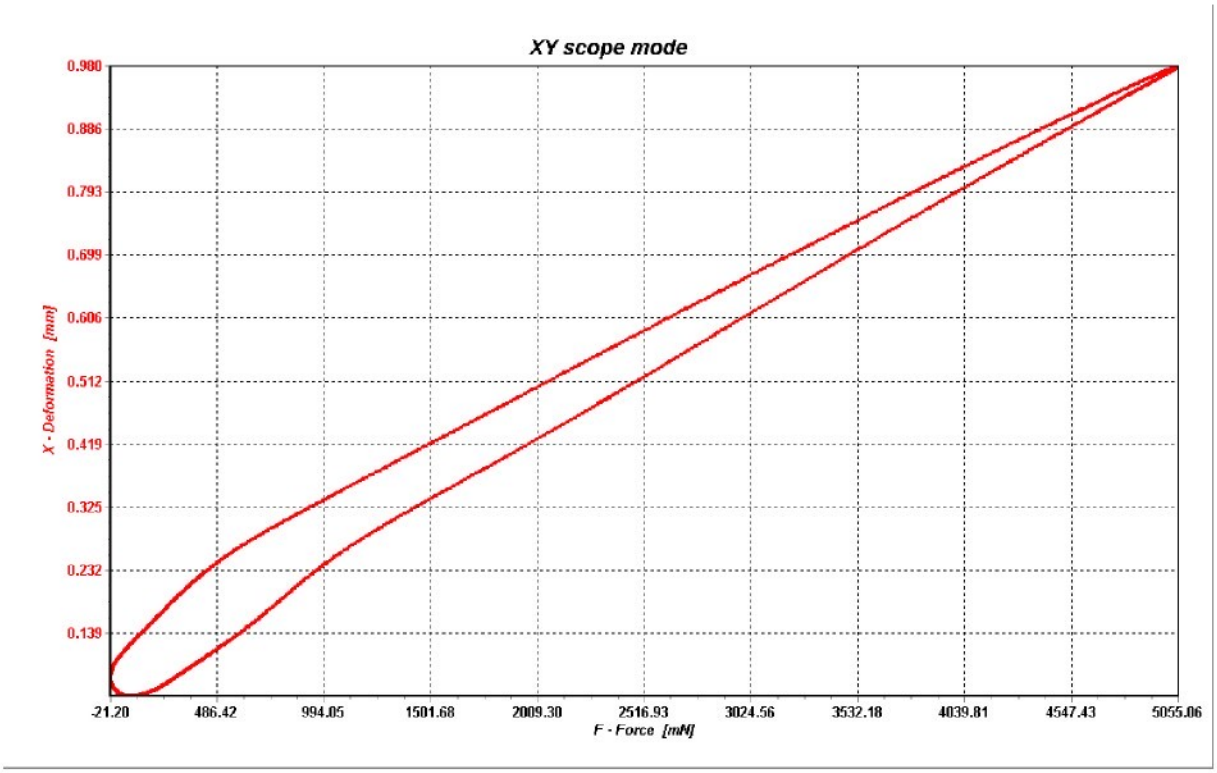
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

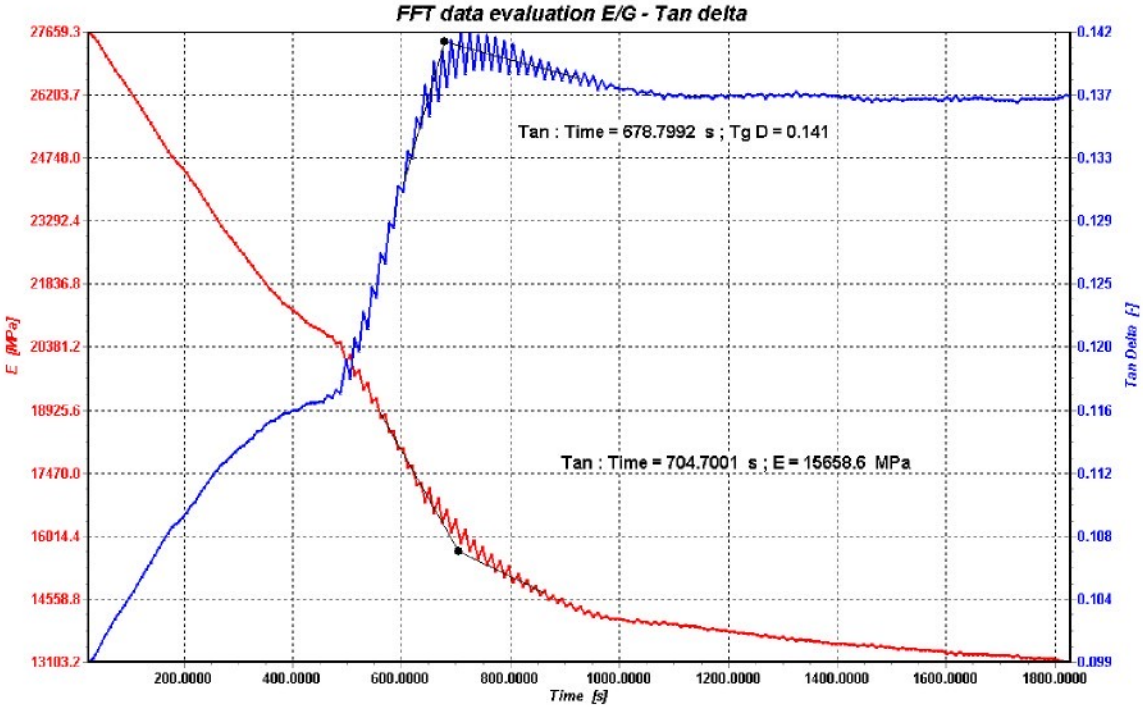
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 20 Hz
- Force limit : 10 000 mN

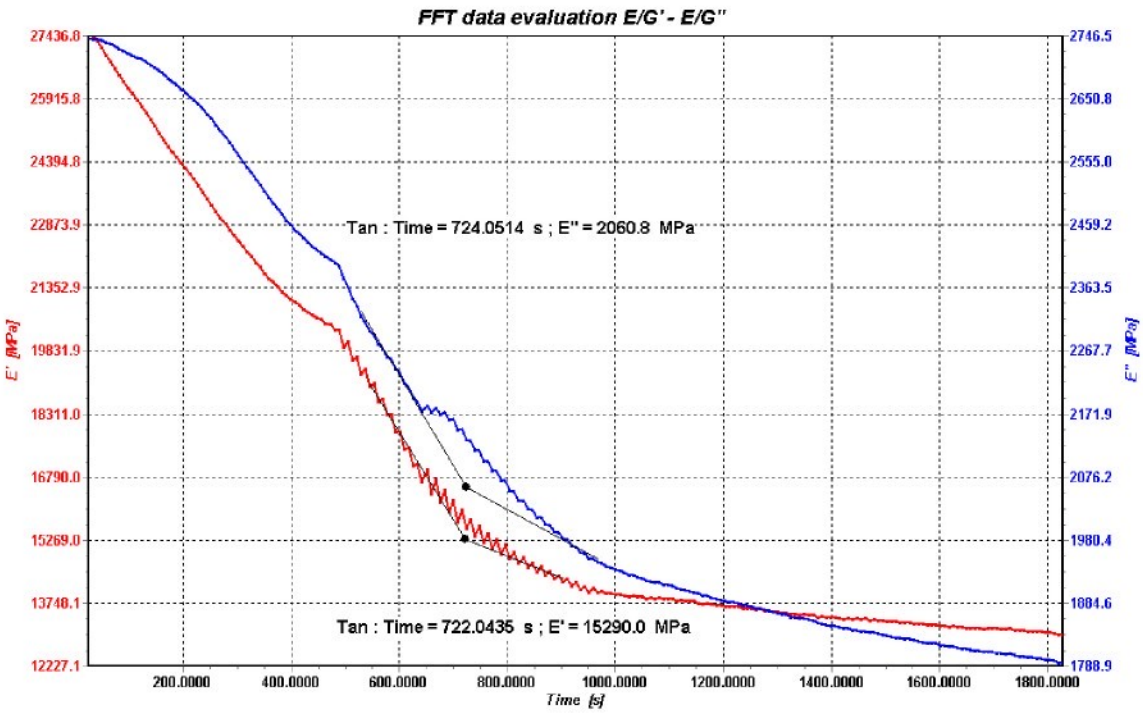
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.650 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 5.07042E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\hor4
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 5 055.06 mN
Min : - 21.20 mN
Dyn : 2 538.13 mN
Stat : 2 108.61 mN
X - Deformation
Max : 0.980 mm
Min : 0.045 mm
Dyn : 0.457 mm
Stat : 0.464 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 24.0 °C
Sensor 1 : -- -- --
Sensor 2 : -- -- --
Freqency : 20.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 23042.5 MPa 0.00 Rad
20 Hz 27572.9 MPa 0.10 Rad
40 Hz 40194.9 MPa -0.31 Rad
60 Hz 90988.7 MPa -0.20 Rad
Def = 0.062 mm; Force = 0.77 mN;
Freq = 20.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
14:44


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 678.7992 s ; Tg D = 0.141
Tan : Time = 704.7001 s ; E = 15658.6 MPa
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
27659.3
26203.7
24748.0
23292.4
21836.8
20381.2
18925.6
17470.0
16014.4
14558.8
13103.2
0.142
0.137
0.133
0.129
0.125
0.120
0.116
0.112
0.108
0.104
0.099
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 724.0514 s ; E'' = 2060.8 MPa
Tan : Time = 722.0435 s ; E' = 15290.0 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
27436.8
25915.8
24394.8
22873.9
21352.9
19831.9
18311.0
16790.0
15269.0
13748.1
12227.1
2746.5
2650.8
2555.0
2459.2
2363.5
2267.7
2171.9
2076.2
1980.4
1884.6
1788.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

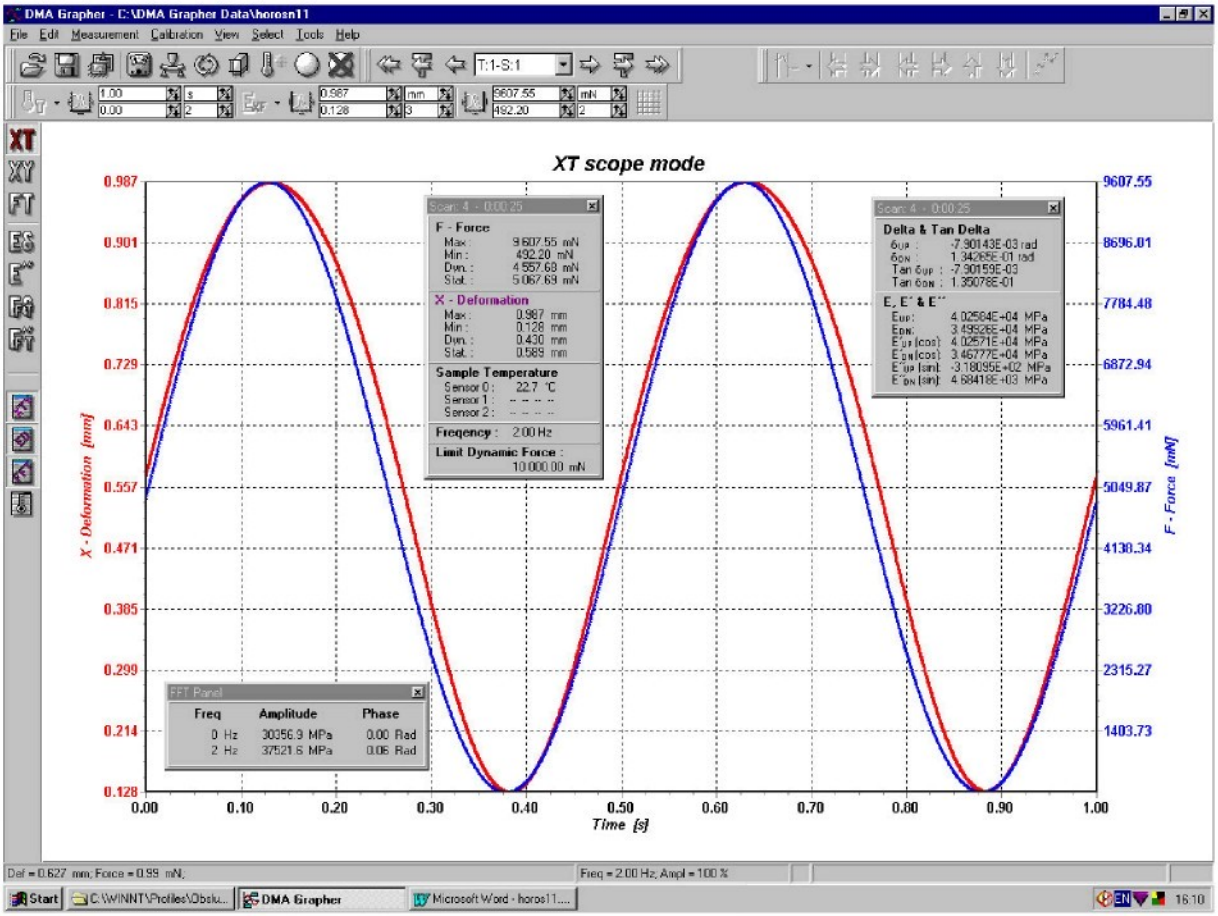
Experiment identification
- Measurement name: horosn11
- Measurement date: 10.11.2009 10:43:18
- Sample: horosn11
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 167.0 mN
- Operator: JH
- Comment

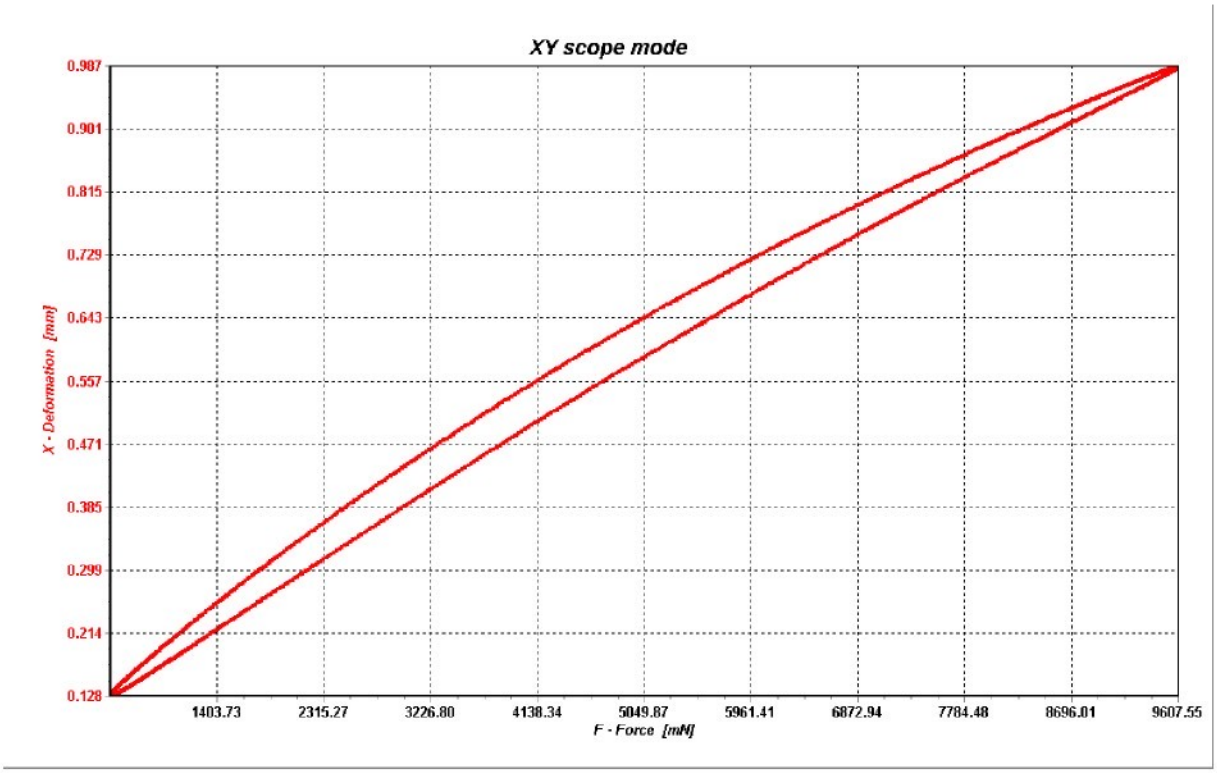
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

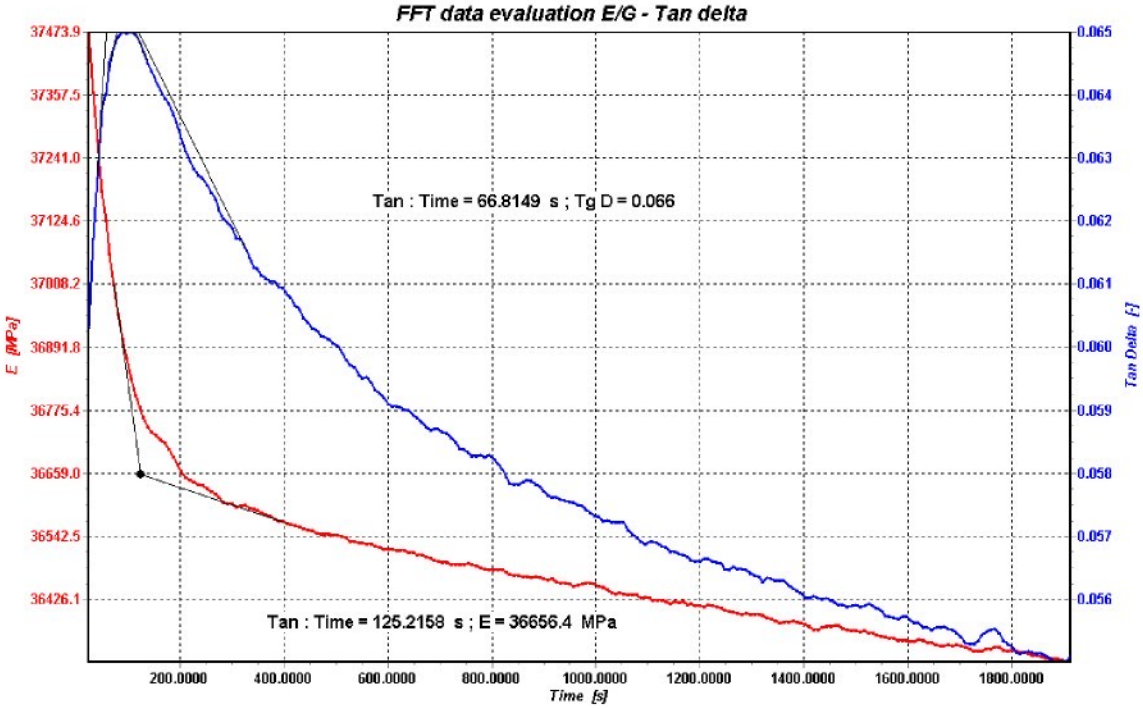
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 2 Hz
- Force limit : 10 000 mN

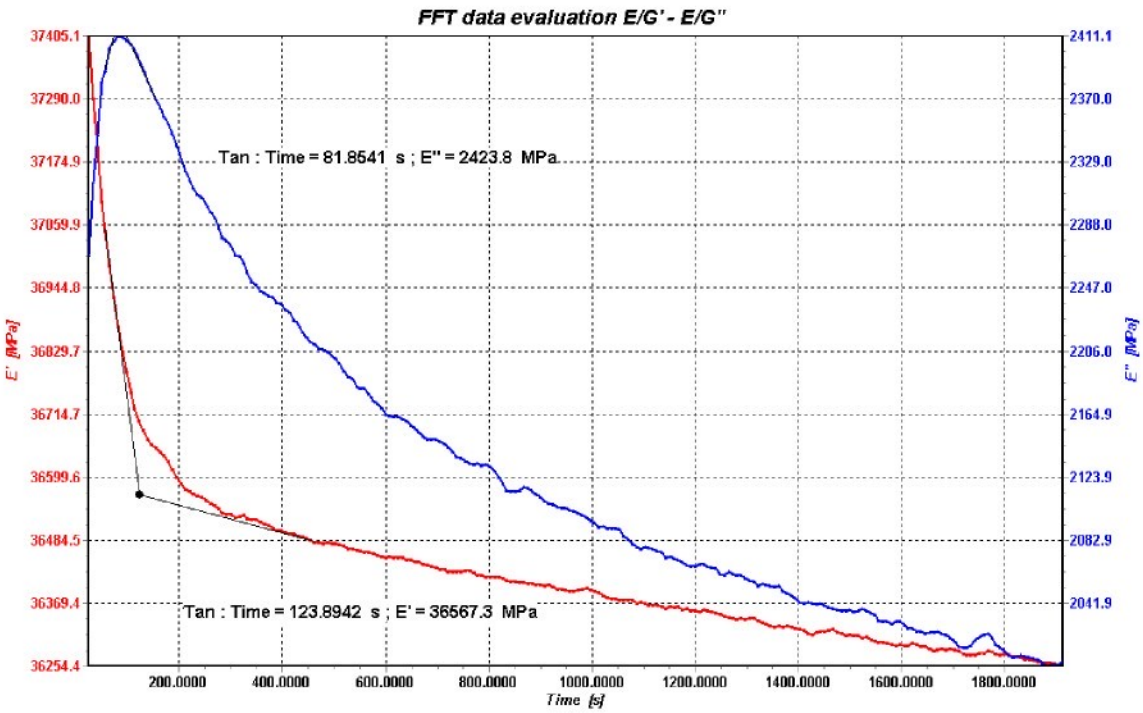
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 11.500 mm
  - Height: 0.550 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 3.52791E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horosn11
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 9607.55 mN
Min : 492.20 mN
Dyn. : 4557.69 mN
Stat. : 5067.69 mN
X - Deformation
Max : 0.987 mm
Min : 0.128 mm
Dyn. : 0.430 mm
Stat. : 0.589 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 22.7 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 2.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup : -7.90143E-03 rad
δon : 1.34265E-01 rad
Tan δup : -7.90159E-03
Tan δon : 1.35078E-01
E, E' & E''
Eup: 4.02584E+04 MPa
Eon: 3.49526E+04 MPa
E'up (cos): 4.02571E+04 MPa
E'on (cos): 3.46777E+04 MPa
E''up (sin): -3.18095E+02 MPa
E''on (sin): 4.68418E+03 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 30356.9 MPa 0.00 Rad
2 Hz 37521.6 MPa 0.06 Rad
Def = 0.627 mm; Force = 0.99 mN;
Freq = 2.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horos11....
16:10


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 66.8149 s ; Tg D = 0.066
Tan : Time = 125.2158 s ; E = 36656.4 MPa
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
37473.9
37357.5
37241.0
37124.6
37008.2
36891.8
36775.4
36659.0
36542.5
36426.1
0.065
0.064
0.063
0.062
0.061
0.060
0.059
0.058
0.057
0.056
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 81.8541 s ; E'' = 2423.8 MPa
Tan : Time = 123.8942 s ; E' = 36567.3 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
37405.1
37290.0
37174.9
37059.9
36944.8
36829.7
36714.7
36599.6
36484.5
36369.4
36254.4
2411.1
2370.0
2329.0
2288.0
2247.0
2206.0
2164.9
2123.9
2082.9
2041.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

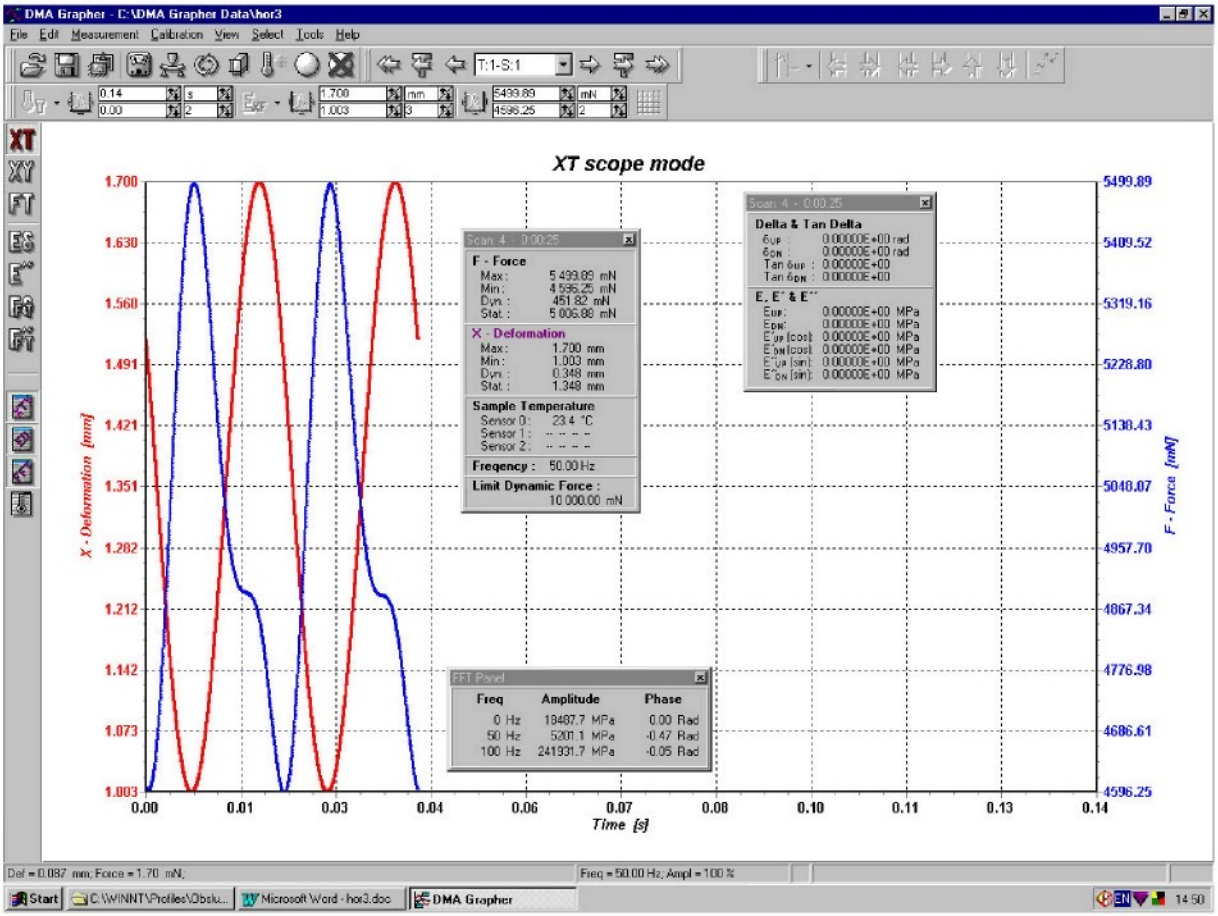
Experiment identification
- Measurement name: hor3
- Measurement date: 4.11.2009 11:09:46
- Sample: hor3
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 4.0 mN
- Operator: JH
- Comment

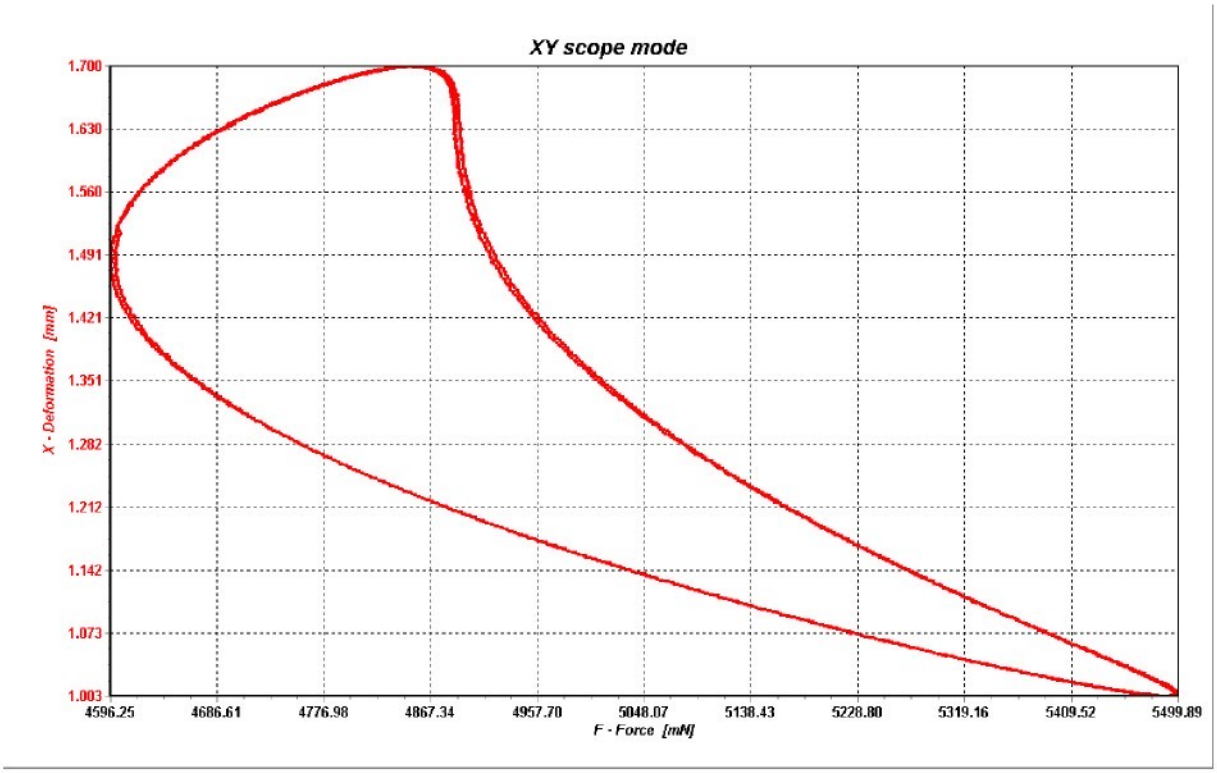
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

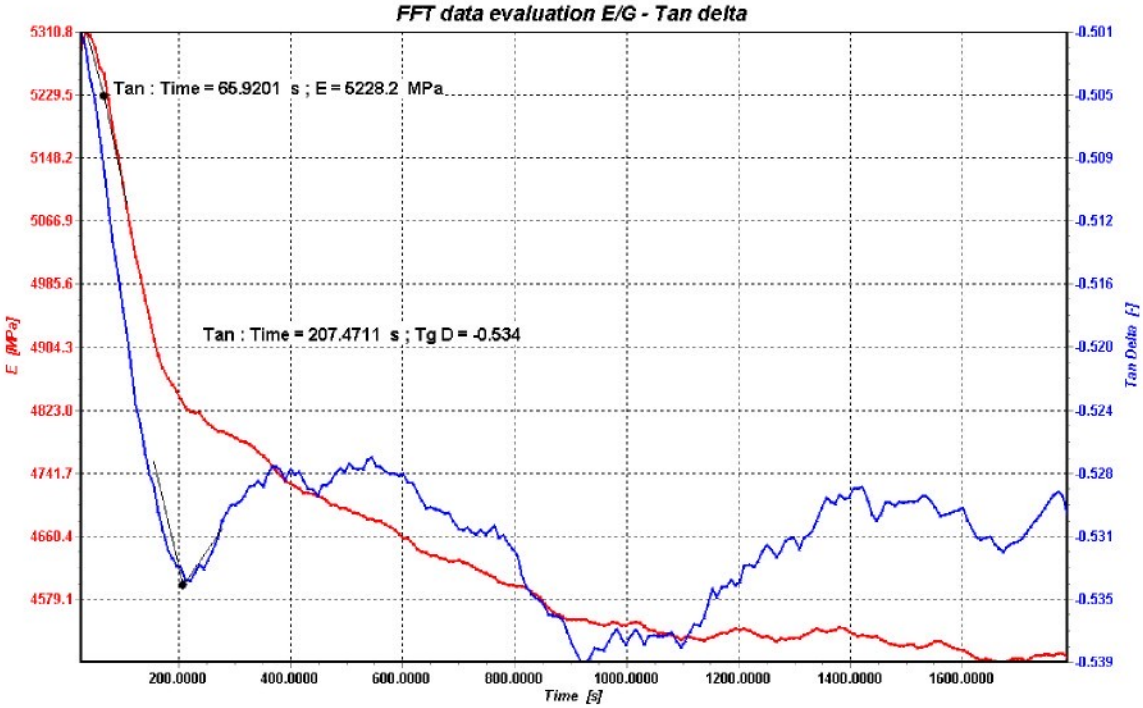
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 50 Hz
- Force limit : 10 000 mN

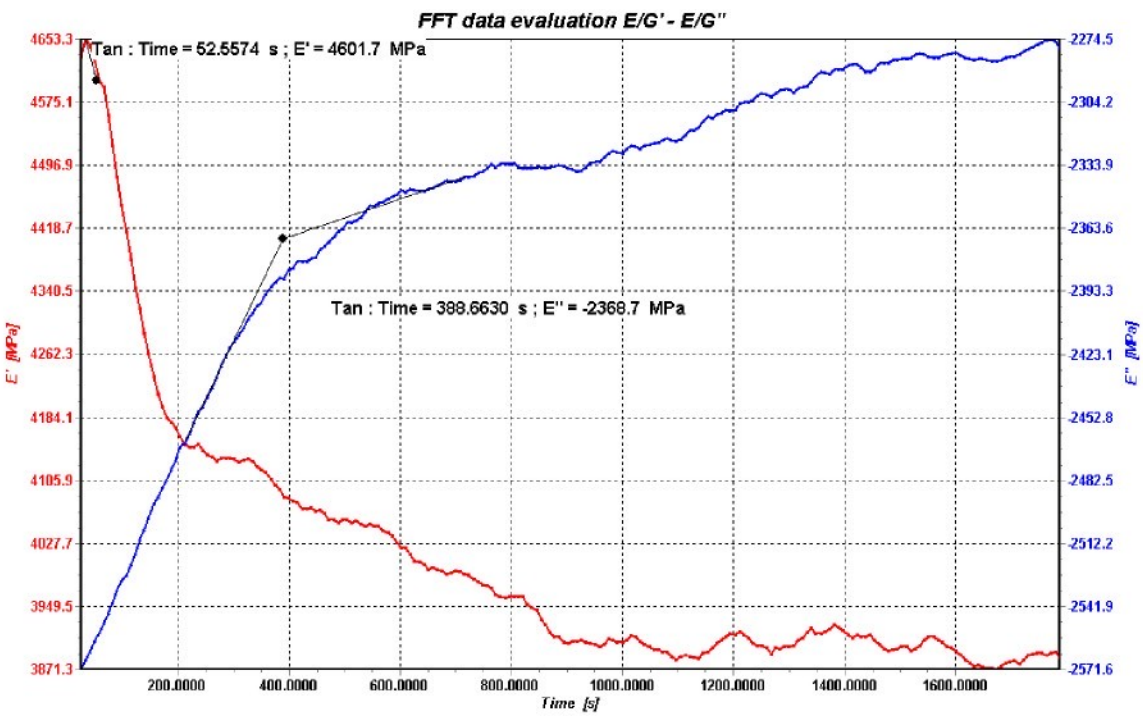
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.850 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 4.97696E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\hor3
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 5 499.89 mN
Min: 4 596.25 mN
Dyn.: 451.82 mN
Stat.: 5 006.88 mN
X - Deformation
Max: 1.700 mm
Min: 1.003 mm
Dyn.: 0.348 mm
Stat.: 1.348 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 23.4 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 50.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 19487.7 MPa 0.00 Rad
50 Hz 5201.1 MPa -0.47 Rad
100 Hz 241931.7 MPa -0.05 Rad
Def = 0.087 mm; Force = 1.70 mN;
Freq = 50.00 Hz; Ampl = 100 %


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 65.9201 s ; E = 5228.2 MPa
Tan : Time = 207.4711 s ; Tg D = -0.534
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
5310.8
5229.5
5148.2
5066.9
4985.6
4904.3
4823.0
4741.7
4660.4
4579.1
-0.501
-0.505
-0.509
-0.512
-0.516
-0.520
-0.524
-0.528
-0.531
-0.535
-0.539
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 52.5574 s ; E' = 4601.7 MPa
Tan : Time = 388.6630 s ; E'' = -2368.7 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
4653.3
4575.1
4496.9
4418.7
4340.5
4262.3
4184.1
4105.9
4027.7
3949.5
3871.3
2274.5
2304.2
2333.9
2363.6
2393.3
2423.1
2452.8
2482.5
2512.2
2541.9
2571.6
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000

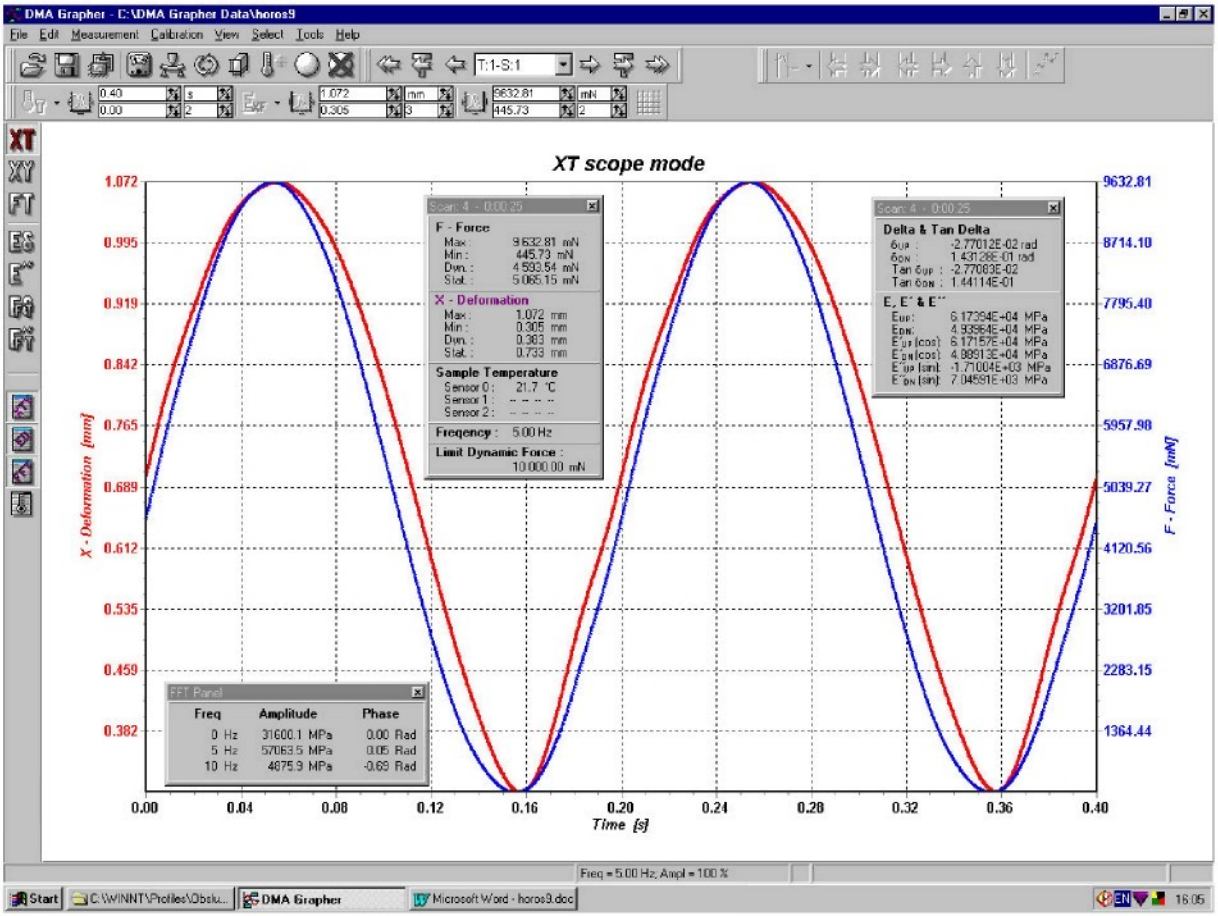
Experiment identification
- Measurement name: horos9
- Measurement date: 10.11.2009 09:32:04
- Sample: horos9
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 231.0 mN
- Operator: JH
- Comment

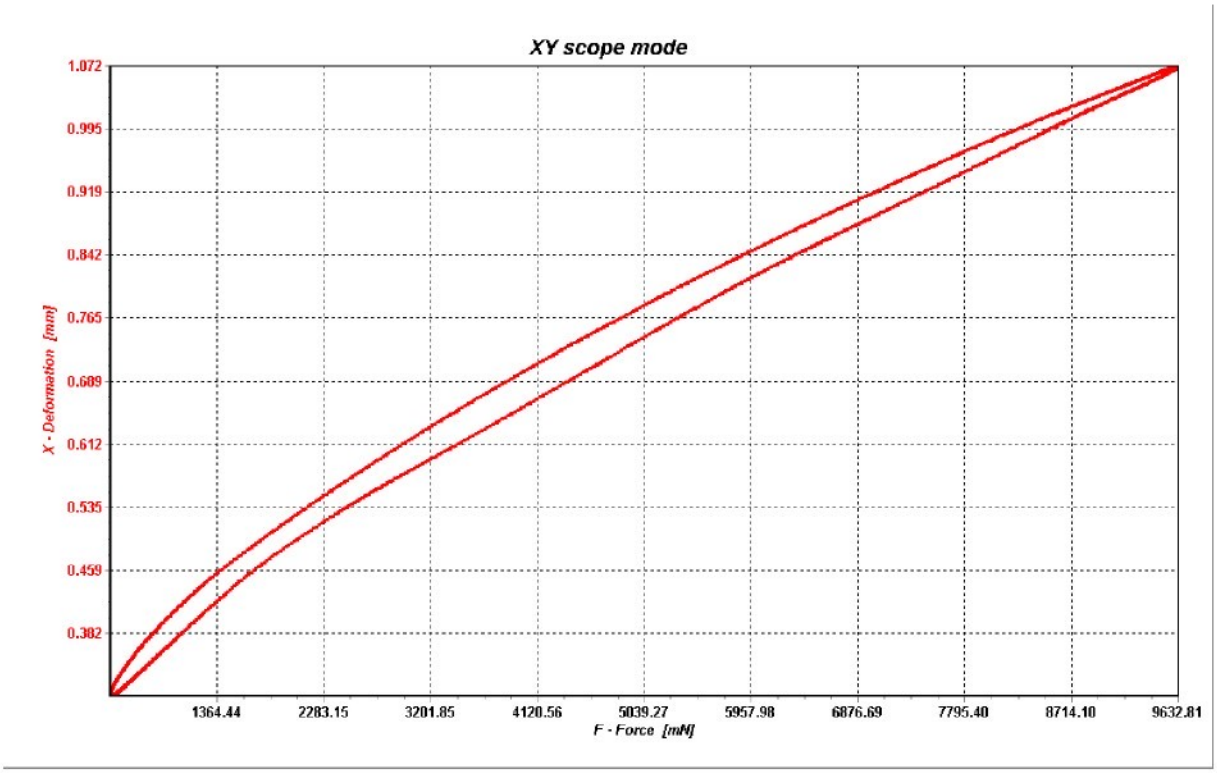
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

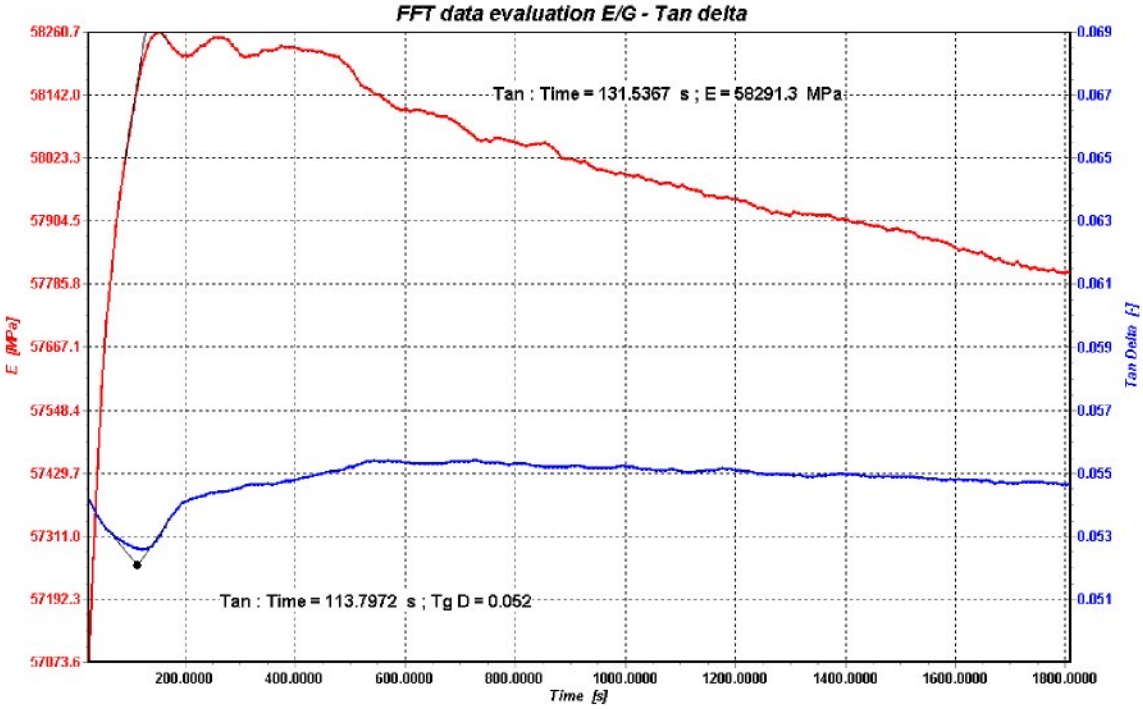
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 5 Hz
- Force limit : 10 000 mN

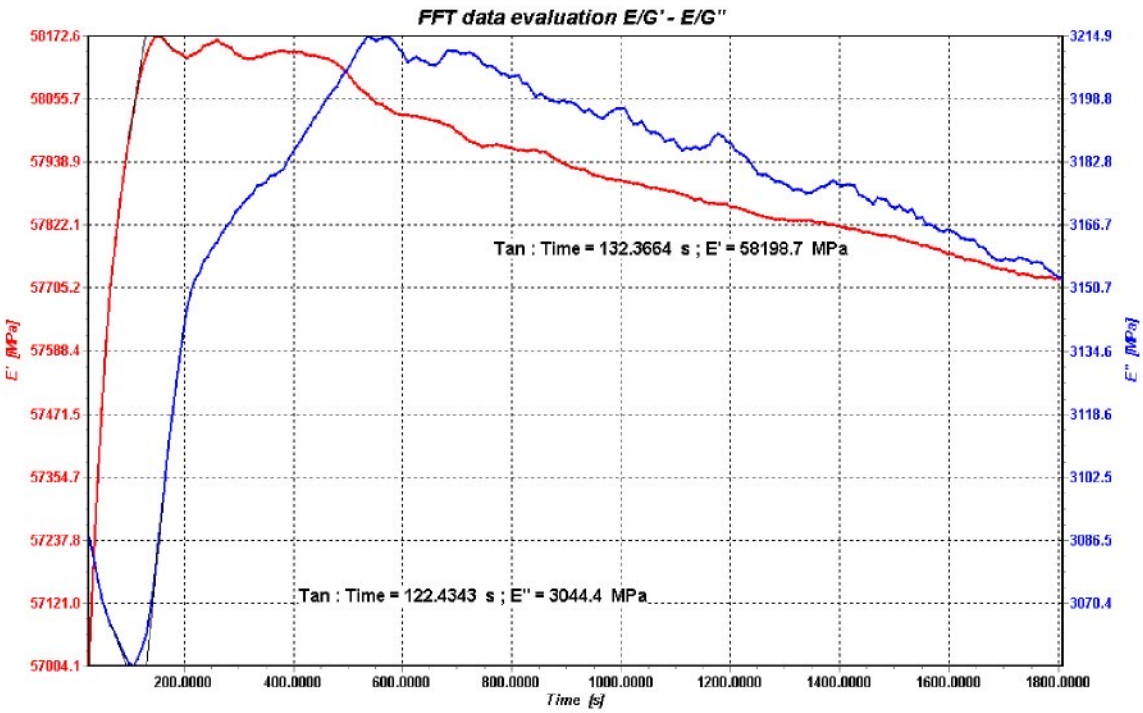
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 11.800 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 4.57627E+06

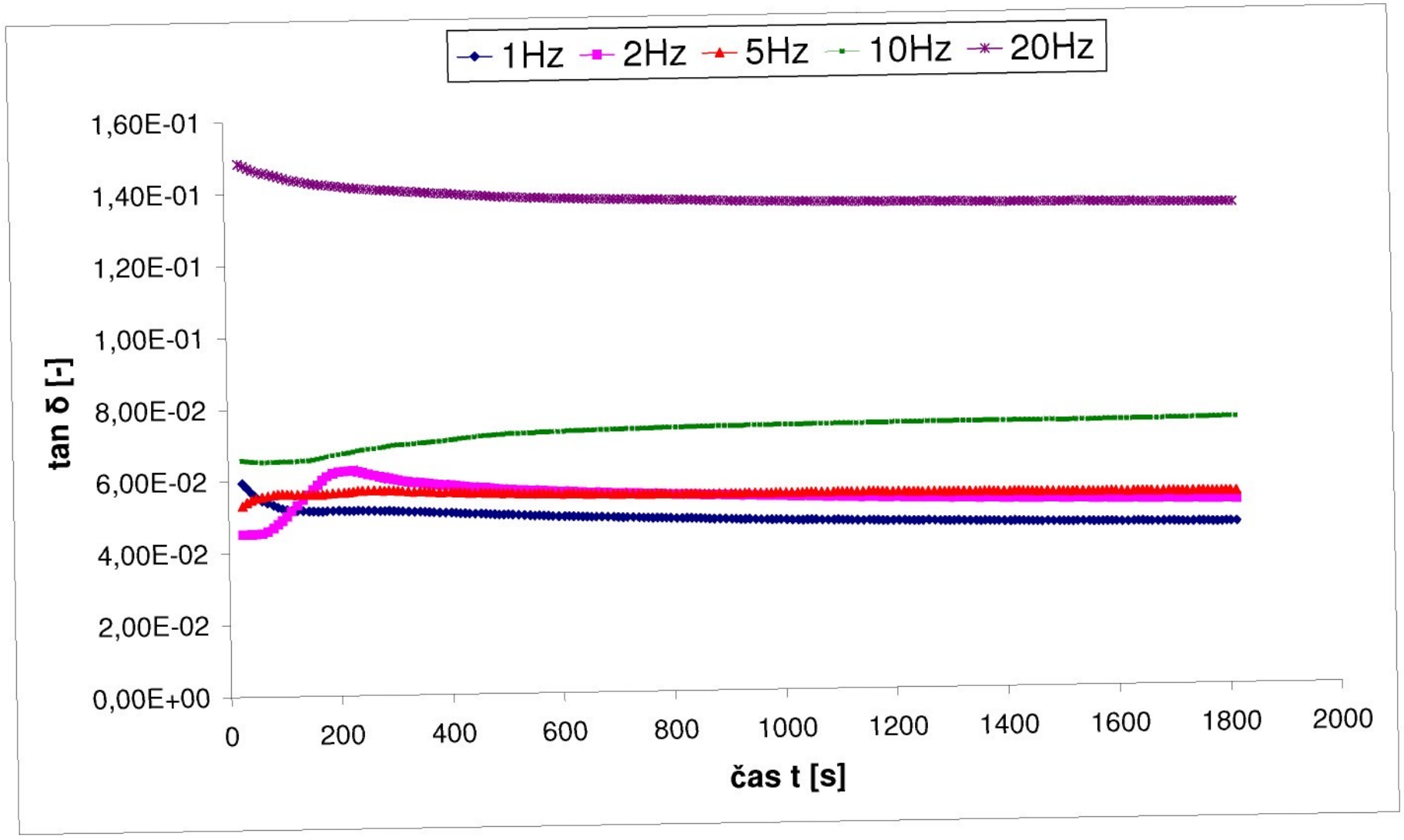
Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s

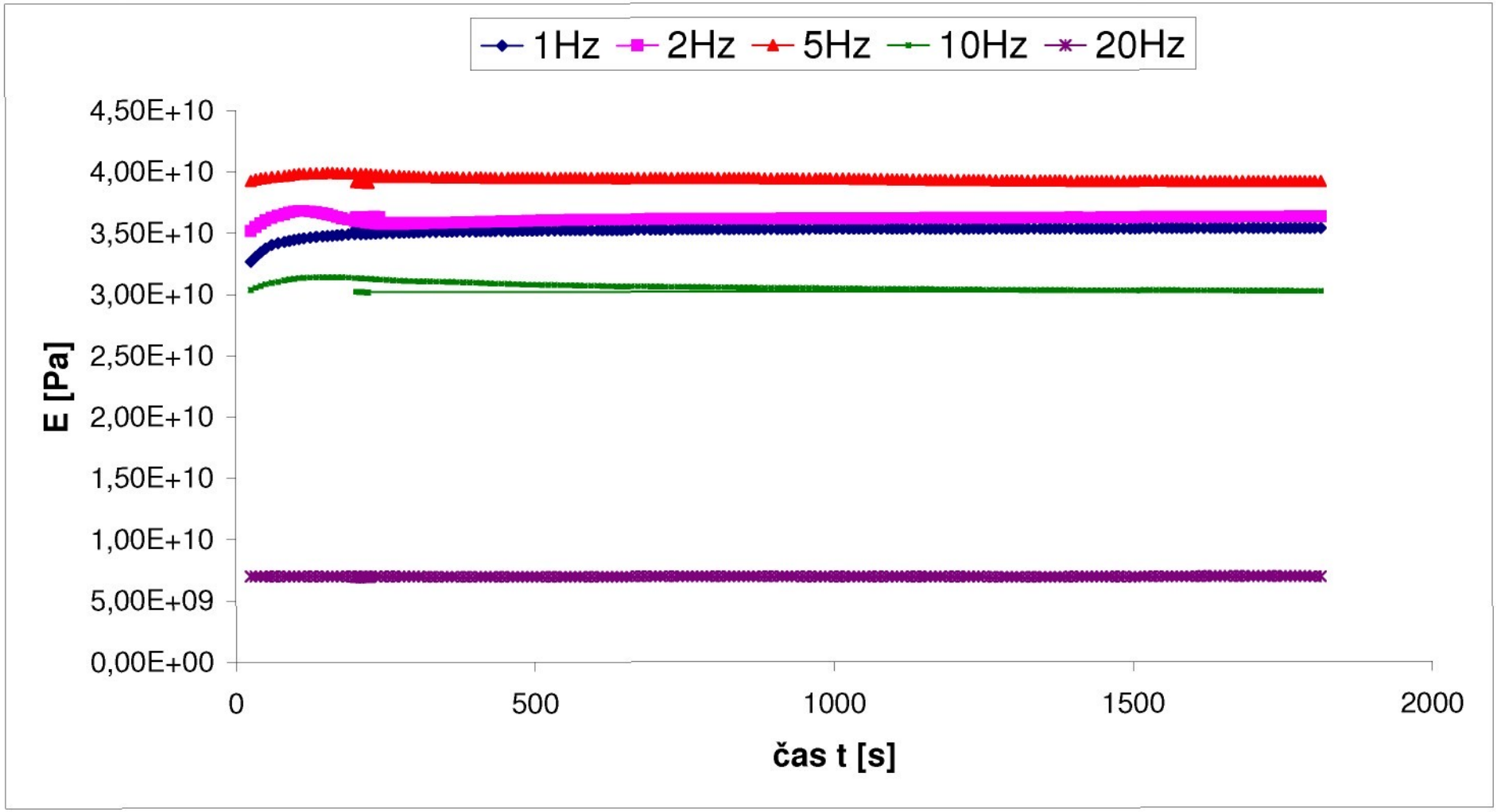

DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horos9
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 9632.81 mN
Min : 445.73 mN
Dyn. : 4593.54 mN
Stat. : 5065.15 mN
X - Deformation
Max : 1.072 mm
Min : 0.305 mm
Dyn. : 0.383 mm
Stat. : 0.733 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 21.7 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 5.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup : -2.77012E-02 rad
δon : 1.43128E-01 rad
Tan δup : -2.77083E-02
Tan δon : 1.44114E-01
E, E' & E''
Eup: 6.17394E+04 MPa
Eon: 4.93964E+04 MPa
E'up (cos): 6.17157E+04 MPa
E'on (cos): 4.88913E+04 MPa
E''up (sin): -1.71004E+03 MPa
E''on (sin): 7.04591E+03 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 31600.1 MPa 0.00 Rad
5 Hz 57083.5 MPa 0.05 Rad
10 Hz 4875.9 MPa -0.69 Rad
Freq = 5.00 Hz, Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horos9.doc
16:05

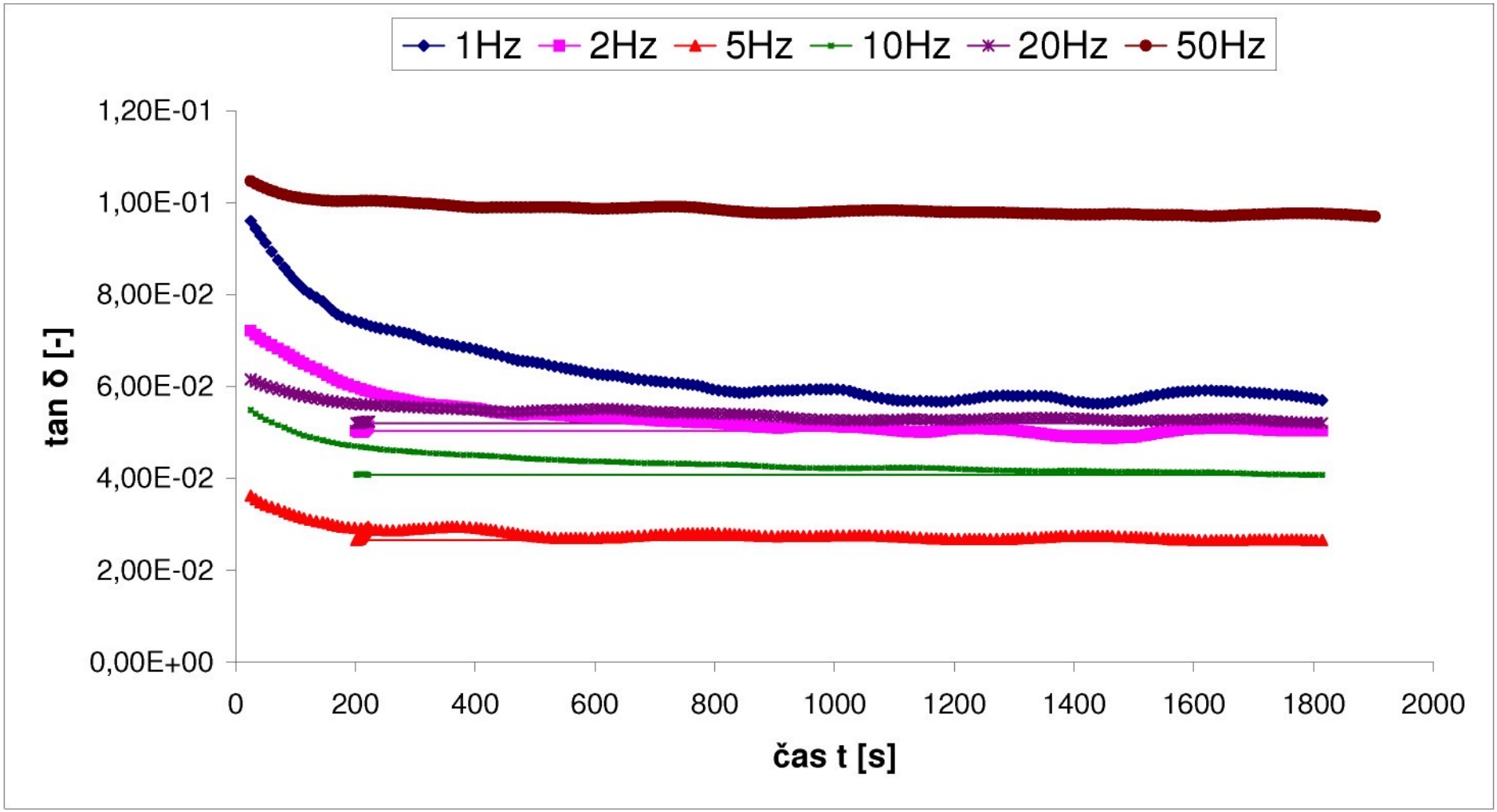

XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]

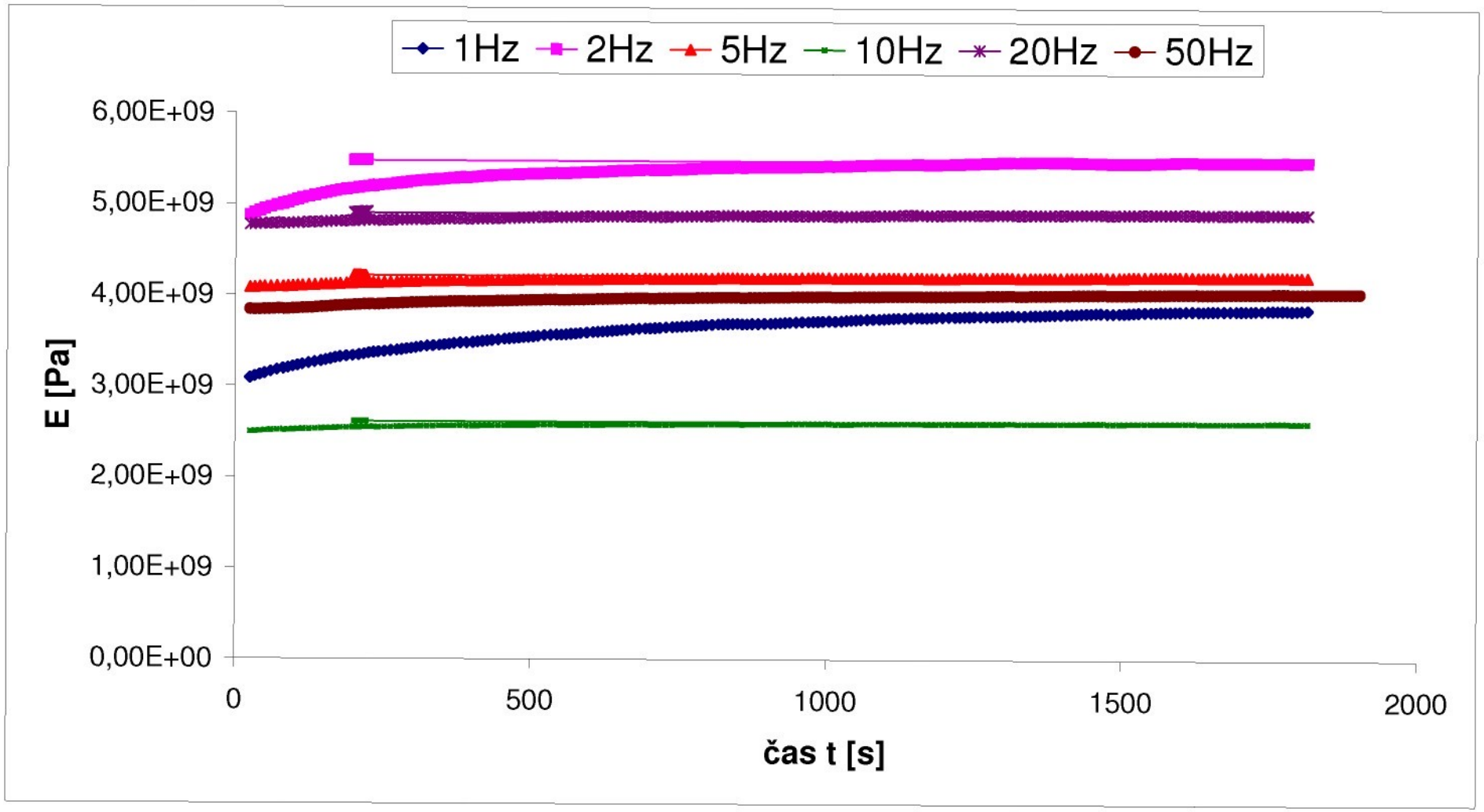

FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 131.5367 s ; E = 58291.3 MPa
Tan : Time = 113.7972 s ; Tg D = 0.052
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
58260.7
58142.0
58023.3
57904.5
57785.8
57667.1
57548.4
57429.7
57311.0
57192.3
57073.6
0.069
0.067
0.065
0.063
0.061
0.059
0.057
0.055
0.053
0.051
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

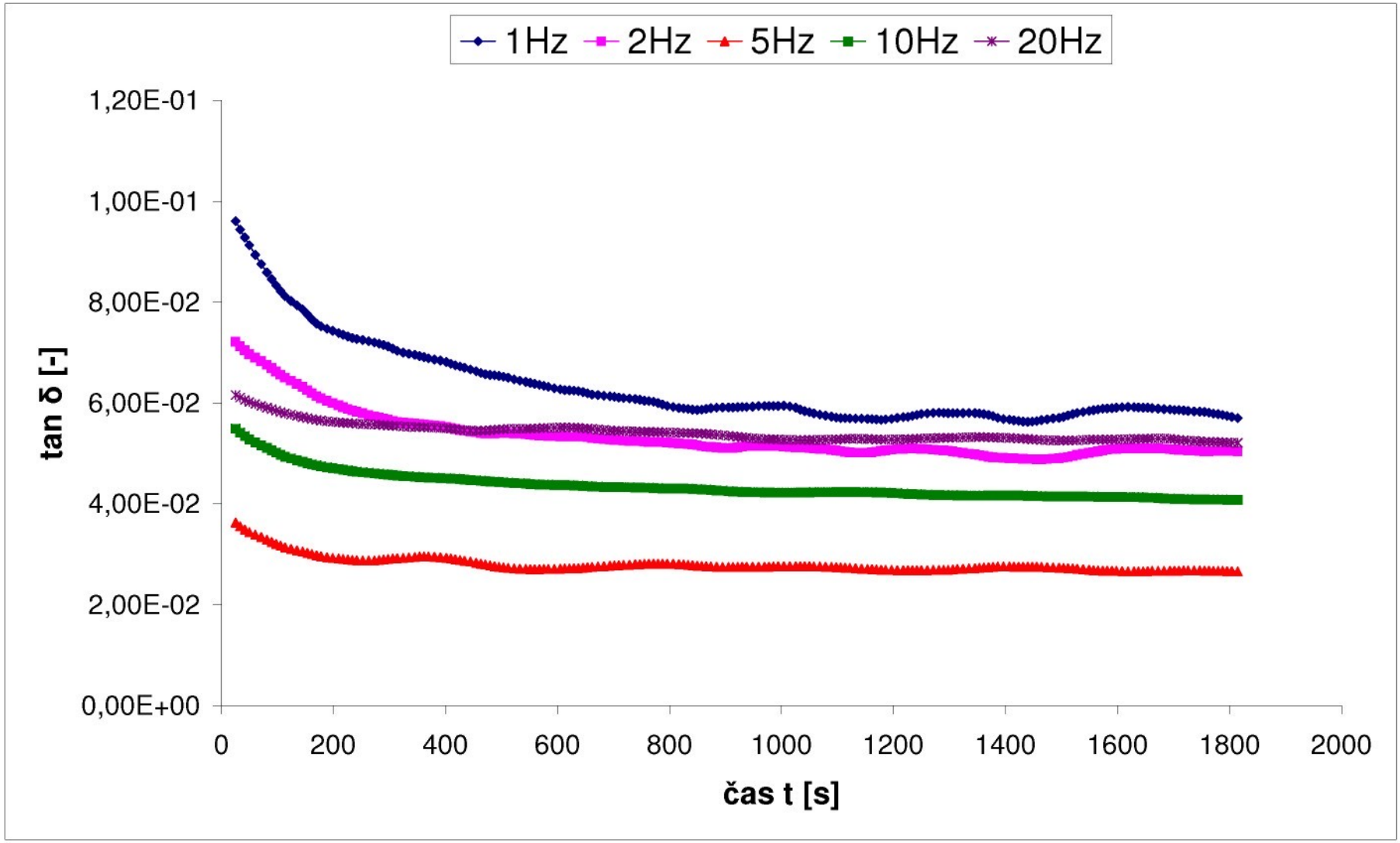

FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 132.3664 s ; E' = 58198.7 MPa
Tan : Time = 122.4343 s ; E'' = 3044.4 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
58172.6
58055.7
57938.9
57822.1
57705.2
57588.4
57471.5
57354.7
57237.8
57121.0
57004.1
3214.9
3198.8
3182.8
3166.7
3150.7
3134.6
3118.6
3102.5
3086.5
3070.4
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

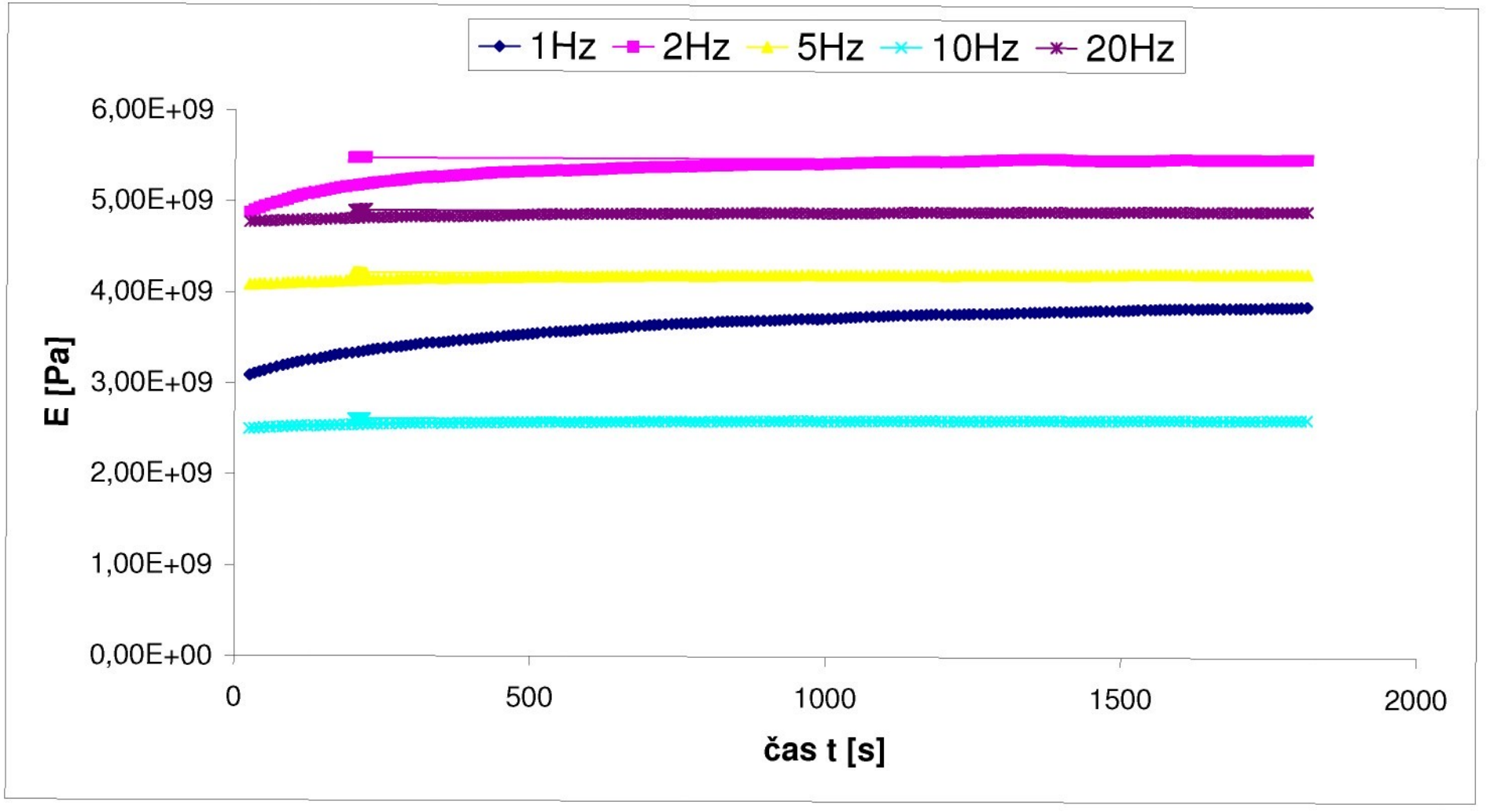

1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
1,60E-01
1,40E-01
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
4,50E+10
4,00E+10
3,50E+10
3,00E+10
2,50E+10
2,00E+10
1,50E+10
1,00E+10
5,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
50Hz
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
50Hz
6,00E+09
5,00E+09
4,00E+09
3,00E+09
2,00E+09
1,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
1,20E-01
1,00E-01
8,00E-02
6,00E-02
4,00E-02
2,00E-02
0,00E+00
tan δ [-]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
čas t [s]


1Hz
2Hz
5Hz
10Hz
20Hz
6,00E+09
5,00E+09
4,00E+09
3,00E+09
2,00E+09
1,00E+09
0,00E+00
E [Pa]
0
500
1000
1500
2000
čas t [s]

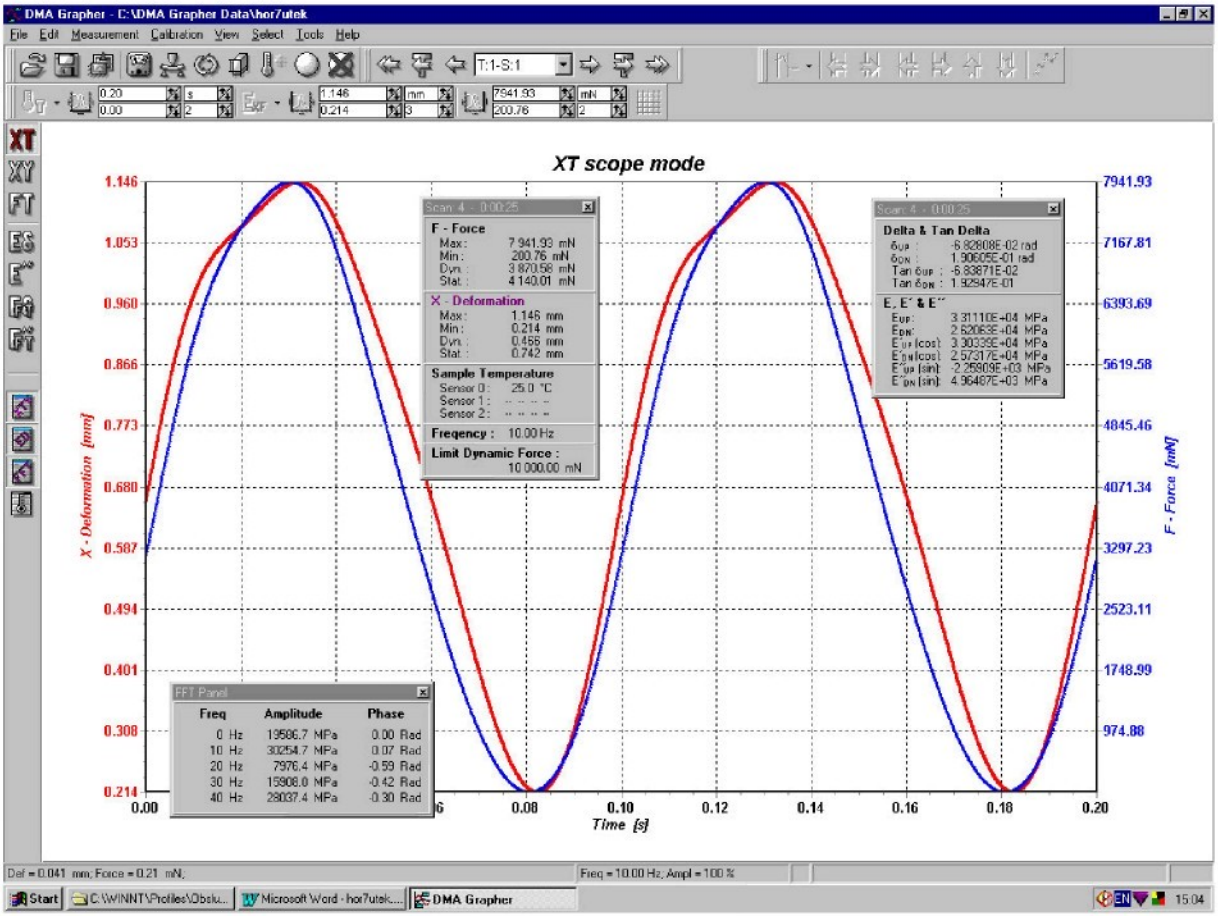
Experiment identification
- Measurement name: hor7utek
- Measurement date: 4.11.2009 13:52:27
- Sample: hor7utek
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 258.0 mN
- Operator: JH
- Comment

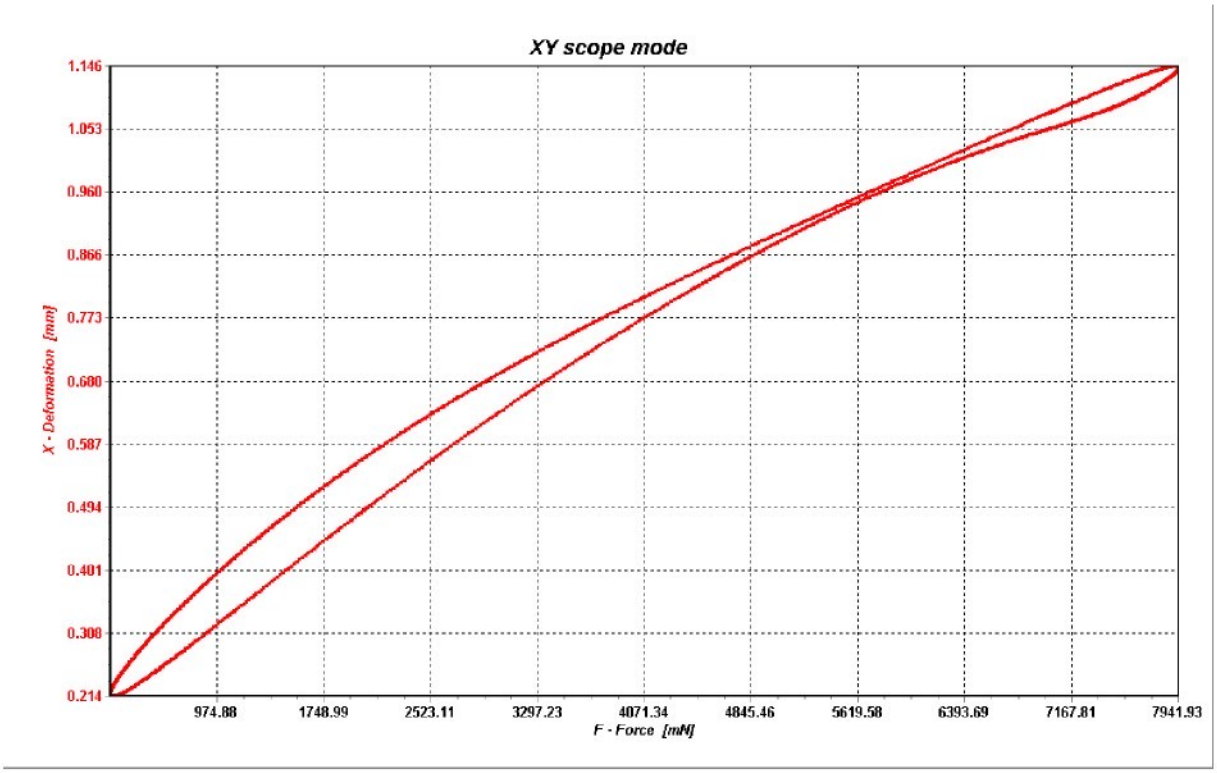
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

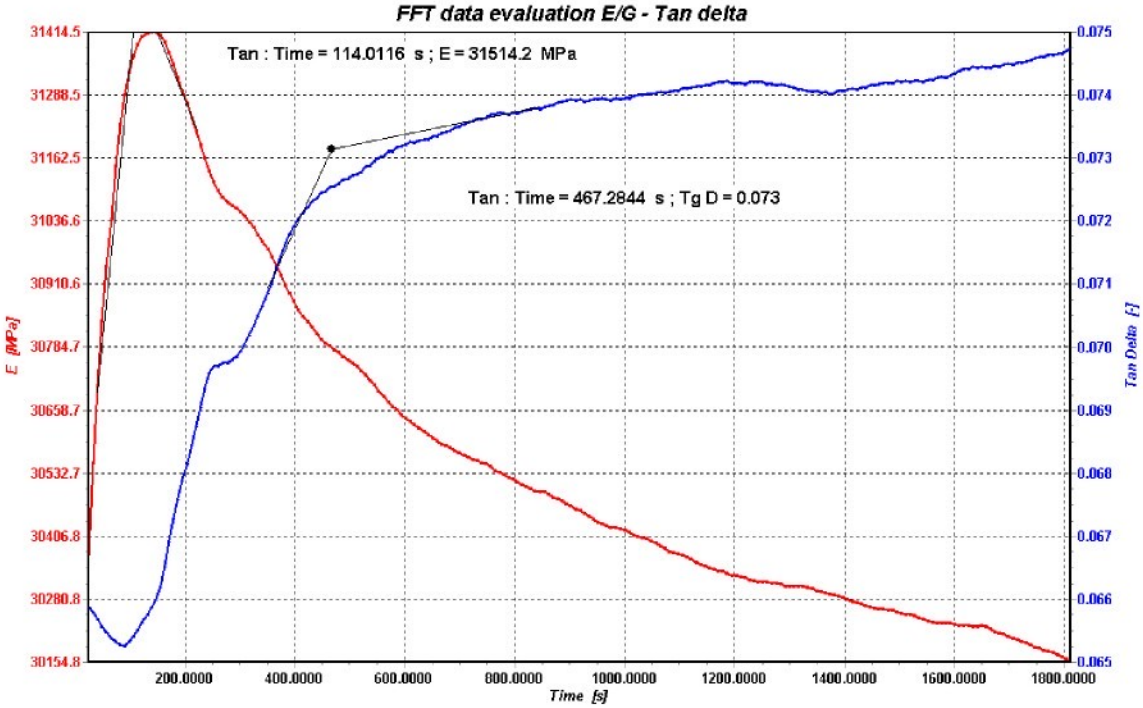
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 10 Hz
- Force limit : 10 000 mN

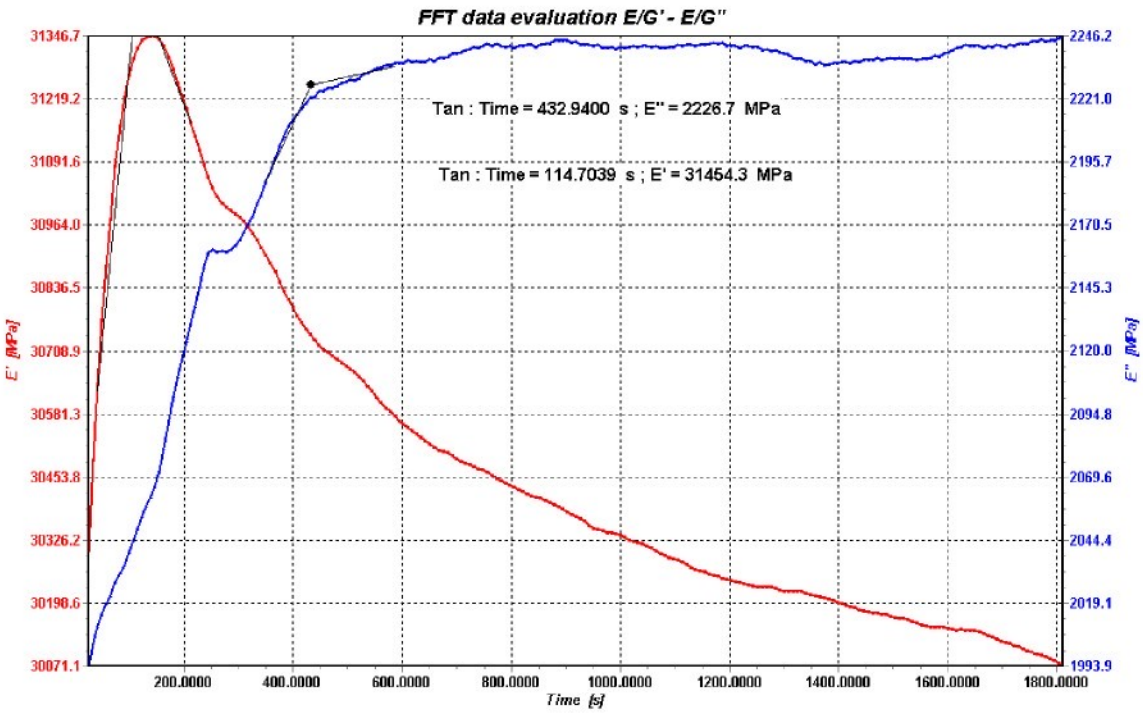
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 11.550 mm
  - Height: 0.550 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 3.51264E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\hor7utek
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 7 941.93 mN
Min: 200.76 mN
Dyn: 3 870.58 mN
Stat: 4 140.01 mN
X - Deformation
Max: 1.146 mm
Min: 0.214 mm
Dyn: 0.466 mm
Stat: 0.742 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 25.0 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 10.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δUP: -6.82808E-02 rad
δDN: 1.90605E-01 rad
Tan δUP: -6.83871E-02
Tan δDN: 1.92947E-01
E, E' & E''
EUP: 3.31110E+04 MPa
EDN: 2.62063E+04 MPa
E'UP (cos): 3.30339E+04 MPa
E'DN (cos): 2.57317E+04 MPa
E''UP (sin): -2.25809E+03 MPa
E''DN (sin): 4.96487E+03 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 19586.7 MPa 0.00 Rad
10 Hz 30254.7 MPa 0.07 Rad
20 Hz 7976.4 MPa -0.59 Rad
30 Hz 15908.0 MPa -0.42 Rad
40 Hz 28037.4 MPa -0.30 Rad
Def = 0.041 mm; Force = 0.21 mN;
Freq = 10.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
15:04


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 114.0116 s ; E = 31514.2 MPa
Tan : Time = 467.2844 s ; Tg D = 0.073
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
31414.5
31288.5
31162.5
31036.6
30910.6
30784.7
30658.7
30532.7
30406.8
30280.8
30154.8
0.075
0.074
0.073
0.072
0.071
0.070
0.069
0.068
0.067
0.066
0.065
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 432.9400 s ; E'' = 2226.7 MPa
Tan : Time = 114.7039 s ; E' = 31454.3 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
31346.7
31219.2
31091.6
30964.0
30836.5
30708.9
30581.3
30453.8
30326.2
30198.6
30071.1
2246.2
2221.0
2195.7
2170.5
2145.3
2120.0
2094.8
2069.6
2044.4
2019.1
1993.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

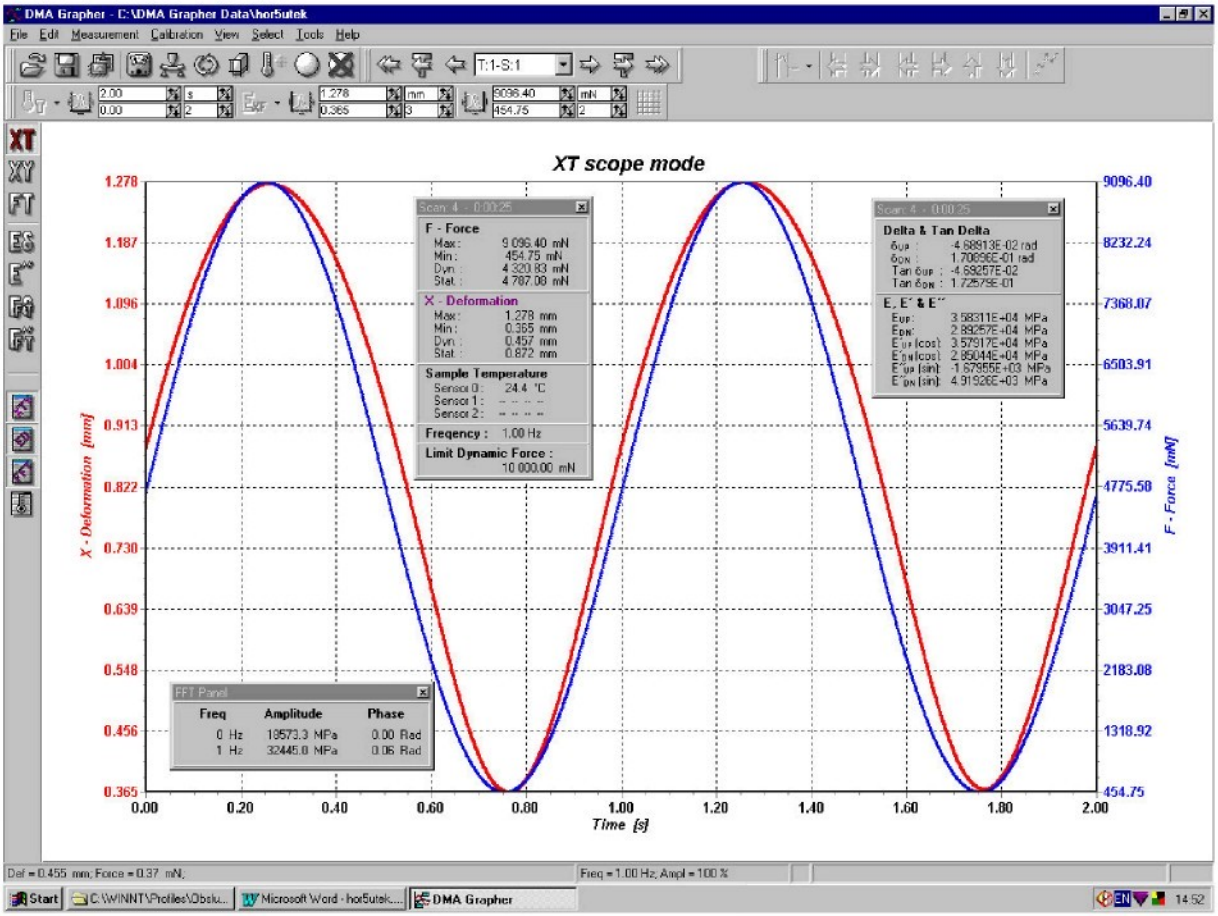
Experiment identification
- Measurement name: hord5/utek
- Measurement date: 4.11.2009 12:34:24
- Sample: hord5/utek
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 231.0 mN
- Operator: JH
- Comment

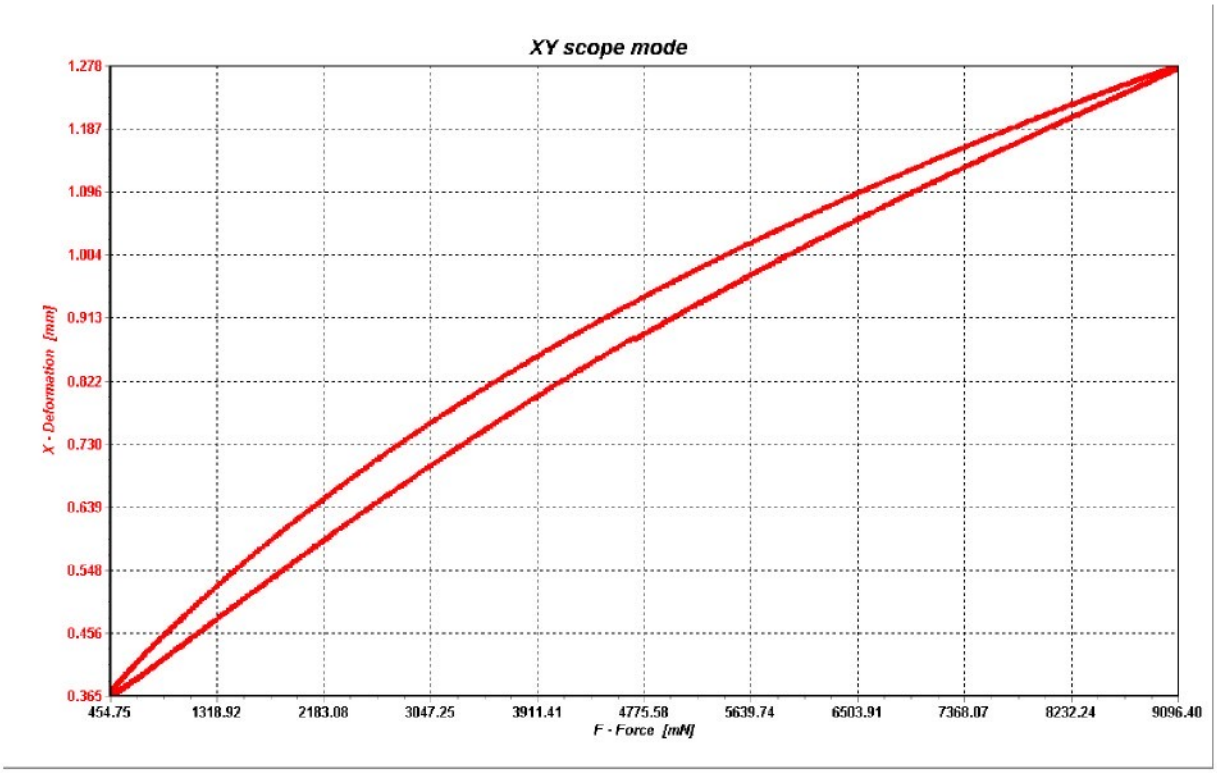
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

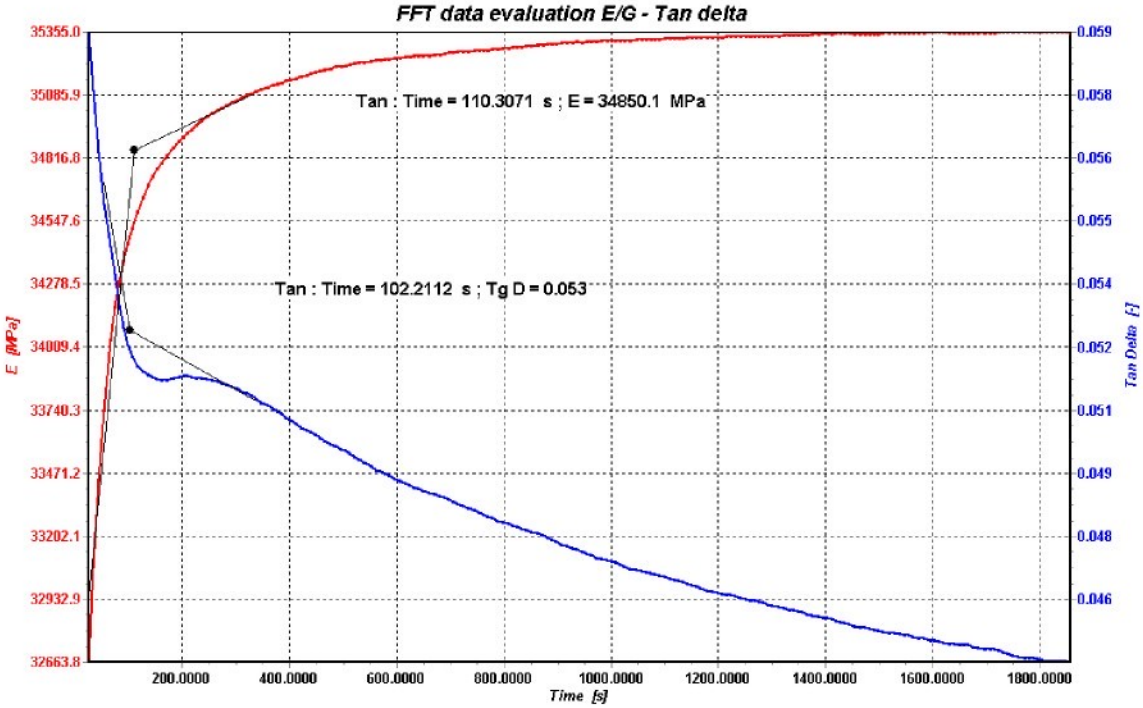
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 1 Hz
- Force limit : 10 000 mN

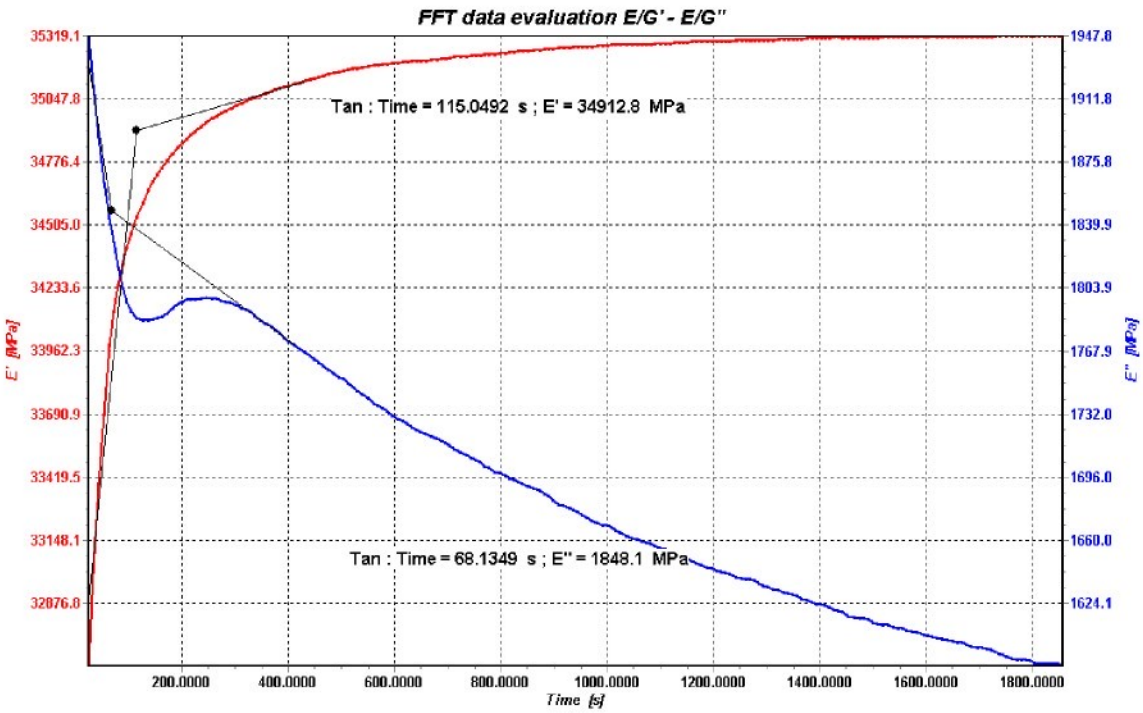
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 12.000 mm
  - Height: 0.550 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 3.38092E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\hor5utek
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 9 096.40 mN
Min: 454.75 mN
Dyn: 4 320.83 mN
Stat: 4 787.08 mN
X - Deformation
Max: 1.278 mm
Min: 0.365 mm
Dyn: 0.457 mm
Stat: 0.872 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 24.4 °C
Freqency: 1.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 18573.3 MPa 0.00 Rad
1 Hz 32445.0 MPa 0.06 Rad
Def = 0.455 mm; Force = 0.37 mN;
Freq = 1.00 Hz; Ampl = 100 %


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 110.3071 s ; E = 34850.1 MPa
Tan : Time = 102.2112 s ; Tg D = 0.053
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
35355.0
35085.9
34816.8
34547.6
34278.5
34009.4
33740.3
33471.2
33202.1
32932.9
32663.8
0.059
0.058
0.056
0.055
0.054
0.052
0.051
0.049
0.048
0.046
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 115.0492 s ; E' = 34912.8 MPa
Tan : Time = 68.1349 s ; E'' = 1848.1 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
35319.1
35047.8
34776.4
34505.0
34233.6
33962.3
33690.9
33419.5
33148.1
32876.8
1947.8
1911.8
1875.8
1839.9
1803.9
1767.9
1732.0
1696.0
1660.0
1624.1
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

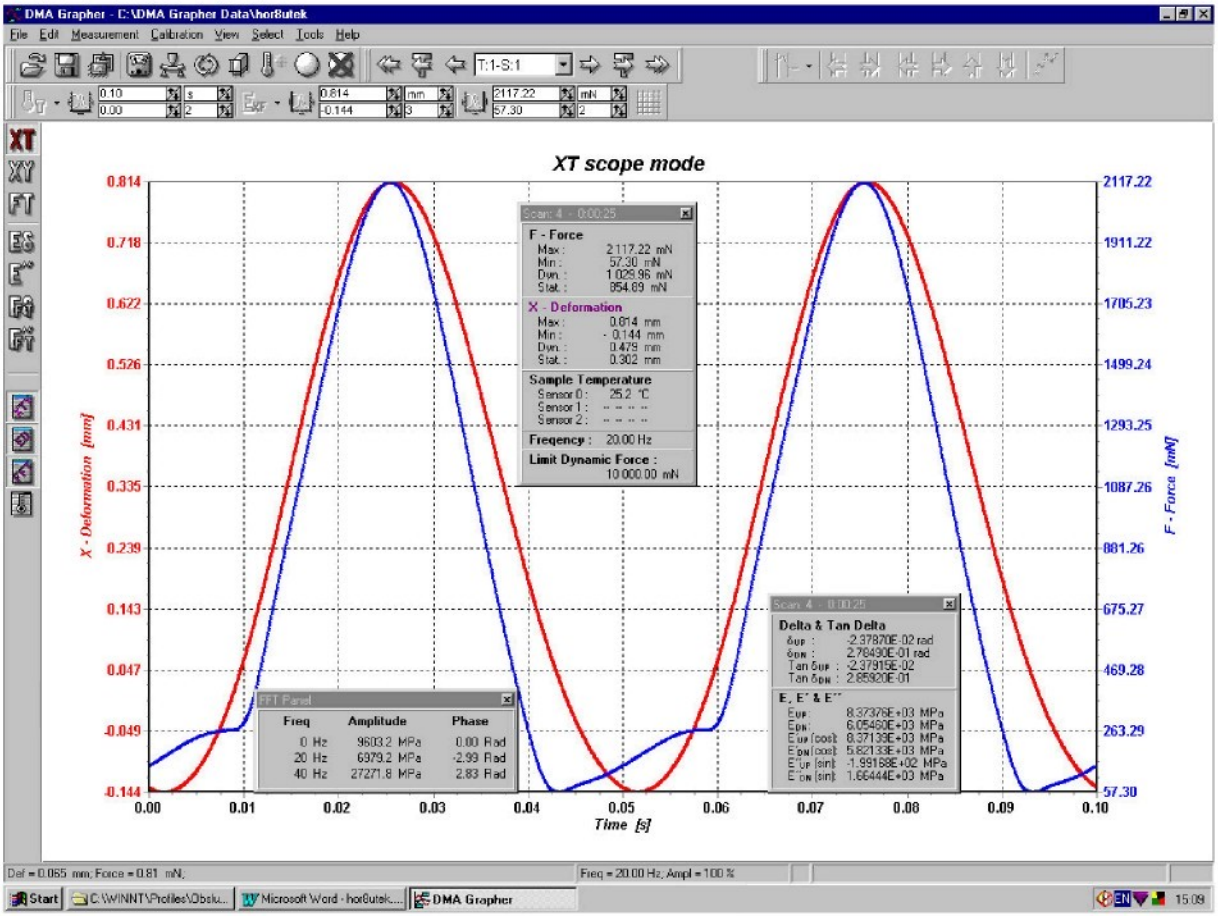
Experiment identification
- Measurement name: hor8utek
- Measurement date: 4.11.2009 14:30:39
- Sample: hor8utek
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 258.0 mN
- Operator: JH
- Comment

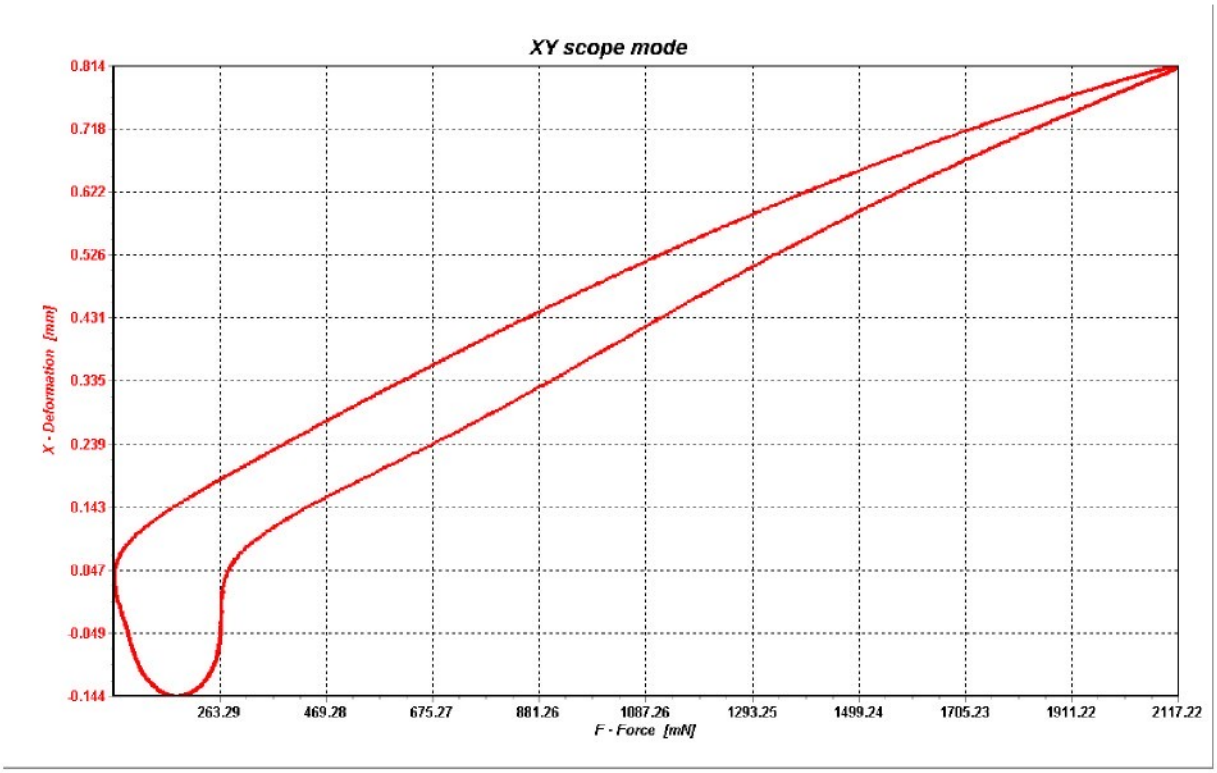
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

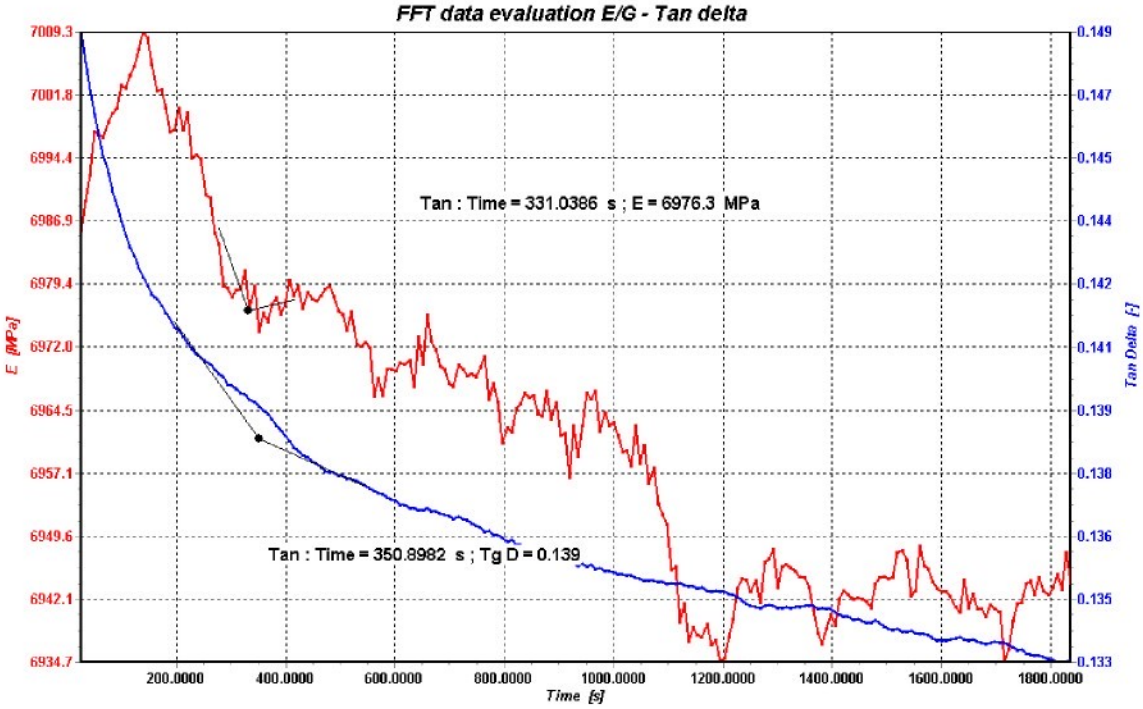
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 20 Hz
- Force limit : 10 000 mN

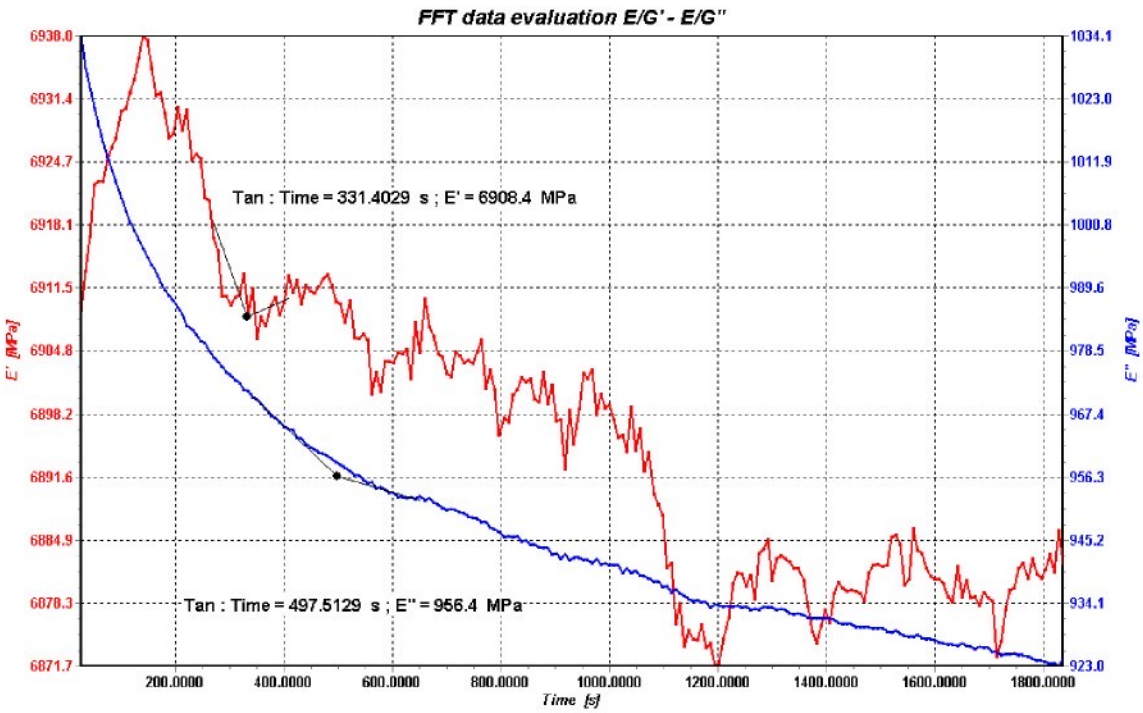
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 11.950 mm
  - Height: 0.550 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 3.39506E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horButek
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 2117.22 mN
Min : 57.30 mN
Dyn : 1029.96 mN
Stat : 854.89 mN
X - Deformation
Max : 0.814 mm
Min : - 0.144 mm
Dyn : 0.479 mm
Stat : 0.302 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 25.2 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 20.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δUP : -2.37870E-02 rad
δDN : 2.78490E-01 rad
Tan δUP : -2.37915E-02
Tan δDN : 2.85920E-01
E, E' & E''
EUP : 8.37376E+03 MPa
EDN : 6.05460E+03 MPa
EUP (cos) : 8.37139E+03 MPa
EDN (cos) : 5.82133E+03 MPa
E''UP (sin) : -1.99168E+02 MPa
E''DN (sin) : 1.66444E+03 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 9603.2 MPa 0.00 Rad
20 Hz 6979.2 MPa -2.99 Rad
40 Hz 27271.8 MPa 2.83 Rad
Def = 0.065 mm; Force = 0.81 mN;
Freq = 20.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
15:09


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 331.0386 s ; E = 6976.3 MPa
Tan : Time = 350.8982 s ; Tg D = 0.139
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
7009.3
7001.8
6994.4
6986.9
6979.4
6972.0
6964.5
6957.1
6949.6
6942.1
6934.7
0.149
0.147
0.145
0.144
0.142
0.141
0.139
0.138
0.136
0.135
0.133
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 331.4029 s ; E' = 6908.4 MPa
Tan : Time = 497.5129 s ; E'' = 956.4 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
6938.0
6931.4
6924.7
6918.1
6911.5
6904.8
6898.2
6891.6
6884.9
6878.3
6871.7
1034.1
1023.0
1011.9
1000.8
989.6
978.5
967.4
956.3
945.2
934.1
923.0
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

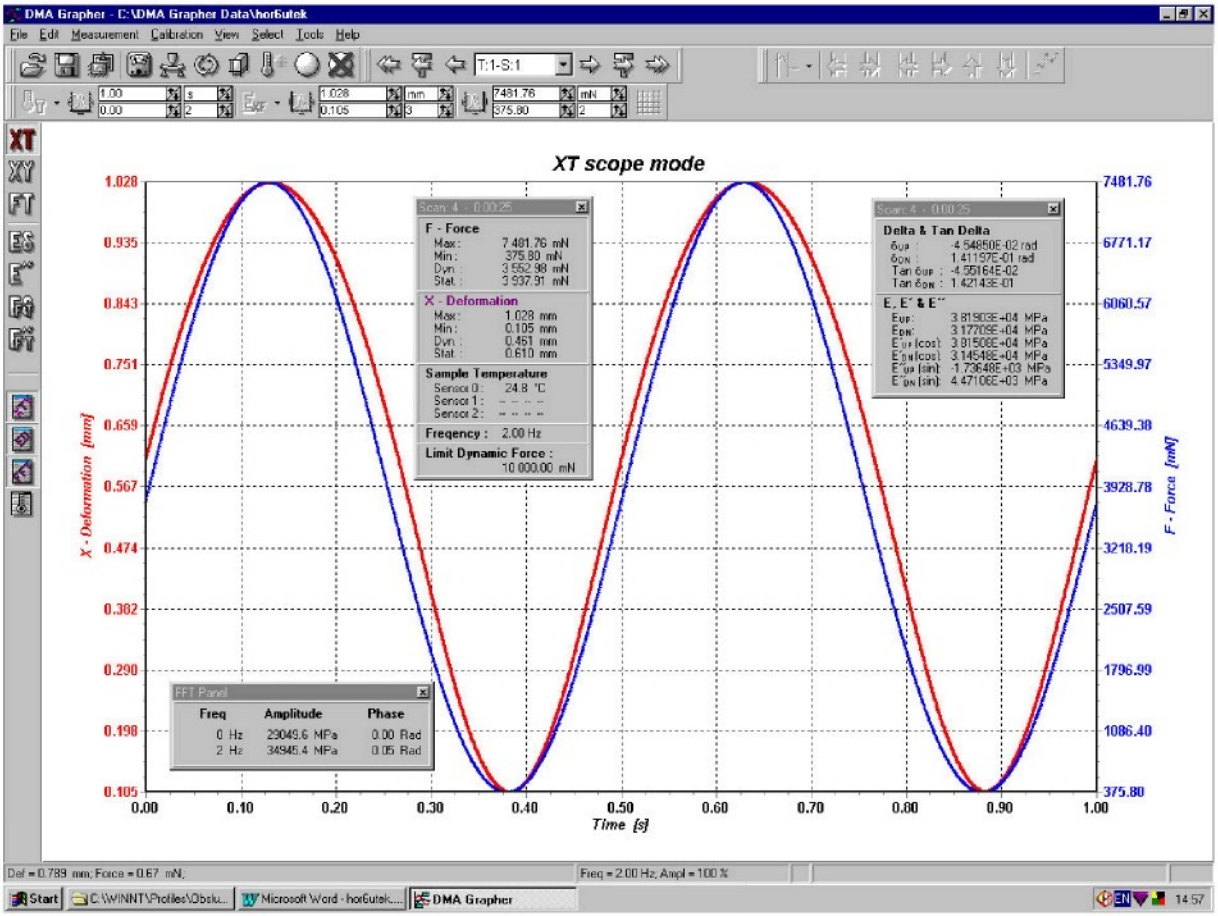
Experiment identification
- Measurement name: hor6utek
- Measurement date: 4.11.2009 13:10:16
- Sample: hor6utek
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 259.0 mN
- Operator: JH
- Comment

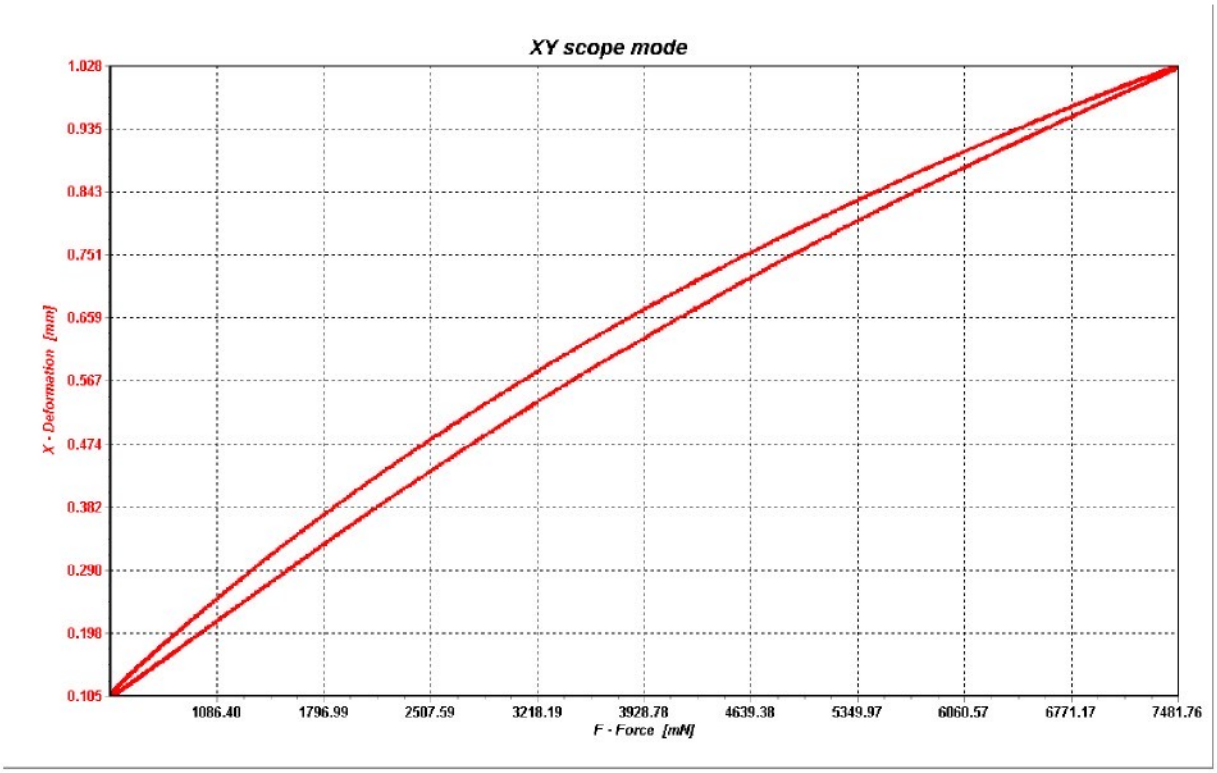
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

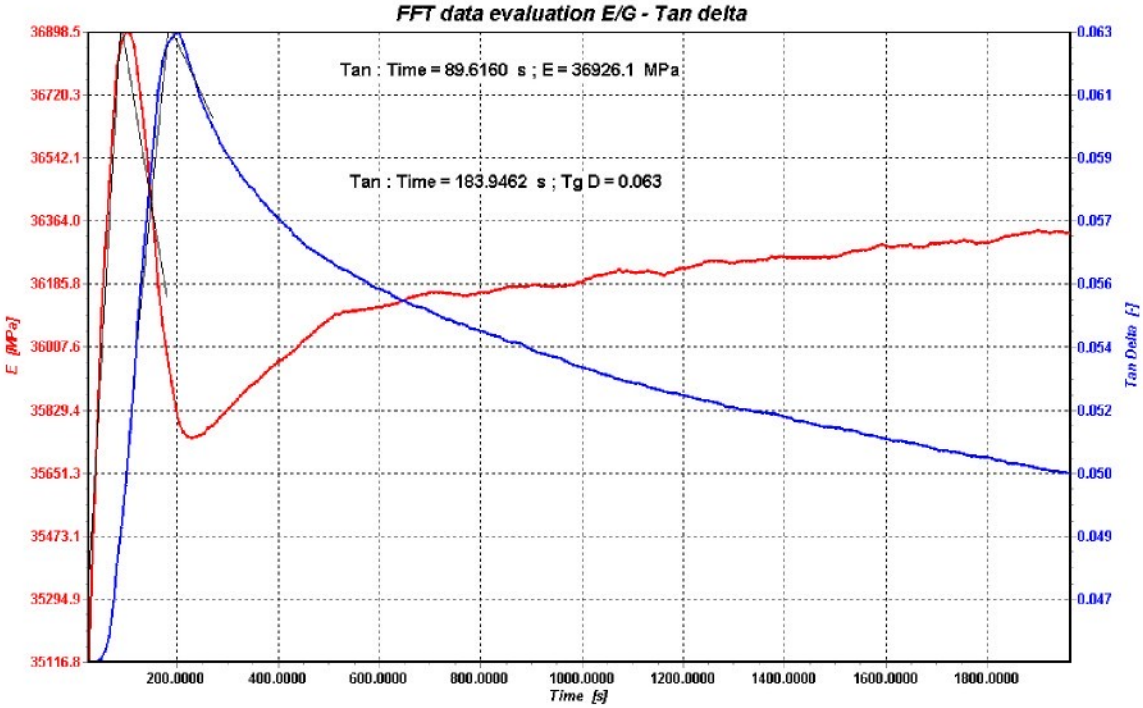
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 2 Hz
- Force limit : 10 000 mN

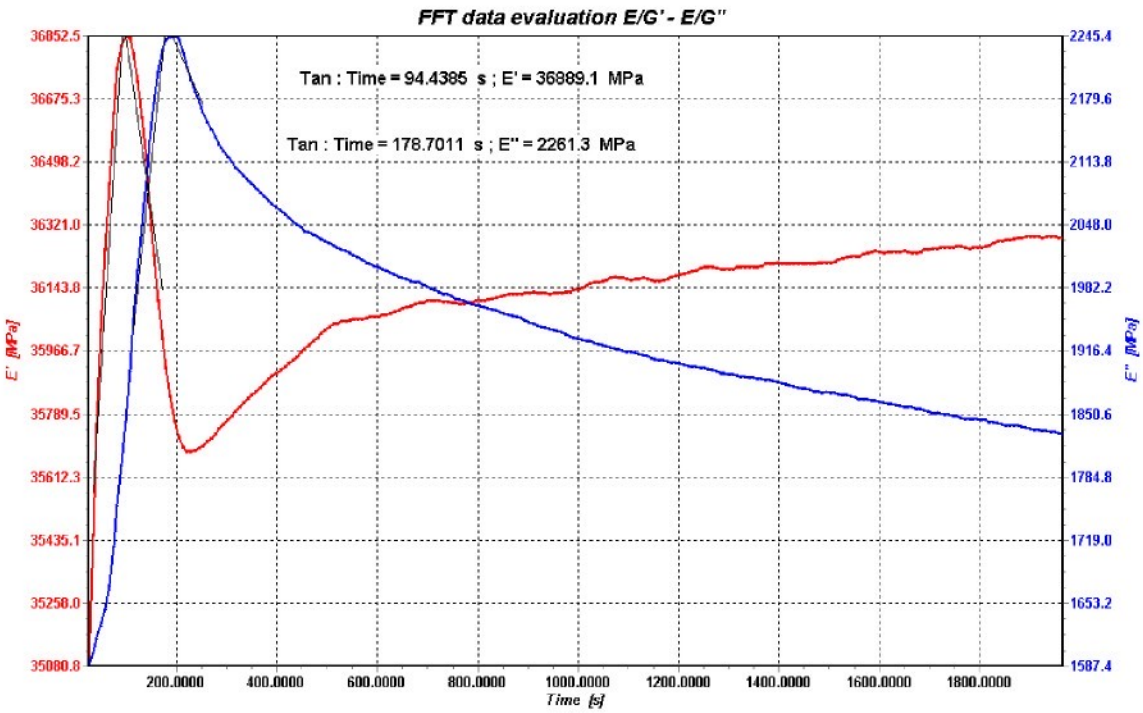
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 12.000 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 4.50000E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horGutek
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 7 481.76 mN
Min: 375.80 mN
Dyn: 3 552.98 mN
Stat: 3 937.91 mN
X - Deformation
Max: 1.028 mm
Min: 0.105 mm
Dyn: 0.461 mm
Stat: 0.610 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 24.8 °C
Freqency: 2.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 29049.6 MPa 0.00 Rad
2 Hz 34945.4 MPa 0.05 Rad
Def = 0.789 mm; Force = 0.67 mN;
Freq = 2.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
14:57


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 89.6160 s ; E = 36926.1 MPa
Tan : Time = 183.9462 s ; Tg D = 0.063
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
36898.5
36720.3
36542.1
36364.0
36185.8
36007.6
35829.4
35651.3
35473.1
35294.9
35116.8
0.063
0.061
0.059
0.057
0.056
0.054
0.052
0.050
0.049
0.047
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 94.4385 s ; E' = 36889.1 MPa
Tan : Time = 178.7011 s ; E'' = 2261.3 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
36852.5
36675.3
36498.2
36321.0
36143.8
35966.7
35789.5
35612.3
35435.1
35258.0
35080.8
2245.4
2179.6
2113.8
2048.0
1982.2
1916.4
1850.6
1784.8
1719.0
1653.2
1587.4
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

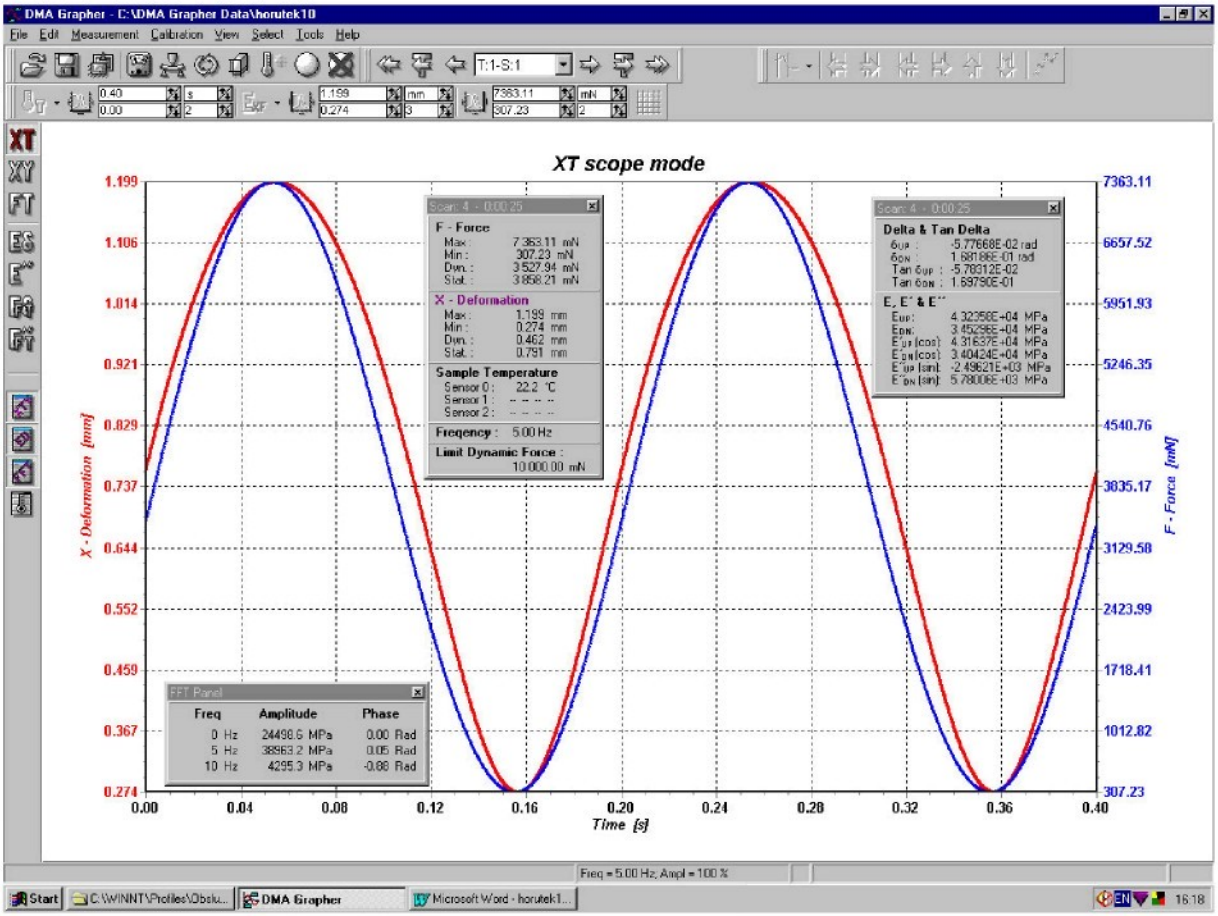
Experiment identification
- Measurement name: horutek10
- Measurement date: 10.11.2009 10:07:16
- Sample: horutek10
- Pretension:
  - Deformation: 0.050 mm
  - Force: 233.0 mN
- Operator: JH
- Comment

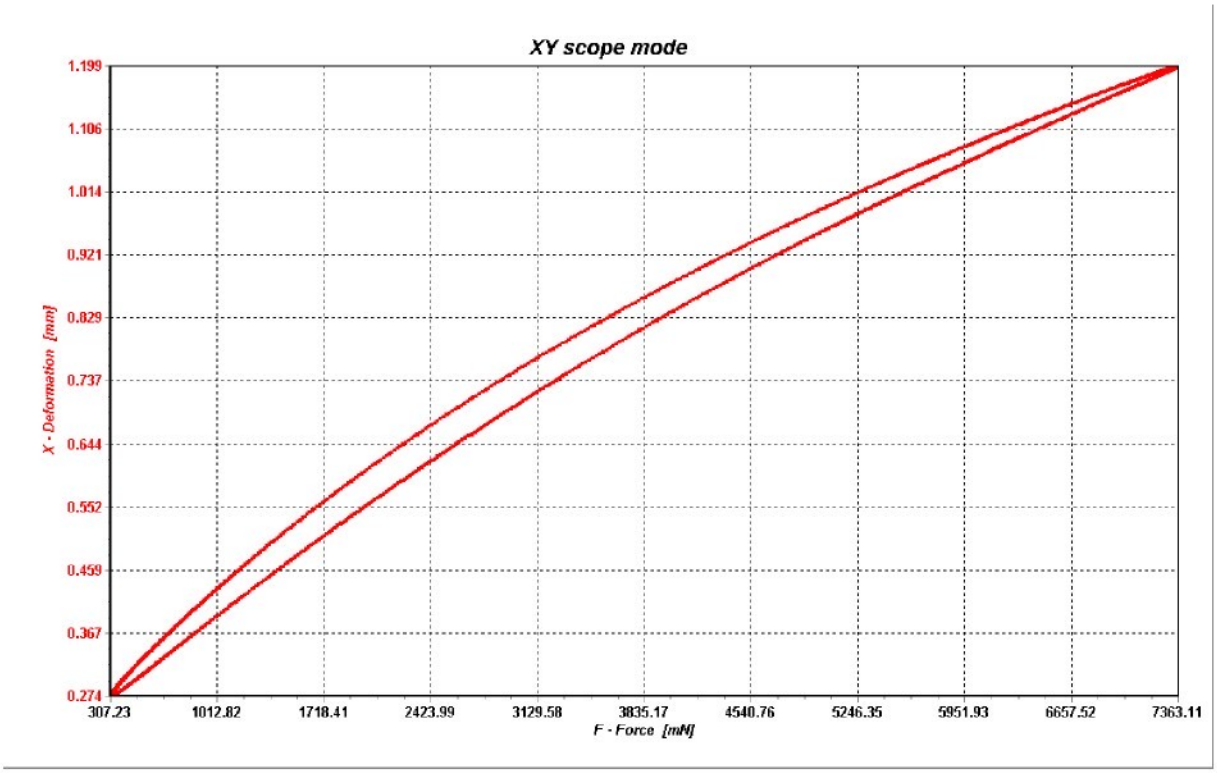
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

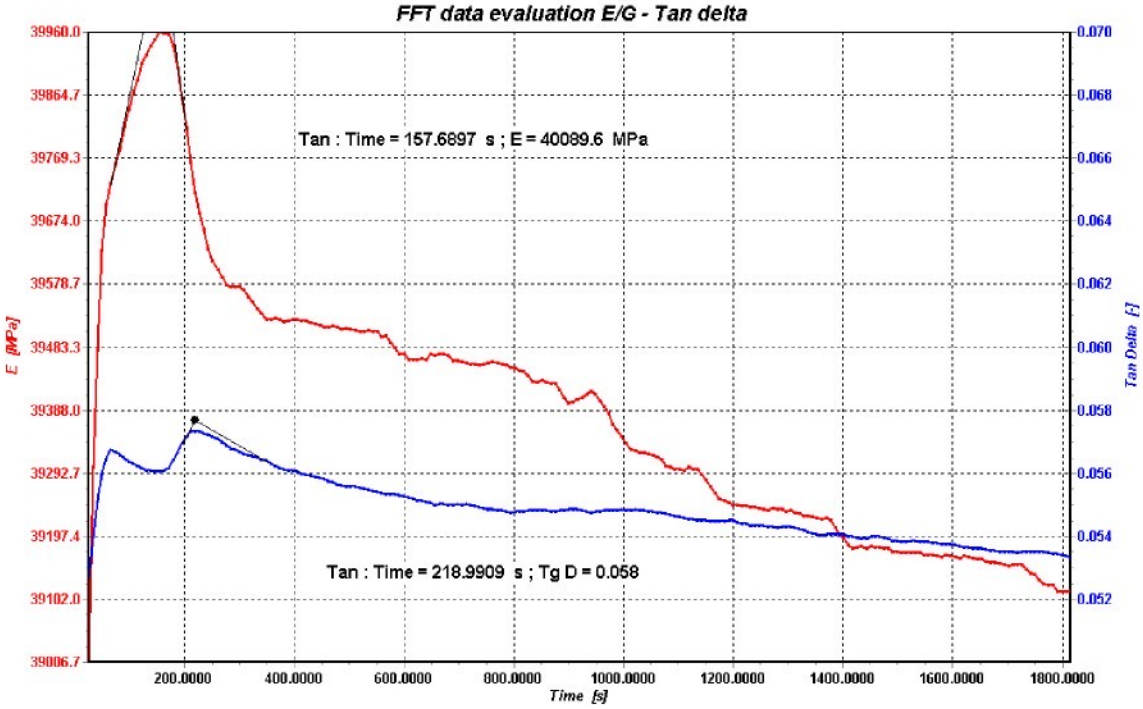
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 1.000 mm
  - Min: 0.050 mm
- Wave frequency: 5 Hz
- Force limit : 10 000 mN

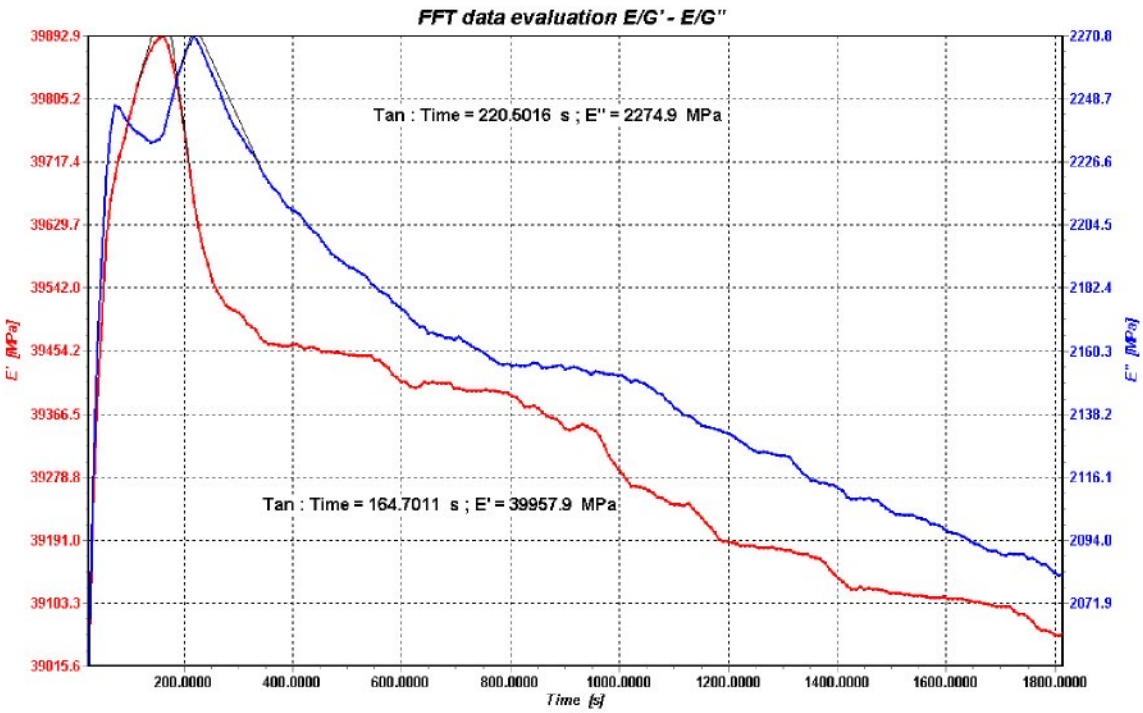
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.750 mm
  - Height: 0.500 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 5.02326E+06

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horutek10
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 7363.11 mN
Min : 307.23 mN
Dyn. : 3527.94 mN
Stat. : 3858.21 mN
X - Deformation
Max : 1.199 mm
Min : 0.274 mm
Dyn. : 0.462 mm
Stat. : 0.791 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 22.2 °C
Freqency : 5.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 24498.6 MPa 0.00 Rad
5 Hz 38963.2 MPa 0.05 Rad
10 Hz 4295.3 MPa -0.88 Rad
Freq = 5.00 Hz, Ampl = 100 %


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 157.6897 s ; E = 40089.6 MPa
Tan : Time = 218.9909 s ; Tg D = 0.058
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
39960.0
39864.7
39769.3
39674.0
39578.7
39483.3
39388.0
39292.7
39197.4
39102.0
39006.7
0.070
0.068
0.066
0.064
0.062
0.060
0.058
0.056
0.054
0.052
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 220.5016 s ; E'' = 2274.9 MPa
Tan : Time = 164.7011 s ; E' = 39957.9 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
39892.9
39805.2
39717.4
39629.7
39542.0
39454.2
39366.5
39278.8
39191.0
39103.3
39015.6
2270.8
2248.7
2226.6
2204.5
2182.4
2160.3
2138.2
2116.1
2094.0
2071.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

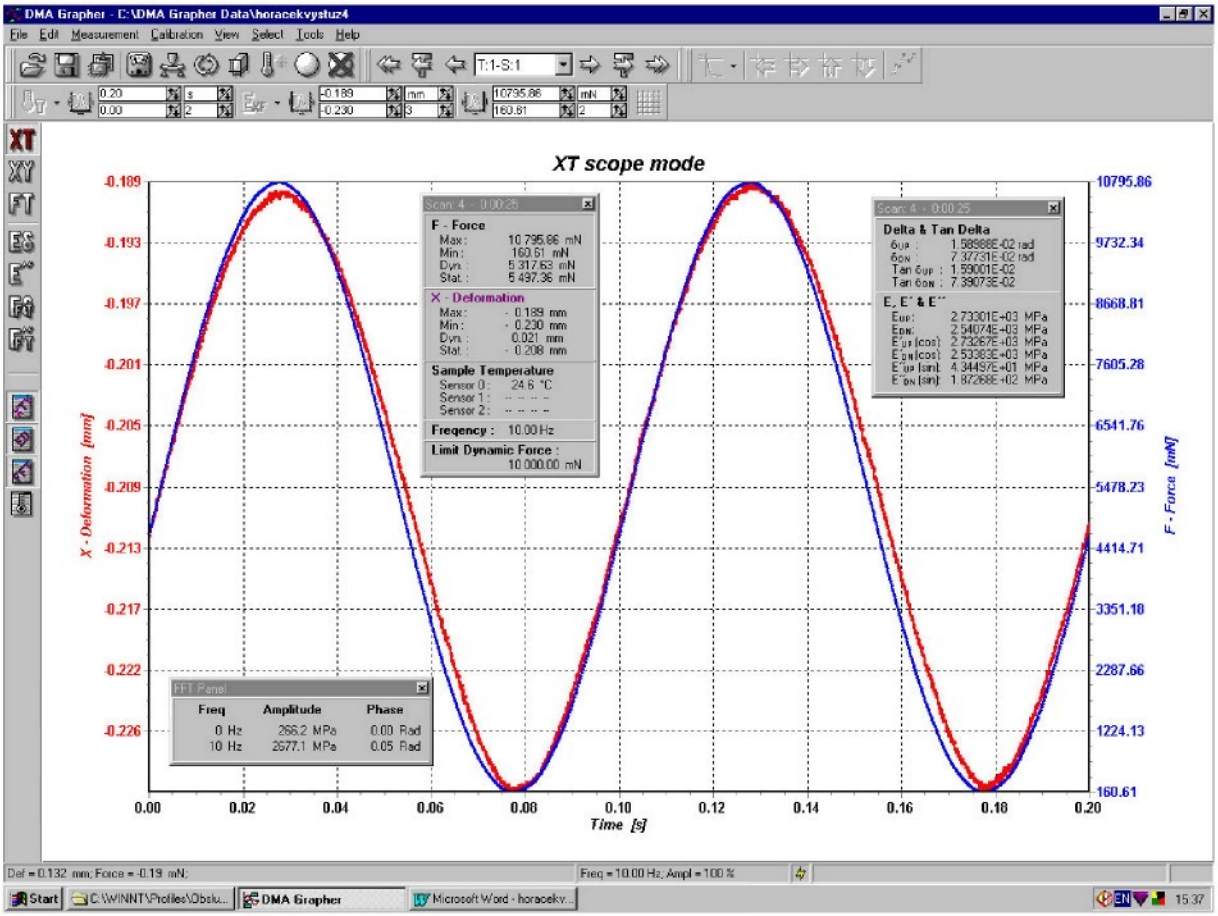
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuz4
- Measurement date: 18.11.2009 13:21:36
- Sample: horacekvystuz4
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 206.0 mN
- Operator: JH
- Comment

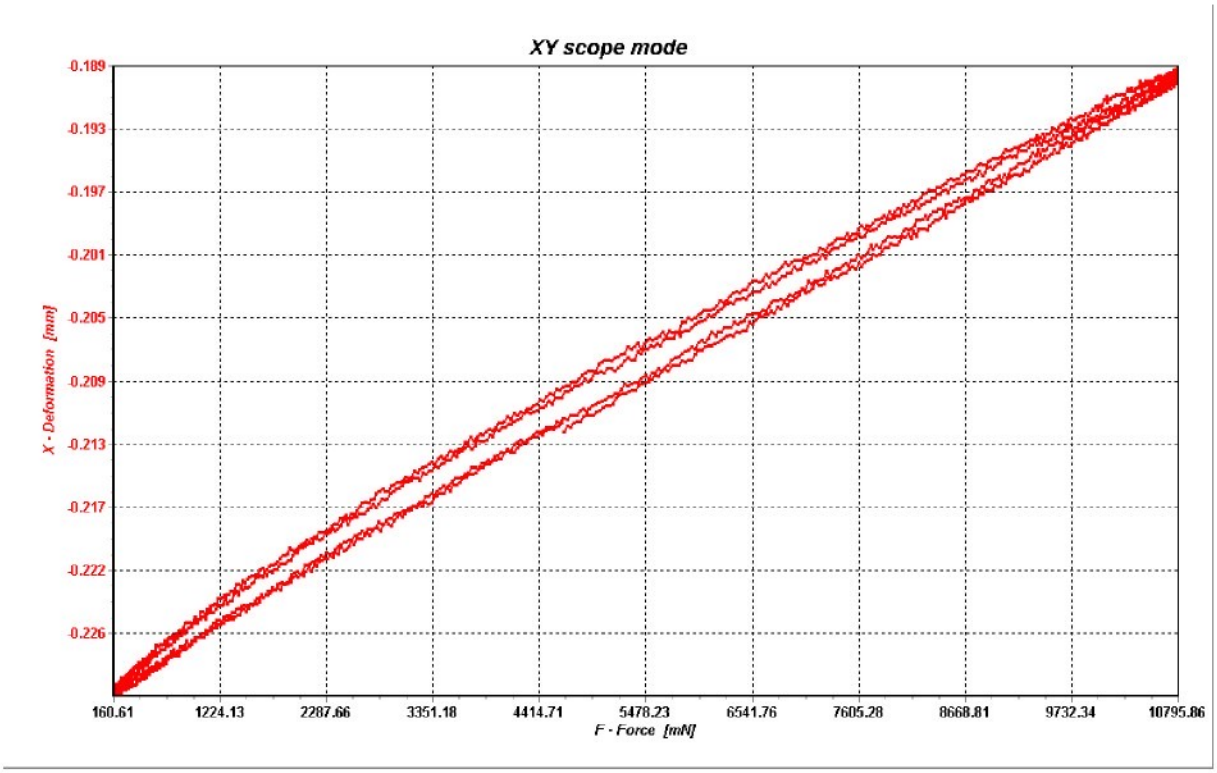
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

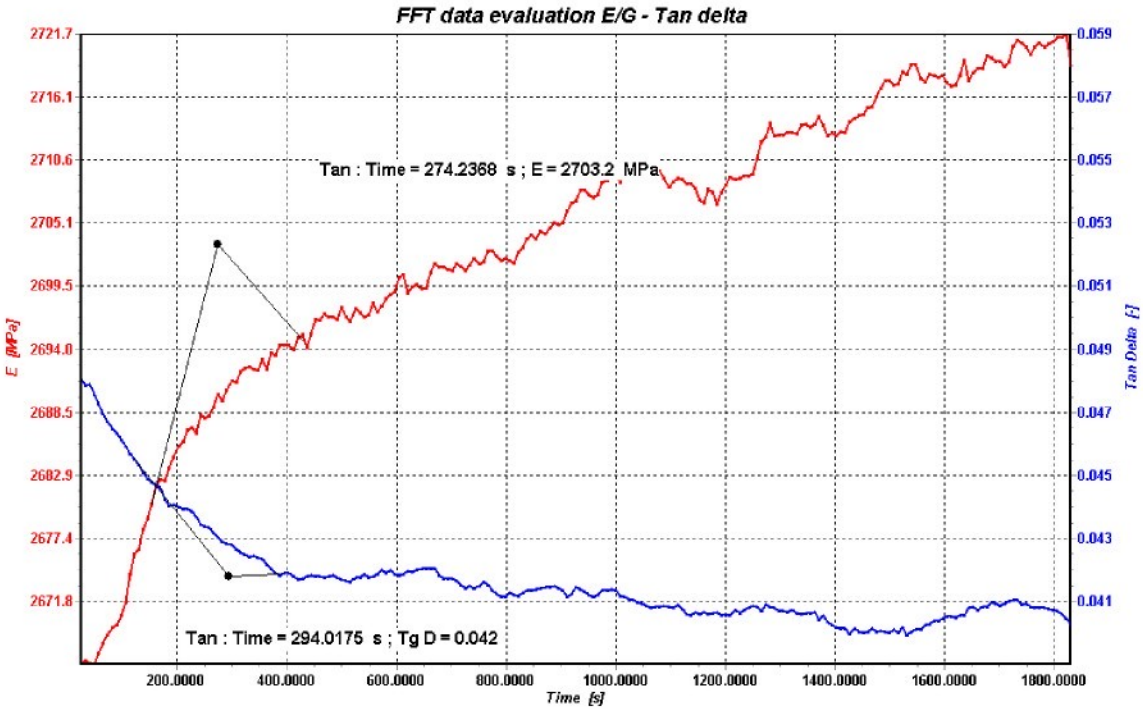
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 10 Hz
- Force limit : 10 000 mN

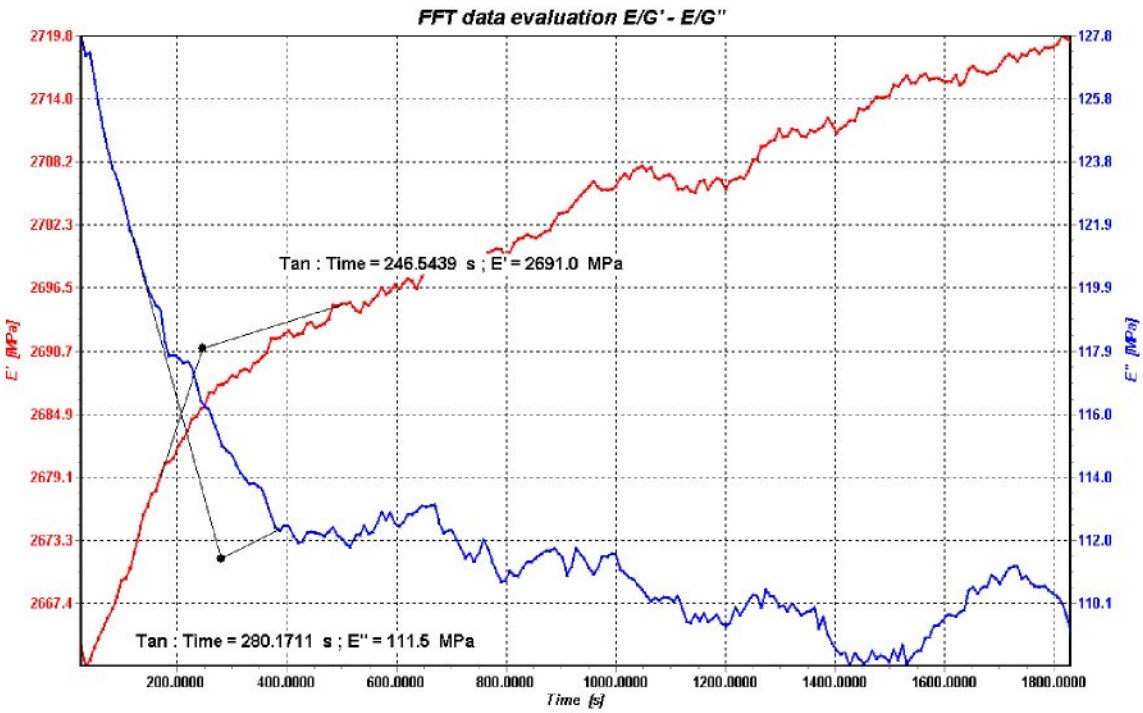
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.450 mm
  - Height: 4.000 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 1.00927E+04

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuz4
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 10.795.86 mN
Min: 160.61 mN
Dyn: 5.317.63 mN
Stat: 5.497.36 mN
X - Deformation
Max: -0.189 mm
Min: -0.230 mm
Dyn: 0.021 mm
Stat: -0.208 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 24.6 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 10.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10.000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 266.2 MPa 0.00 Rad
10 Hz 2977.1 MPa 0.05 Rad
Def = 0.132 mm; Force = -0.19 mN;
Freq = 10.00 Hz; Ampl = 100 %


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 274.2368 s ; E = 2703.2 MPa
Tan : Time = 294.0175 s ; Tg D = 0.042
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
2721.7
2716.1
2710.6
2705.1
2699.5
2694.0
2688.5
2682.9
2677.4
2671.8
0.059
0.057
0.055
0.053
0.051
0.049
0.047
0.045
0.043
0.041
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 246.5439 s ; E' = 2691.0 MPa
Tan : Time = 280.1711 s ; E'' = 111.5 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
2719.8
2714.0
2708.2
2702.3
2696.5
2690.7
2684.9
2679.1
2673.3
2667.4
127.8
125.8
123.8
121.9
119.9
117.9
116.0
114.0
112.0
110.1
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

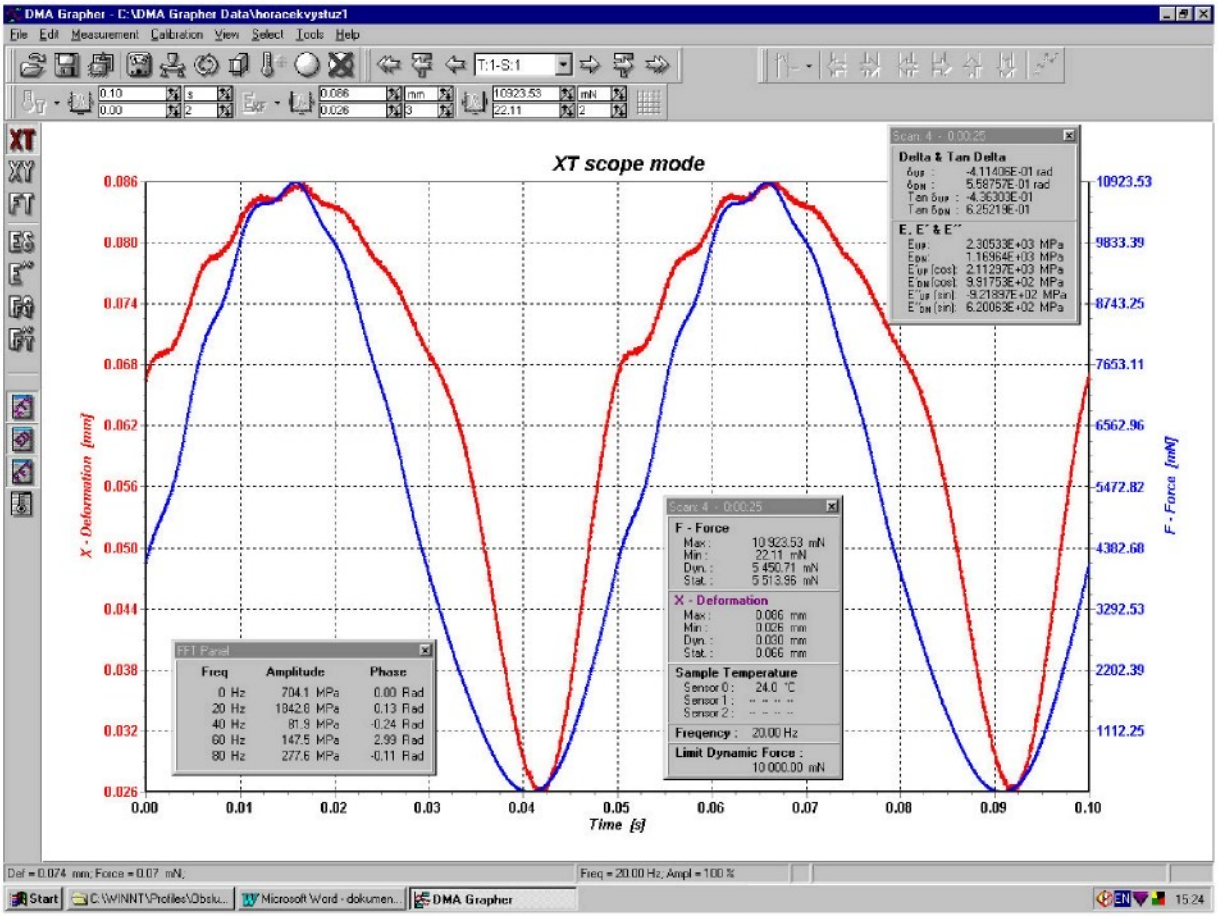
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuz1
- Measurement date: 18.11.2009 11:57:00
- Sample: horacekvystuz1
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 150.0 mN
- Operator: JH
- Comment

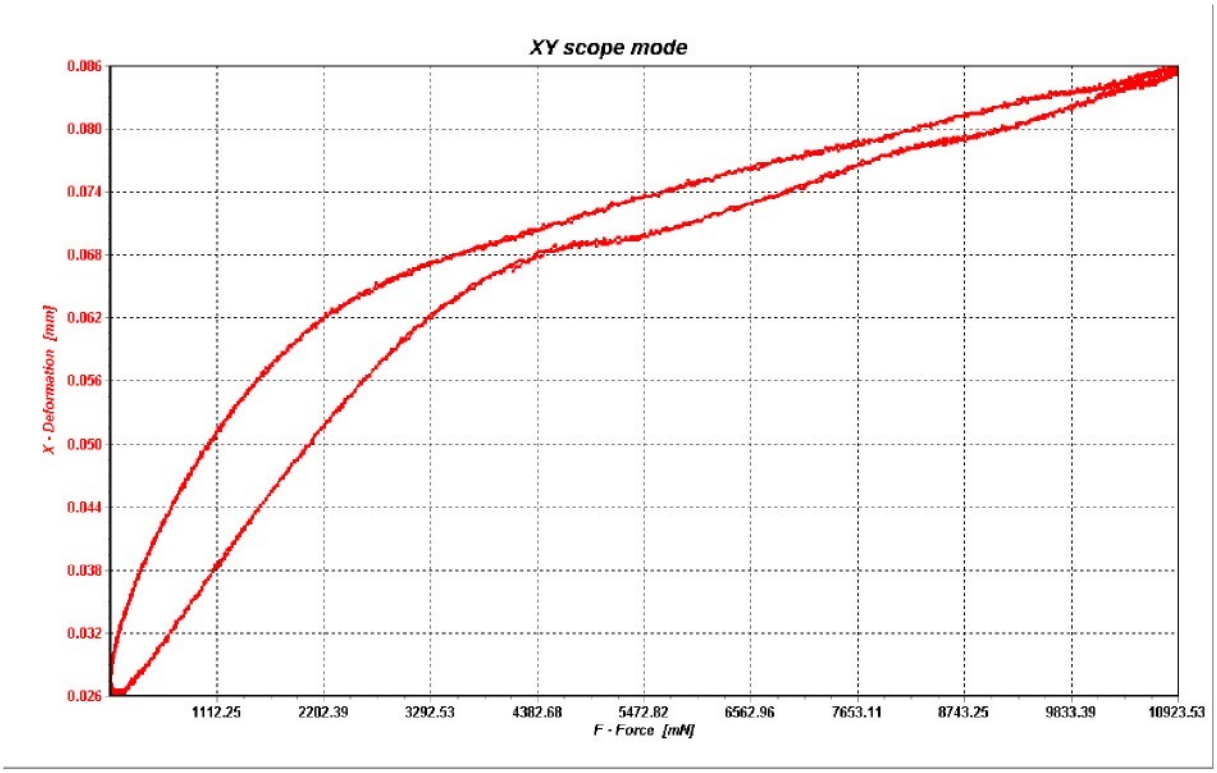
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

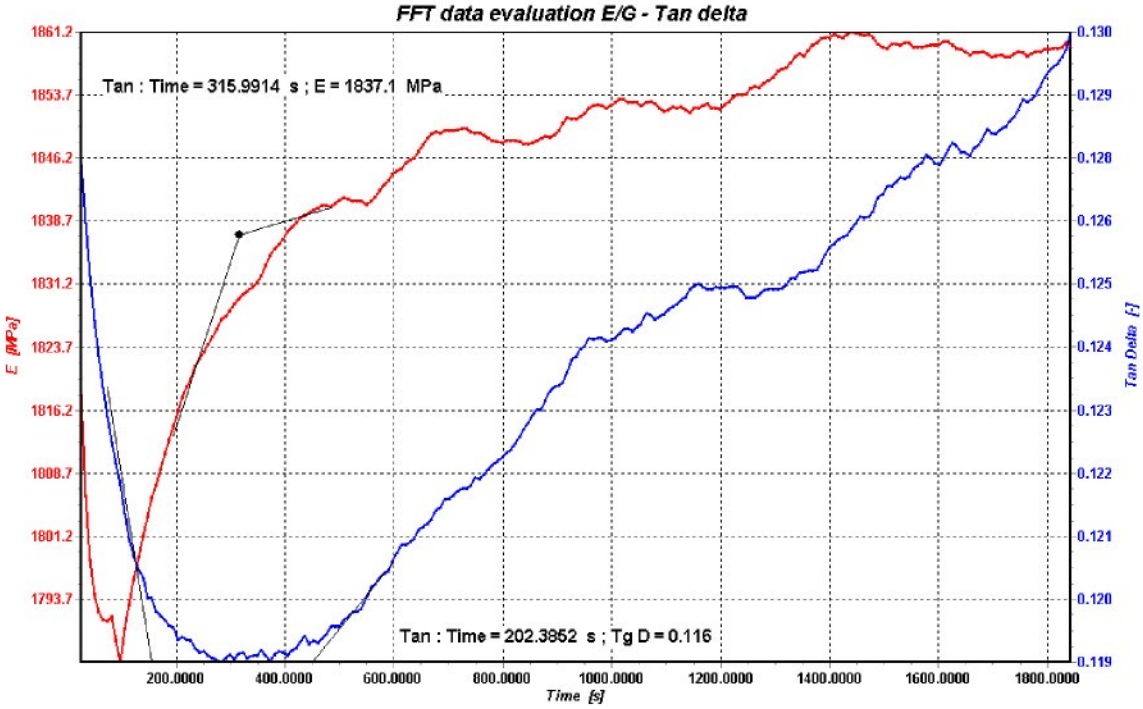
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 20 Hz
- Force limit : 10 000 mN

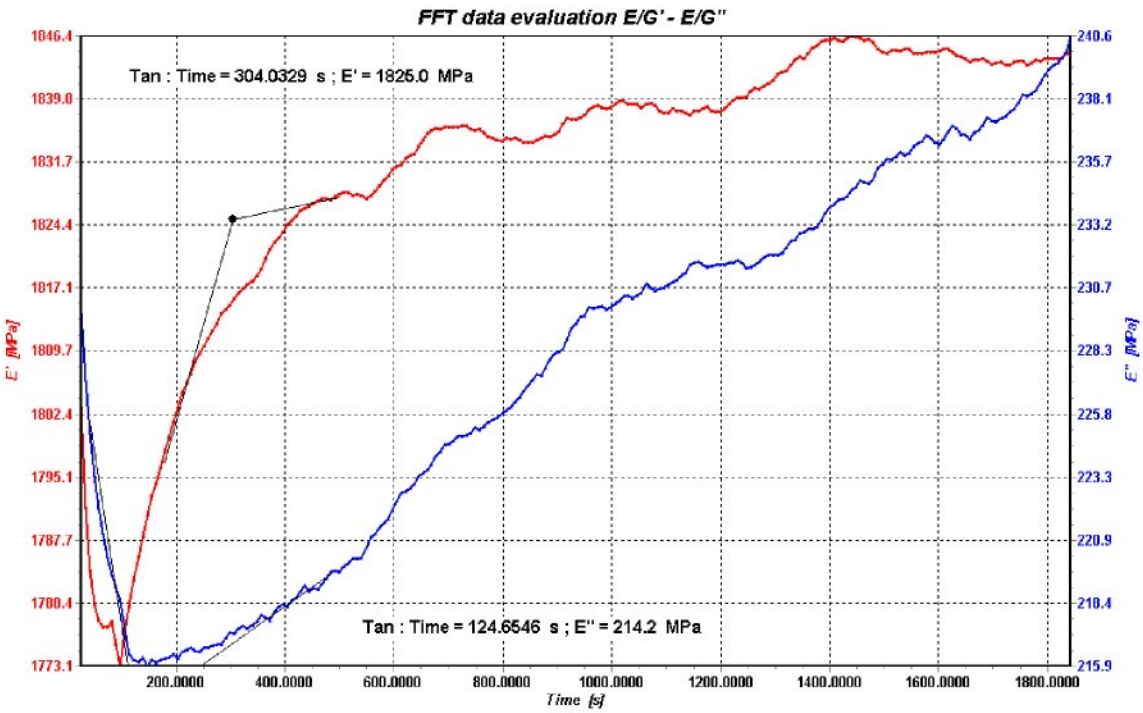
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.800 mm
  - Height: 4.200 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 8.43591E+03

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuz1
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
F - Force
X - Deformation
Sample Temperature
Freqency : 20.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 704.1 MPa 0.00 Rad
20 Hz 1842.8 MPa 0.13 Rad
40 Hz 81.9 MPa -0.24 Rad
60 Hz 147.5 MPa 2.99 Rad
80 Hz 277.6 MPa -0.11 Rad
Def = 0.074 mm; Force = 0.07 mN;
Freq = 20.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
15:24


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 315.9914 s ; E = 1837.1 MPa
Tan : Time = 202.3952 s ; Tg D = 0.116
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
1861.2
1853.7
1846.2
1838.7
1831.2
1823.7
1816.2
1808.7
1801.2
1793.7
0.130
0.129
0.128
0.126
0.125
0.124
0.123
0.122
0.121
0.120
0.119
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 304.0329 s ; E' = 1825.0 MPa
Tan : Time = 124.6546 s ; E'' = 214.2 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
1846.4
1839.0
1831.7
1824.4
1817.1
1809.7
1802.4
1795.1
1787.7
1780.4
1773.1
240.6
238.1
235.7
233.2
230.7
228.3
225.8
223.3
220.9
218.4
215.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

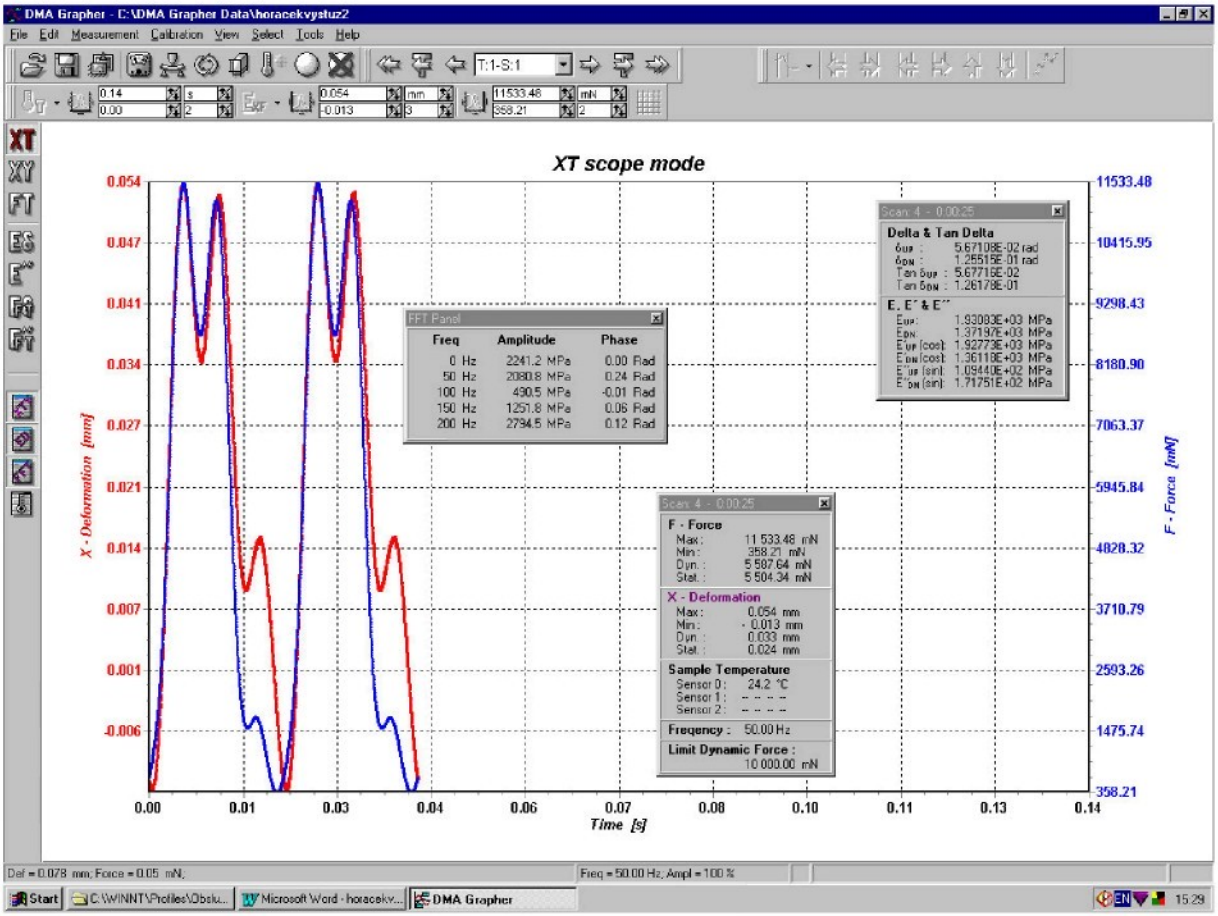
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuz2
- Measurement date: 18.11.2009 12:39:30
- Sample: horacekvystuz2
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 171.0 mN
- Operator: JH
- Comment

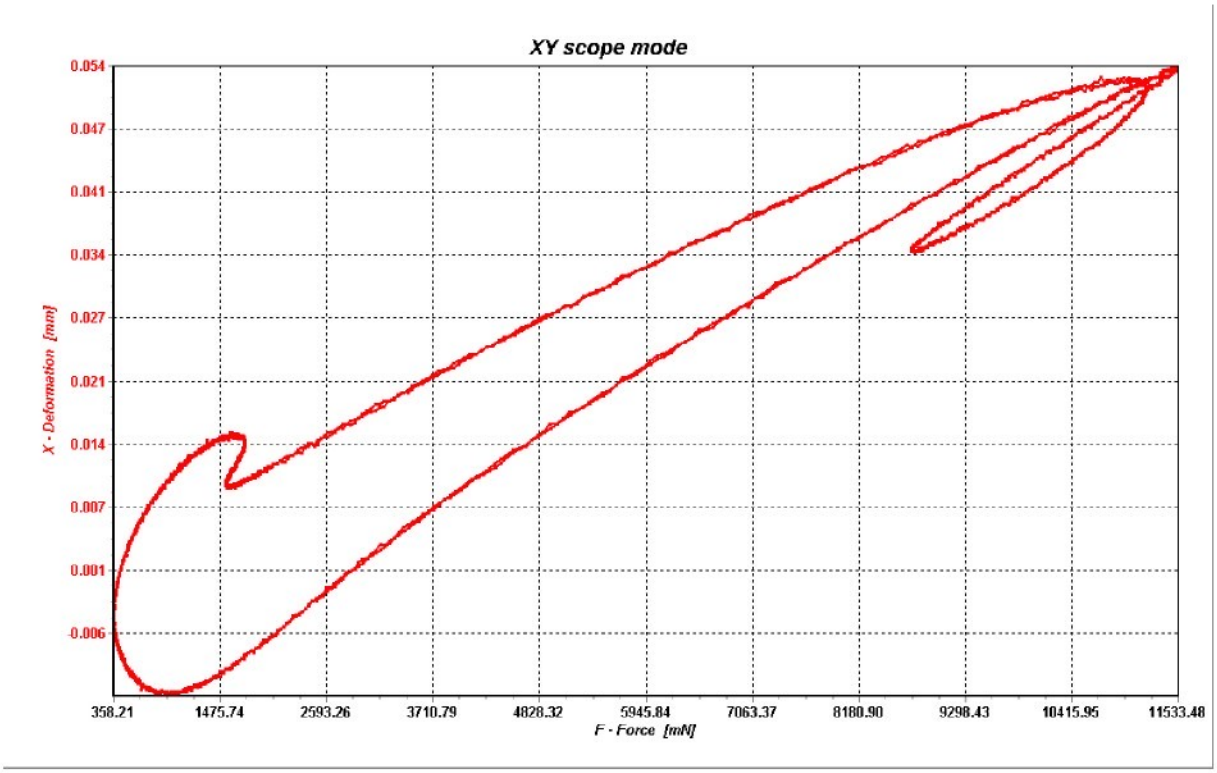
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

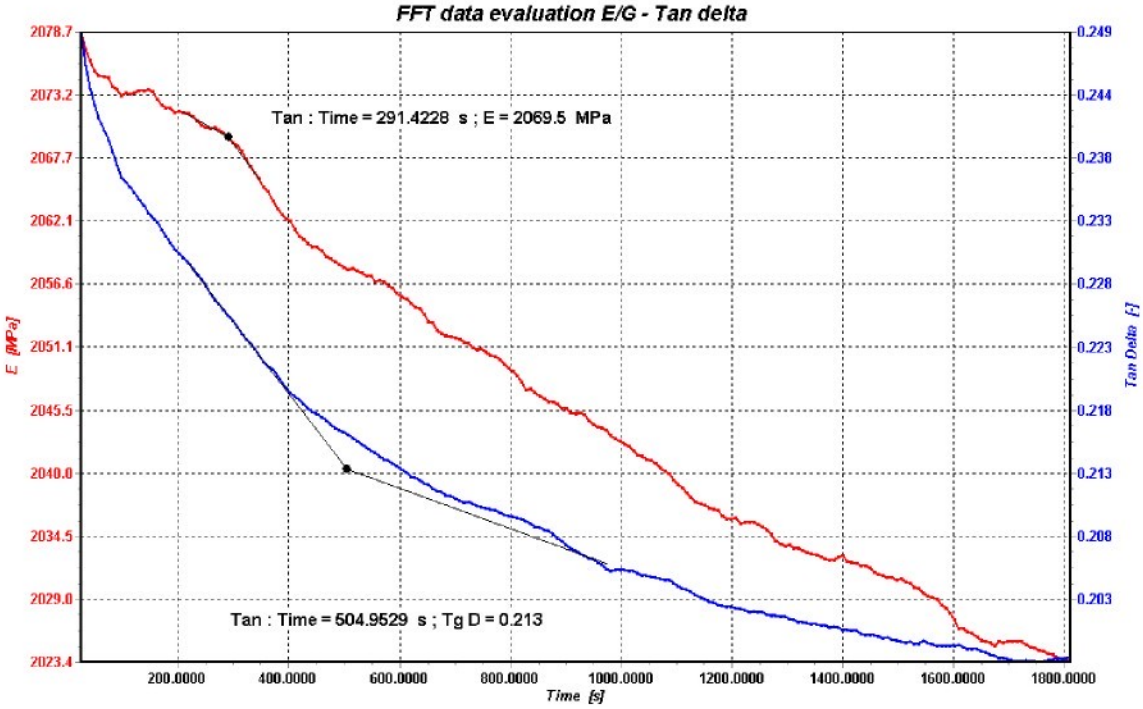
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 50 Hz
- Force limit : 10 000 mN

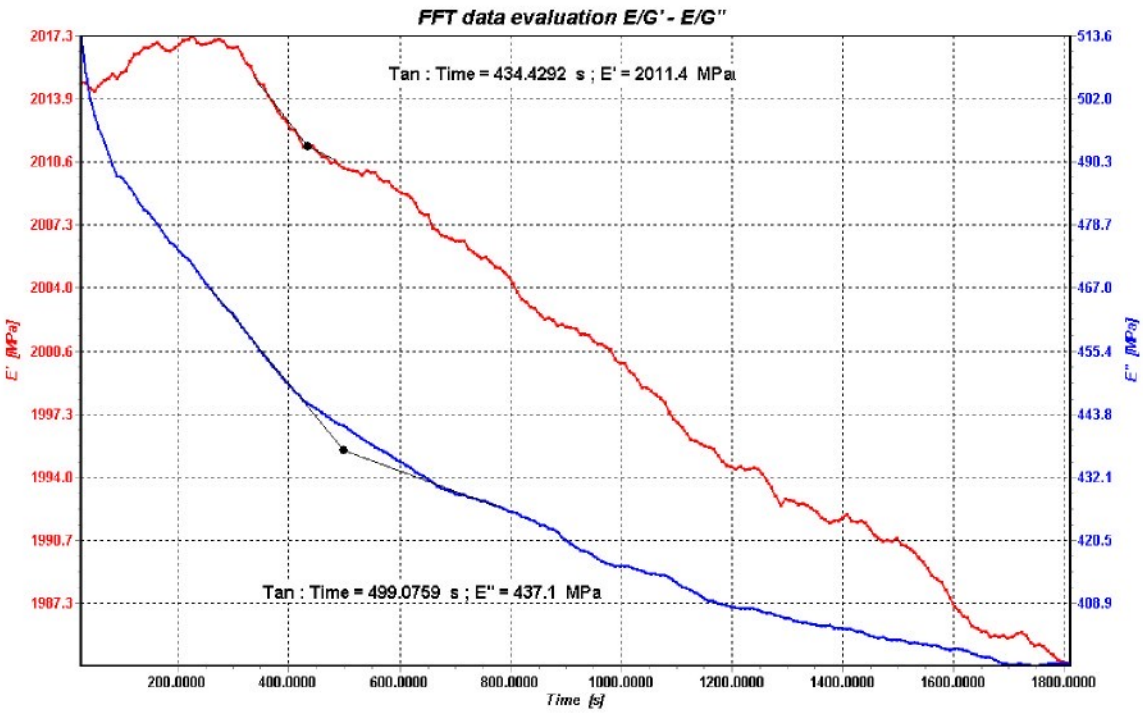
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.950 mm
  - Height: 4.000 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 9.63185E+03

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuz2
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 2241.2 MPa 0.00 Rad
50 Hz 2080.8 MPa 0.24 Rad
100 Hz 490.5 MPa -0.01 Rad
150 Hz 1251.8 MPa 0.06 Rad
200 Hz 2794.5 MPa 0.12 Rad
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
F - Force
Max: 11 533.48 mN
Min: 358.21 mN
Dyn.: 5 587.64 mN
Stat.: 5 504.34 mN
X - Deformation
Max: 0.054 mm
Min: -0.013 mm
Dyn.: 0.033 mm
Stat.: 0.024 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 24.2 °C
Frequency: 50.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Def = 0.078 mm; Force = 0.05 mN;
Freq = 50.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
15:29


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 291.4228 s ; E = 2069.5 MPa
Tan : Time = 504.9529 s ; Tg D = 0.213
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
2078.7
2073.2
2067.7
2062.1
2056.6
2051.1
2045.5
2040.0
2034.5
2029.0
2023.4
0.249
0.244
0.238
0.233
0.228
0.223
0.218
0.213
0.208
0.203
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 434.4292 s ; E' = 2011.4 MPa
Tan : Time = 499.0759 s ; E'' = 437.1 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
2017.3
2013.9
2010.6
2007.3
2004.0
2000.6
1997.3
1994.0
1990.7
1987.3
513.6
502.0
490.3
478.7
467.0
455.4
443.8
432.1
420.5
408.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

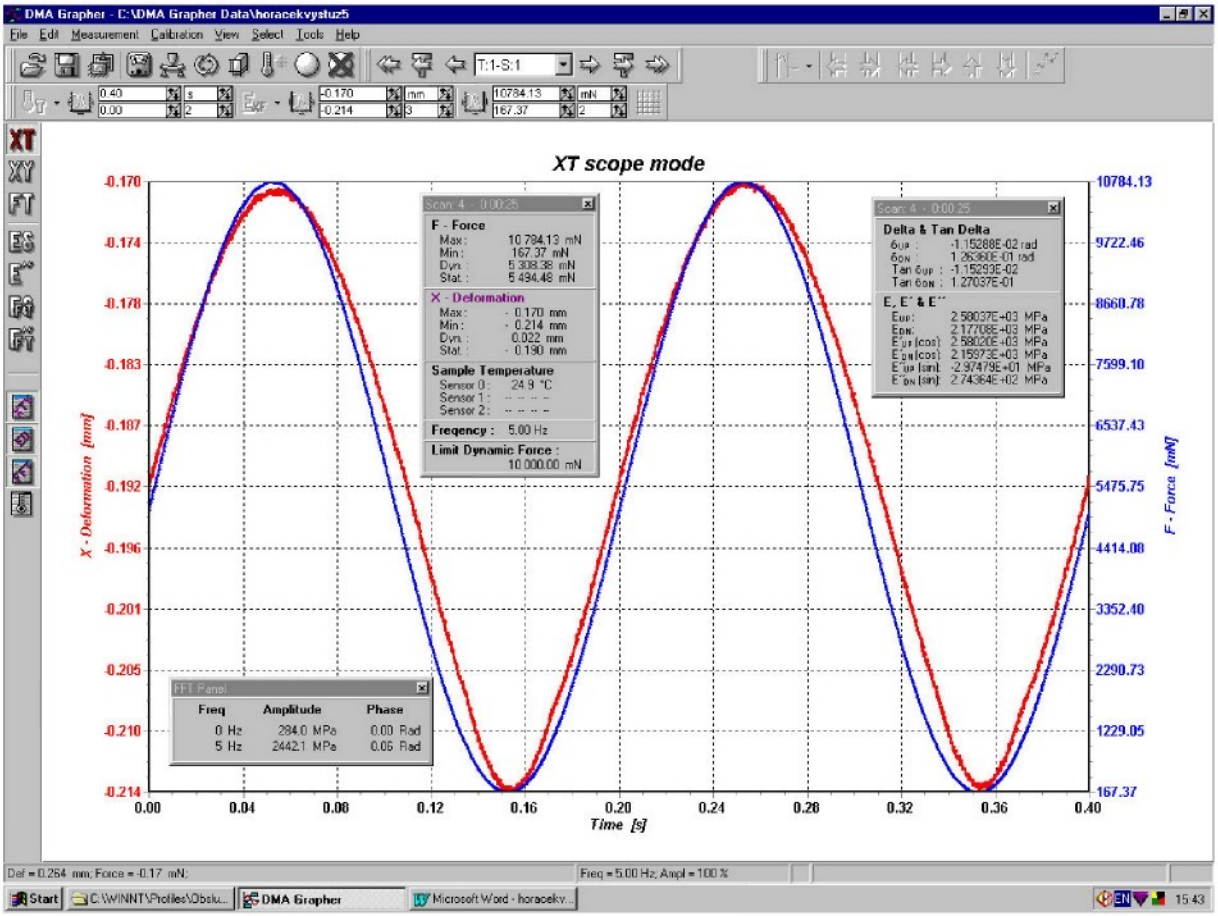
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuz5
- Measurement date: 18.11.2009 13:57:58
- Sample: horacekvystuz5
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 206.0 mN
- Operator: JH
- Comment

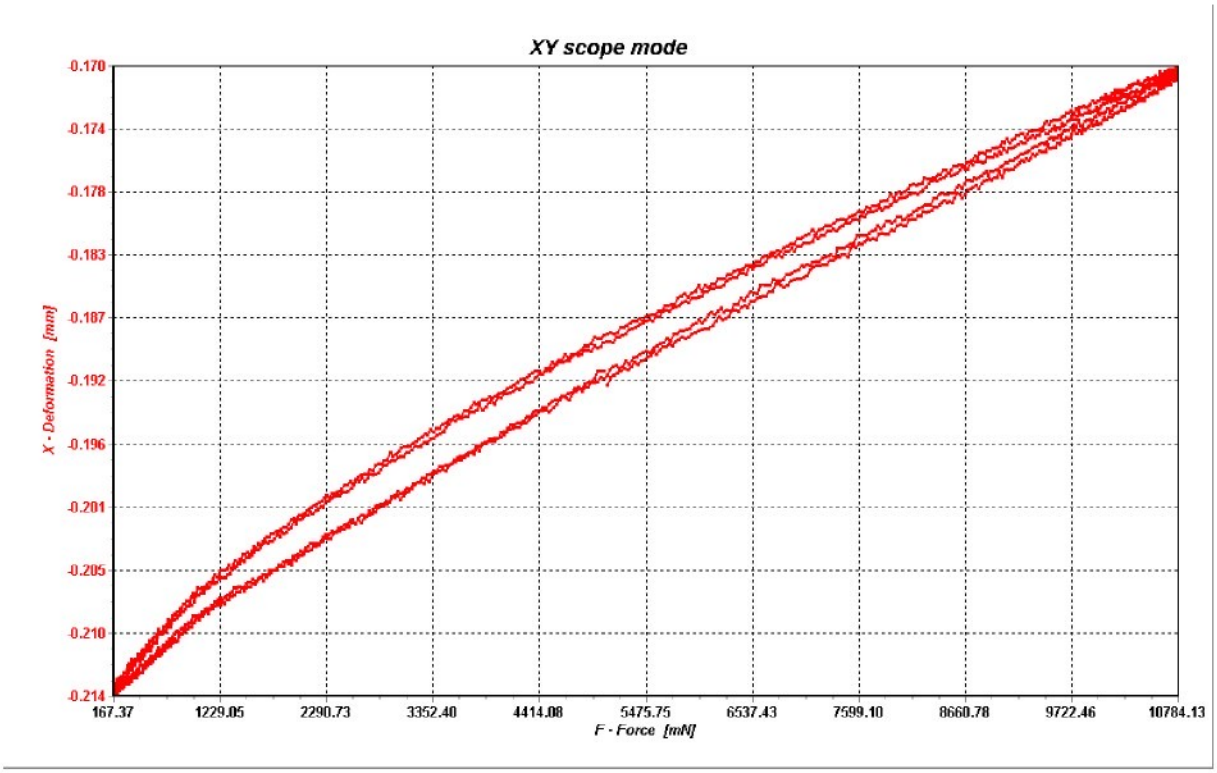
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

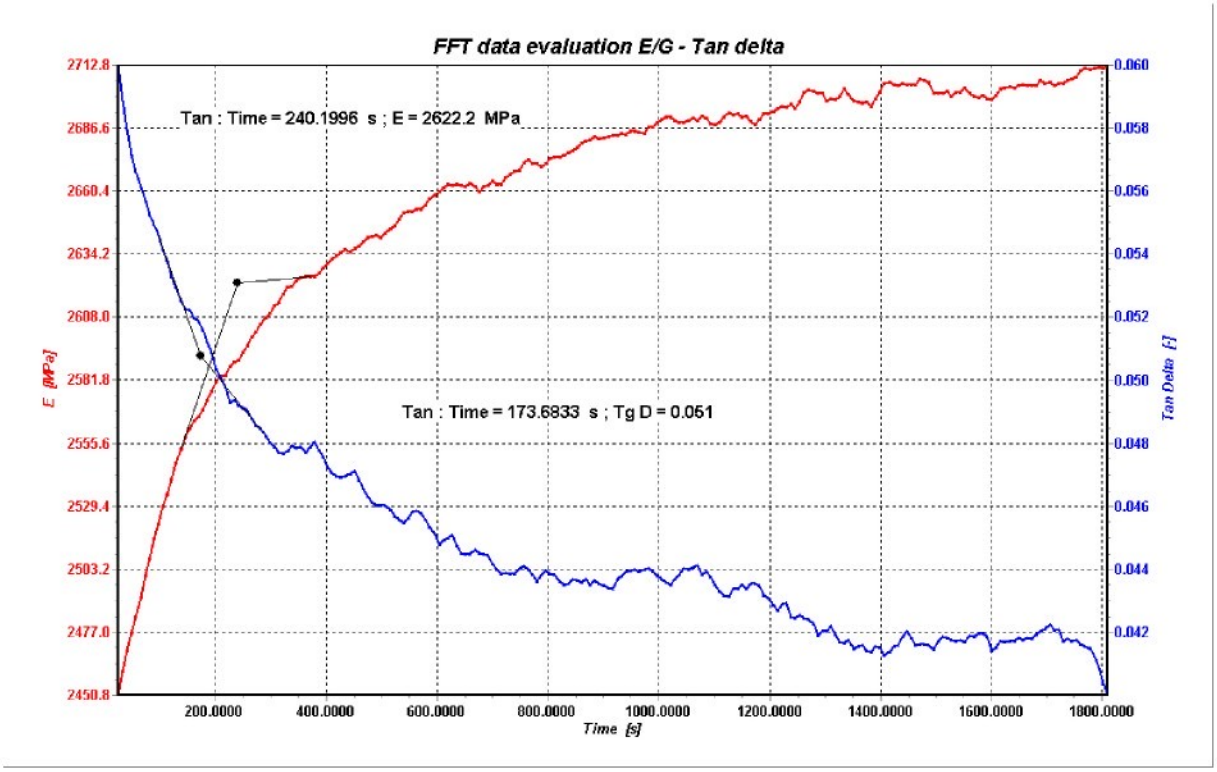
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 5 Hz
- Force limit : 10 000 mN

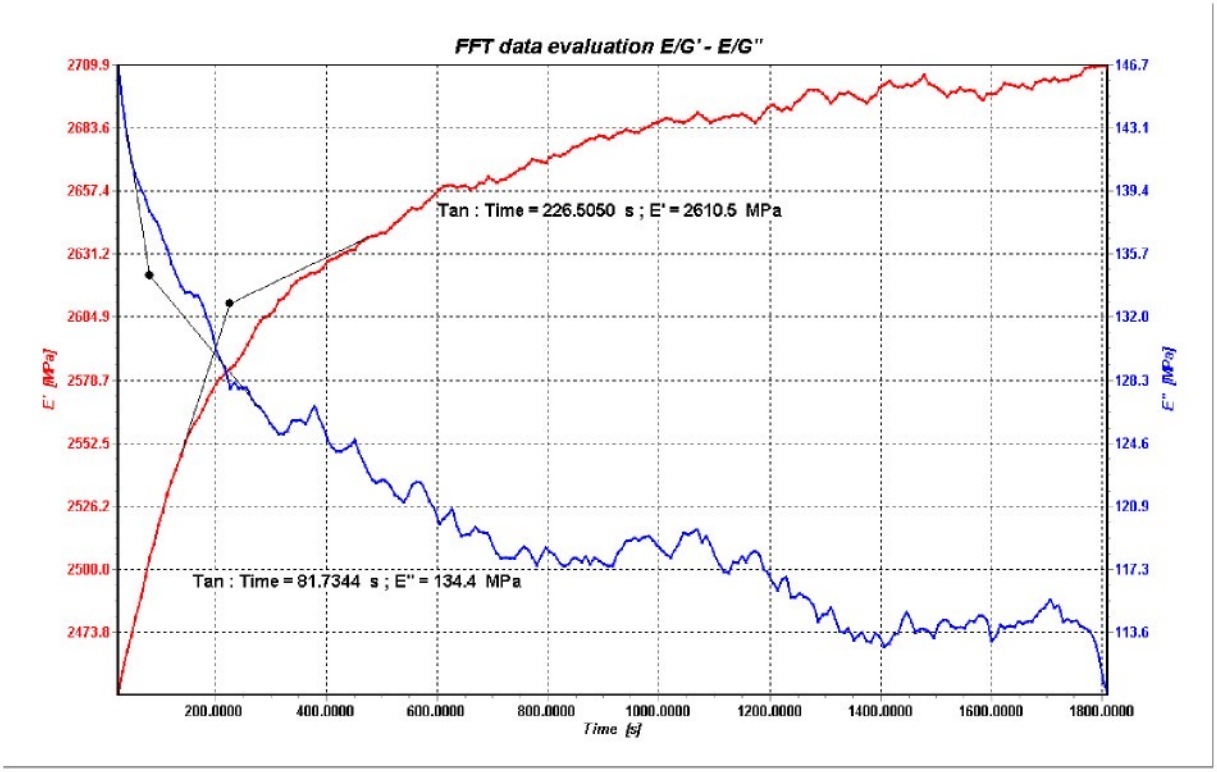
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.750 mm
  - Height: 4.000 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 9.81105E+03

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuz5
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 10.784.13 mN
Min: 167.37 mN
Dyn: 5.308.38 mN
Stat: 5.494.48 mN
X - Deformation
Max: -0.170 mm
Min: -0.214 mm
Dyn: 0.022 mm
Stat: -0.190 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 24.9 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 5.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10.000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup: -1.15288E-02 rad
δon: 1.26360E-01 rad
Tan δup: -1.15293E-02
Tan δon: 1.27037E-01
E, E' & E''
Eup: 2.58037E+03 MPa
Eon: 2.17708E+03 MPa
E'up (cos): 2.58020E+03 MPa
E'on (cos): 2.15973E+03 MPa
E''up (sin): -2.97479E+01 MPa
E''on (sin): 2.74364E+02 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 284.0 MPa 0.00 Rad
5 Hz 2442.1 MPa 0.05 Rad
Def = 0.264 mm; Force = -0.17 mN;
Freq = 5.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horacekv...
15:43


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 240.1996 s ; E = 2622.2 MPa
Tan : Time = 173.6833 s ; Tg D = 0.051
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
2712.8
2686.6
2660.4
2634.2
2608.0
2581.8
2555.6
2529.4
2503.2
2477.0
2450.8
0.060
0.058
0.056
0.054
0.052
0.050
0.048
0.046
0.044
0.042
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 226.5050 s ; E' = 2610.5 MPa
Tan : Time = 81.7344 s ; E'' = 134.4 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
2709.9
2683.6
2657.4
2631.2
2604.9
2578.7
2552.5
2526.2
2500.0
2473.8
146.7
143.1
139.4
135.7
132.0
128.3
124.6
120.9
117.3
113.6
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

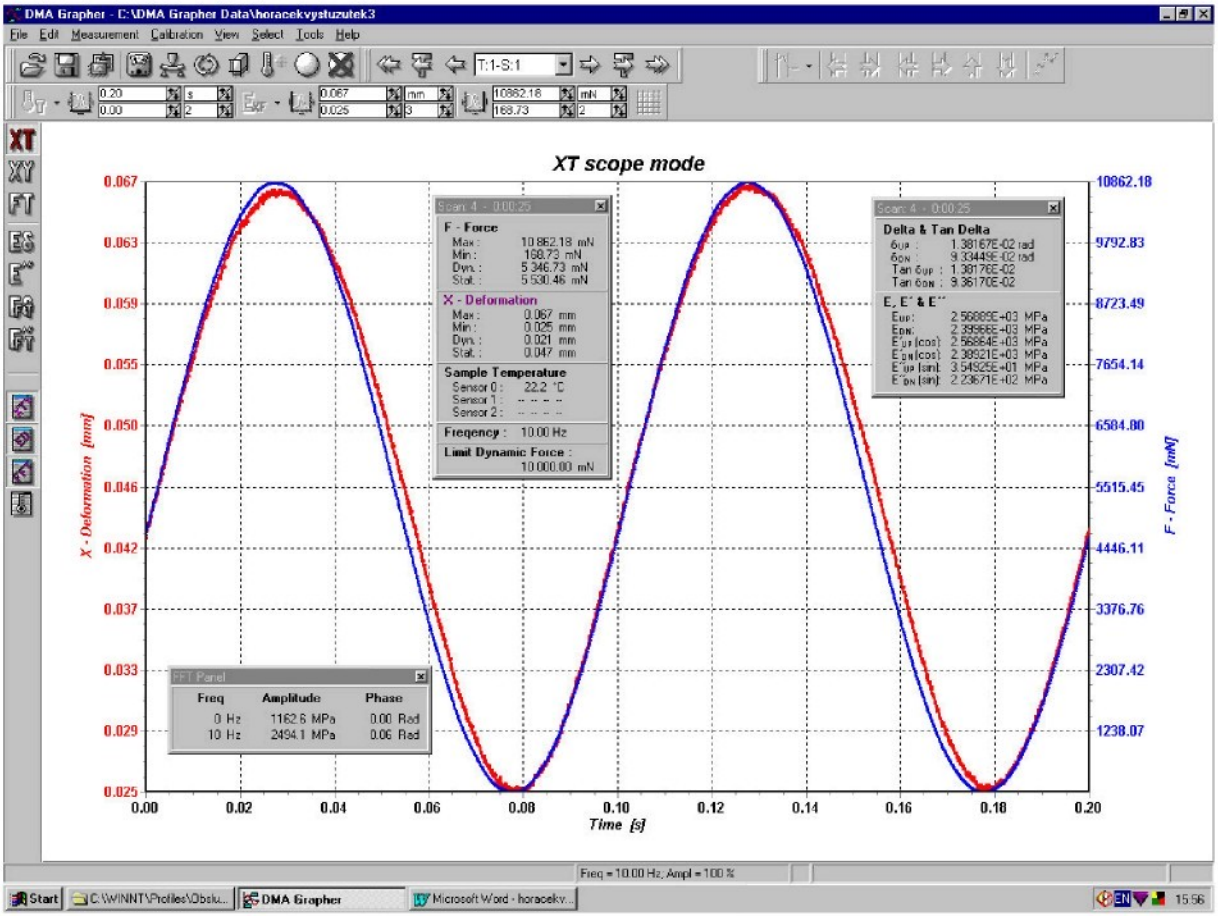
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuzutek3
- Measurement date: 24.11.2009 09:59:16
- Sample: horacekvystuzutek3
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 207.0 mN
- Operator: JH
- Comment

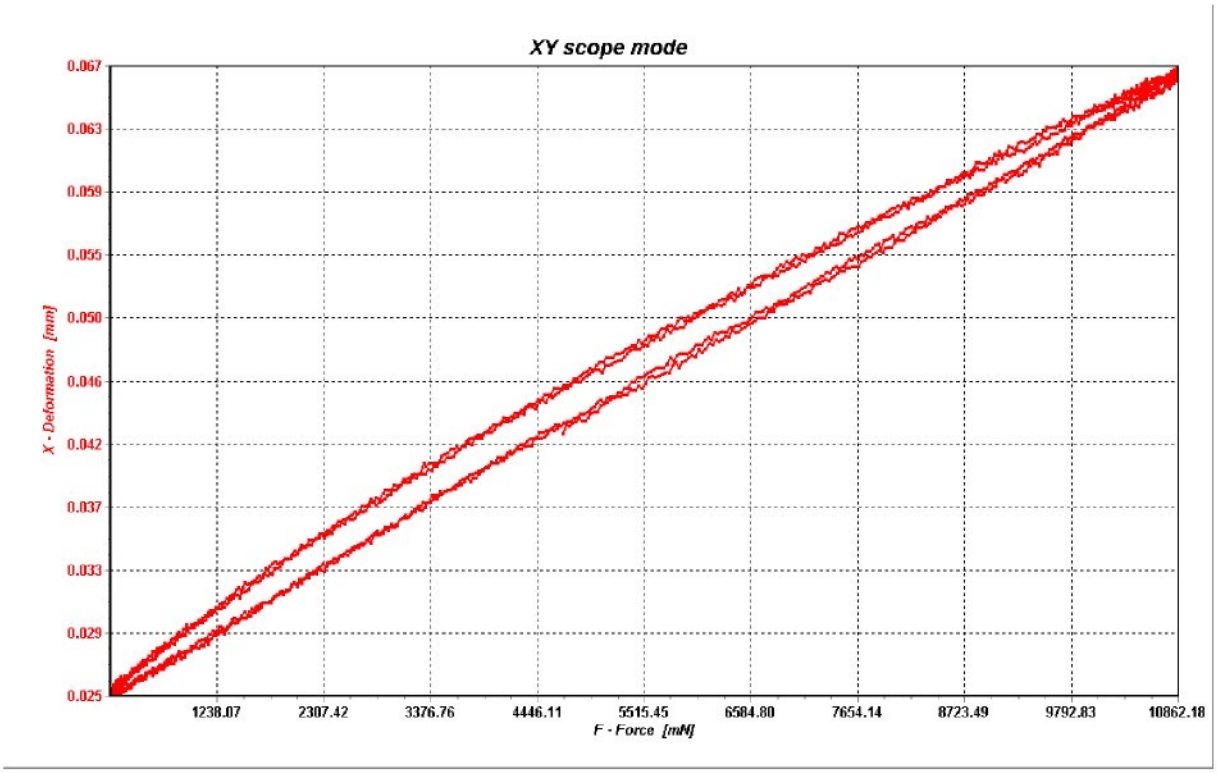
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

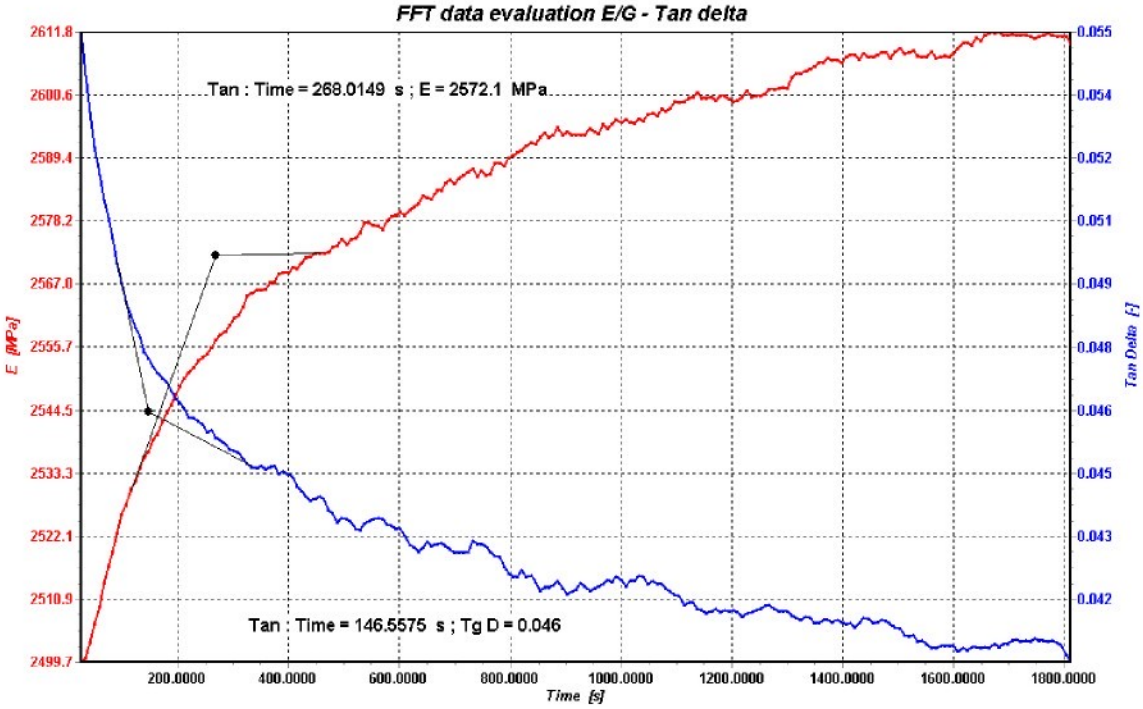
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 10 Hz
- Force limit : 10 000 mN

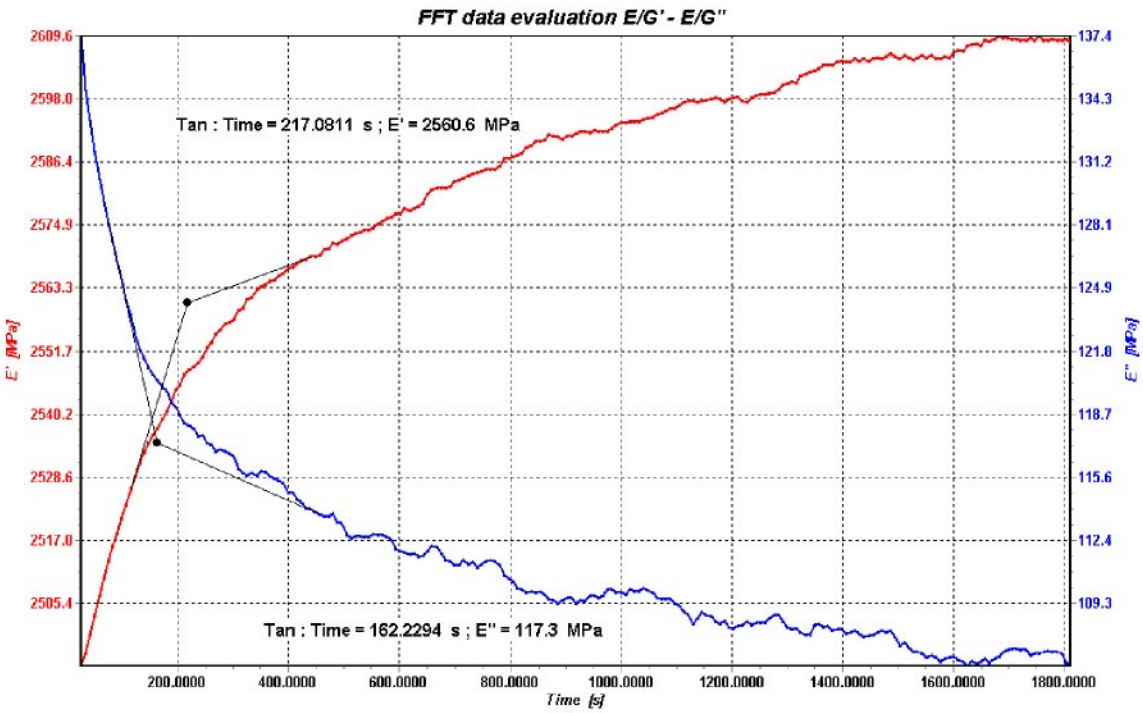
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.750 mm
  - Height: 4.000 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 9.81105E+03

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuzutek3
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 10 862.18 mN
Min : 168.73 mN
Dyn. : 5 346.73 mN
Stat. : 5 530.46 mN
X - Deformation
Max : 0.067 mm
Min : 0.025 mm
Dyn. : 0.021 mm
Stat. : 0.047 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 22.2 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 10.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup : 1.38167E-02 rad
δon : 9.33449E-02 rad
Tan δup : 1.38176E-02
Tan δon : 9.36170E-02
E, E' & E''
Eup: 2.56889E+03 MPa
Eon: 2.39966E+03 MPa
E'up (cos): 2.56864E+03 MPa
E'on (cos): 2.38921E+03 MPa
E''up (sin): 3.54925E+01 MPa
E''on (sin): 2.23671E+02 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 1162.6 MPa 0.00 Rad
10 Hz 2494.1 MPa 0.06 Rad
Freq = 10.00 Hz, Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horacekv...
15:56


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 268.0149 s ; E = 2572.1 MPa
Tan : Time = 146.5575 s ; Tg D = 0.046
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
2611.8
2600.6
2589.4
2578.2
2567.0
2555.7
2544.5
2533.3
2522.1
2510.9
2499.7
0.055
0.054
0.052
0.051
0.049
0.048
0.046
0.045
0.043
0.042
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 217.0811 s ; E' = 2560.6 MPa
Tan : Time = 162.2294 s ; E'' = 117.3 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
2609.6
2598.0
2586.4
2574.9
2563.3
2551.7
2540.2
2528.6
2517.0
2505.4
137.4
134.3
131.2
128.1
124.9
121.8
118.7
115.6
112.4
109.3
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

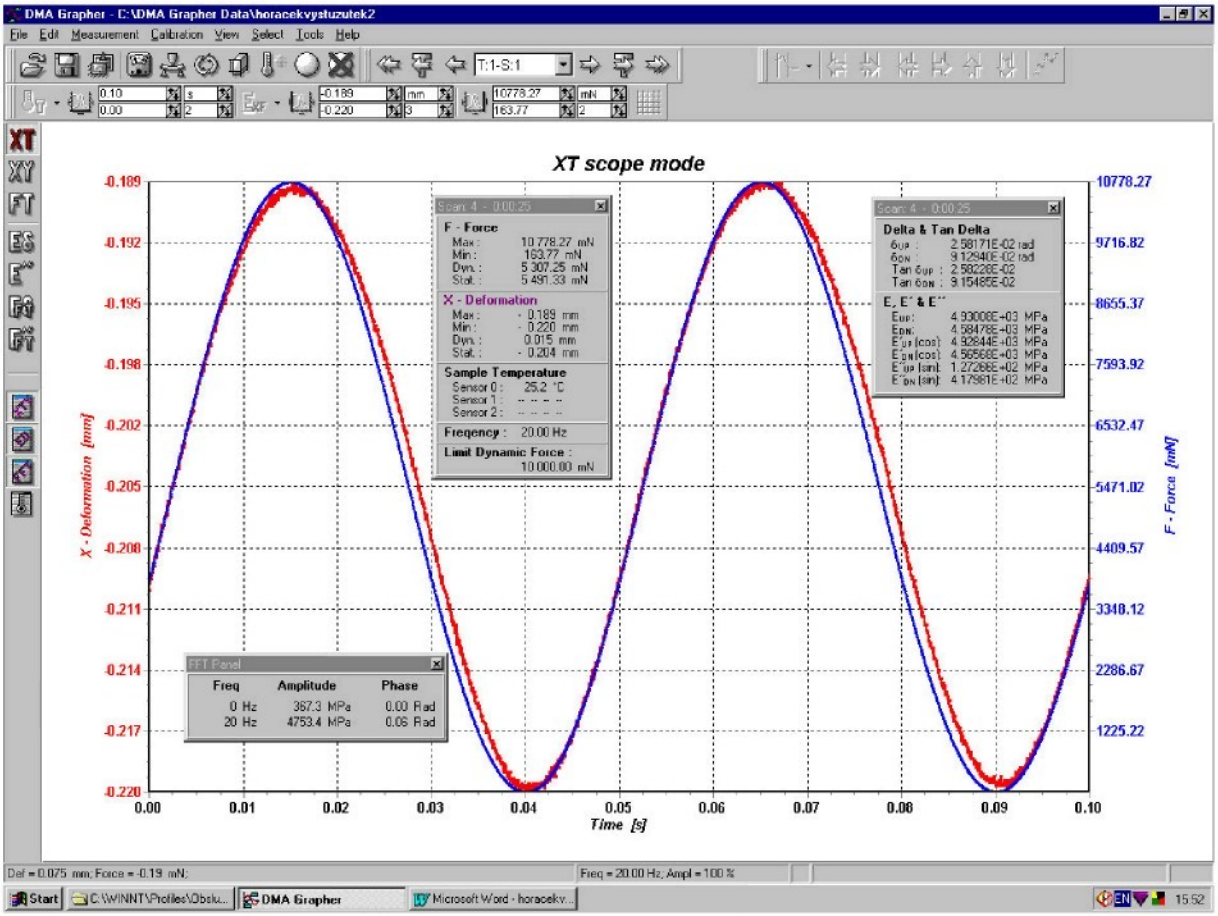
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuzutek2
- Measurement date: 18.11.2009 15:12:08
- Sample: horacekvystuzutek2
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 206.0 mN
- Operator: JH
- Comment

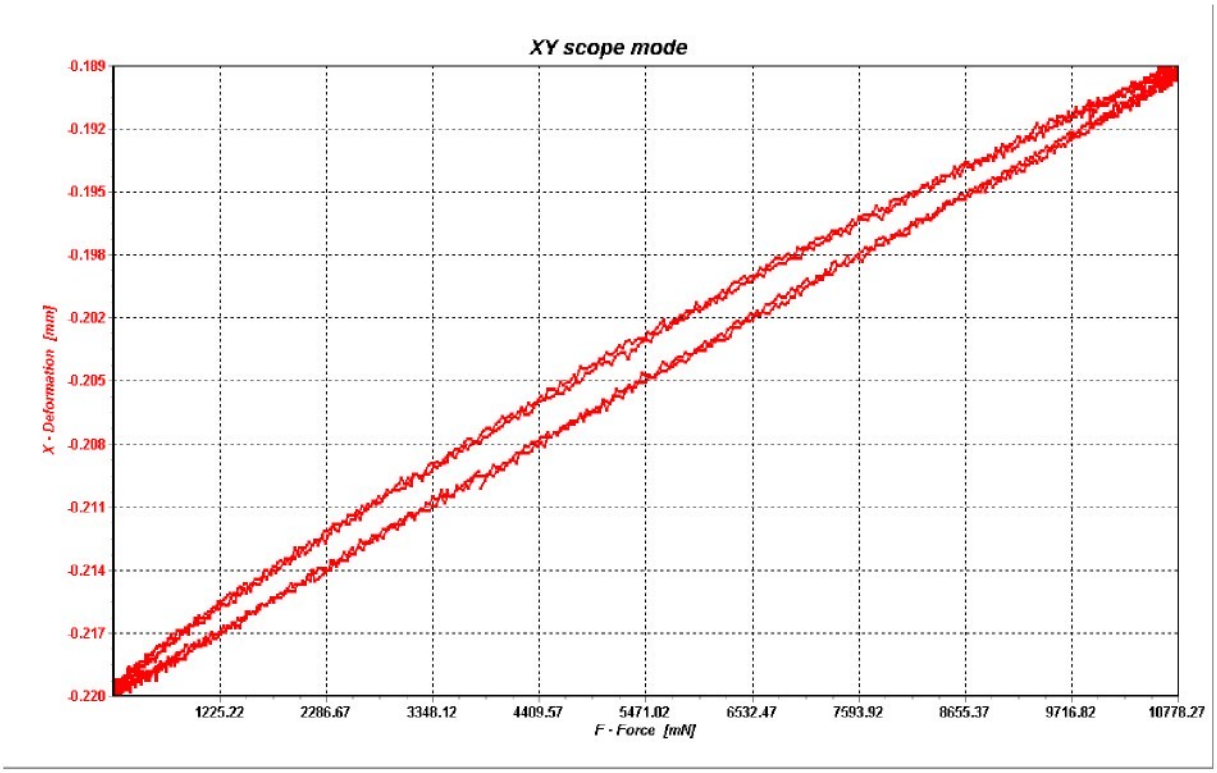
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

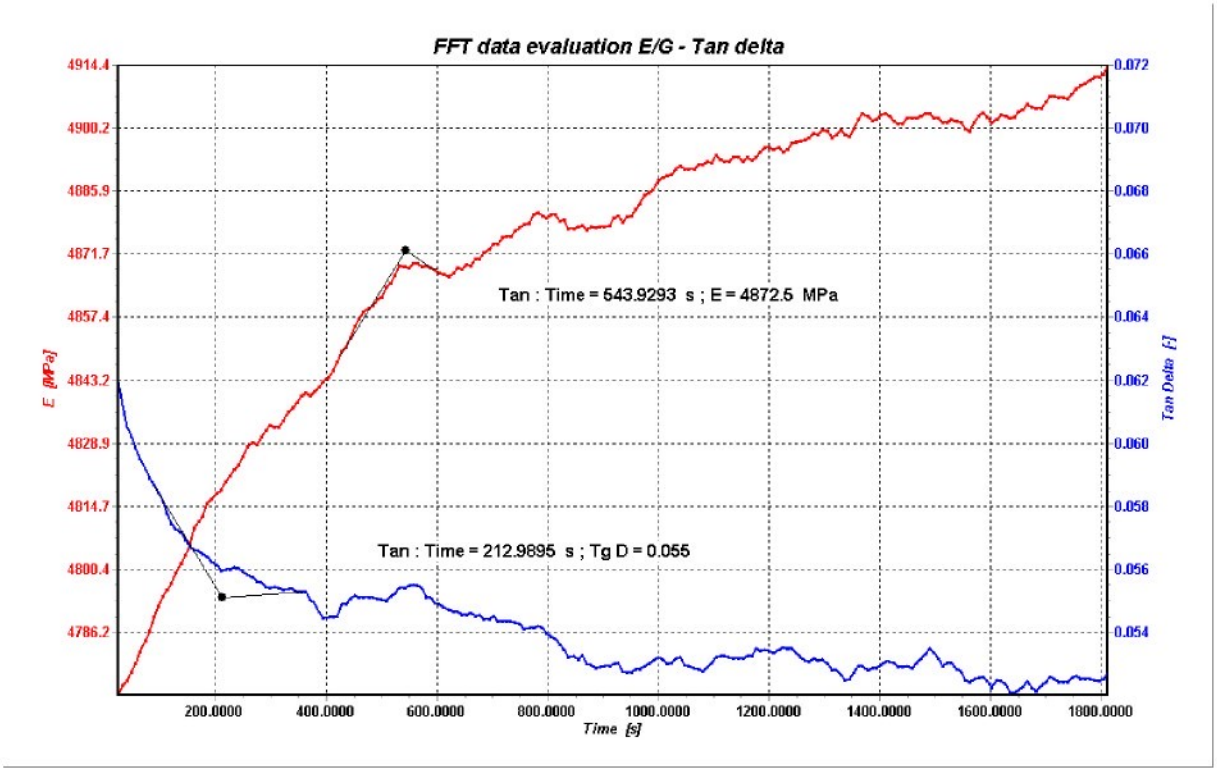
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 20 Hz
- Force limit : 10 000 mN

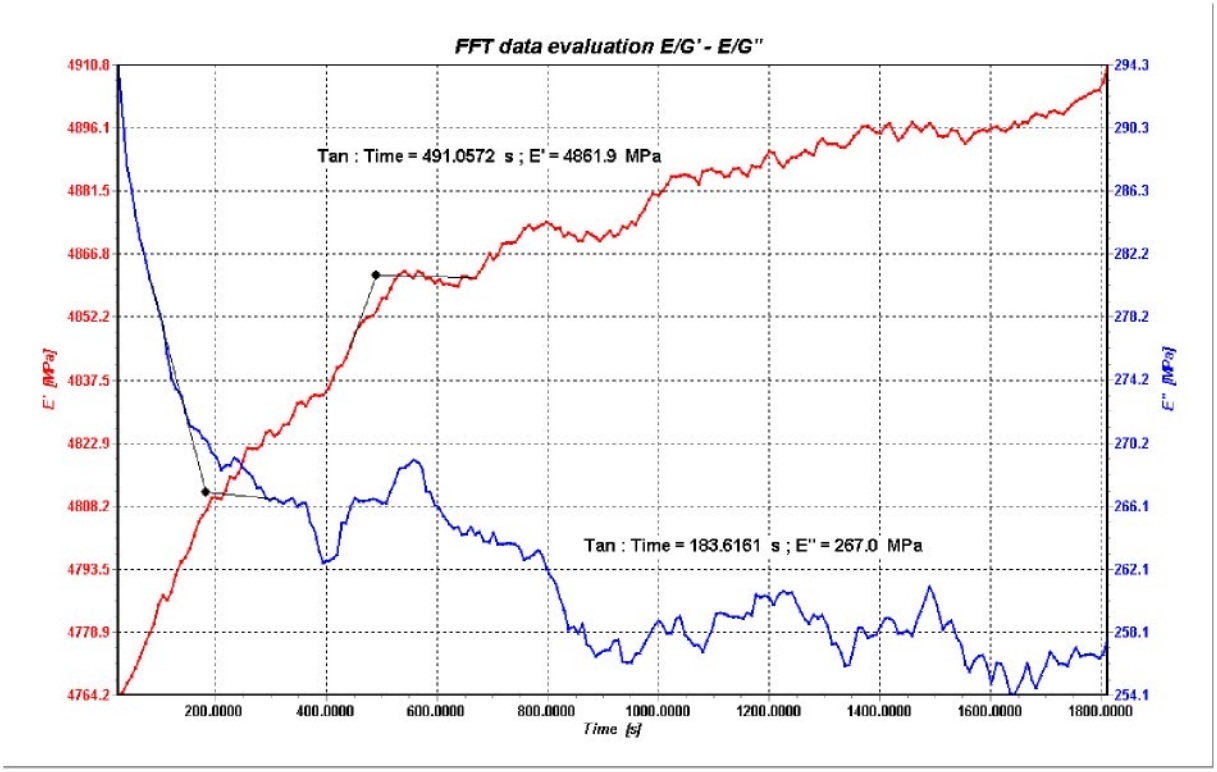
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.600 mm
  - Height: 3.600 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 1.36487E+04

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuzutek2
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 10 778.27 mN
Min : 163.77 mN
Dyn. : 5 307.25 mN
Stat. : 5 491.33 mN
X - Deformation
Max : - 0.189 mm
Min : - 0.220 mm
Dyn. : 0.015 mm
Stat. : - 0.204 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 25.2 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 20.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup : 2.58171E-02 rad
δon : 9.12940E-02 rad
Tan δup : 2.58226E-02
Tan δon : 9.15485E-02
E, E' & E''
Eup: 4.93006E+03 MPa
Eon: 4.58478E+03 MPa
E'up (cos): 4.92844E+03 MPa
E'on (cos): 4.56566E+03 MPa
E''up (sin): 1.27266E+02 MPa
E''on (sin): 4.17961E+02 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 367.3 MPa 0.00 Rad
20 Hz 4753.4 MPa 0.06 Rad
Def = 0.075 mm; Force = -0.19 mN;
Freq = 20.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horacekv...
15:52


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 543.9293 s ; E = 4872.5 MPa
Tan : Time = 212.9895 s ; Tg D = 0.055
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
4914.4
4900.2
4885.9
4871.7
4857.4
4843.2
4828.9
4814.7
4800.4
4786.2
0.072
0.070
0.068
0.066
0.064
0.062
0.060
0.058
0.056
0.054
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 491.0572 s ; E' = 4861.9 MPa
Tan : Time = 183.6161 s ; E'' = 267.0 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
4910.8
4896.1
4881.5
4866.8
4852.2
4837.5
4822.9
4808.2
4793.5
4778.9
4764.2
294.3
290.3
286.3
282.2
278.2
274.2
270.2
266.1
262.1
258.1
254.1
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

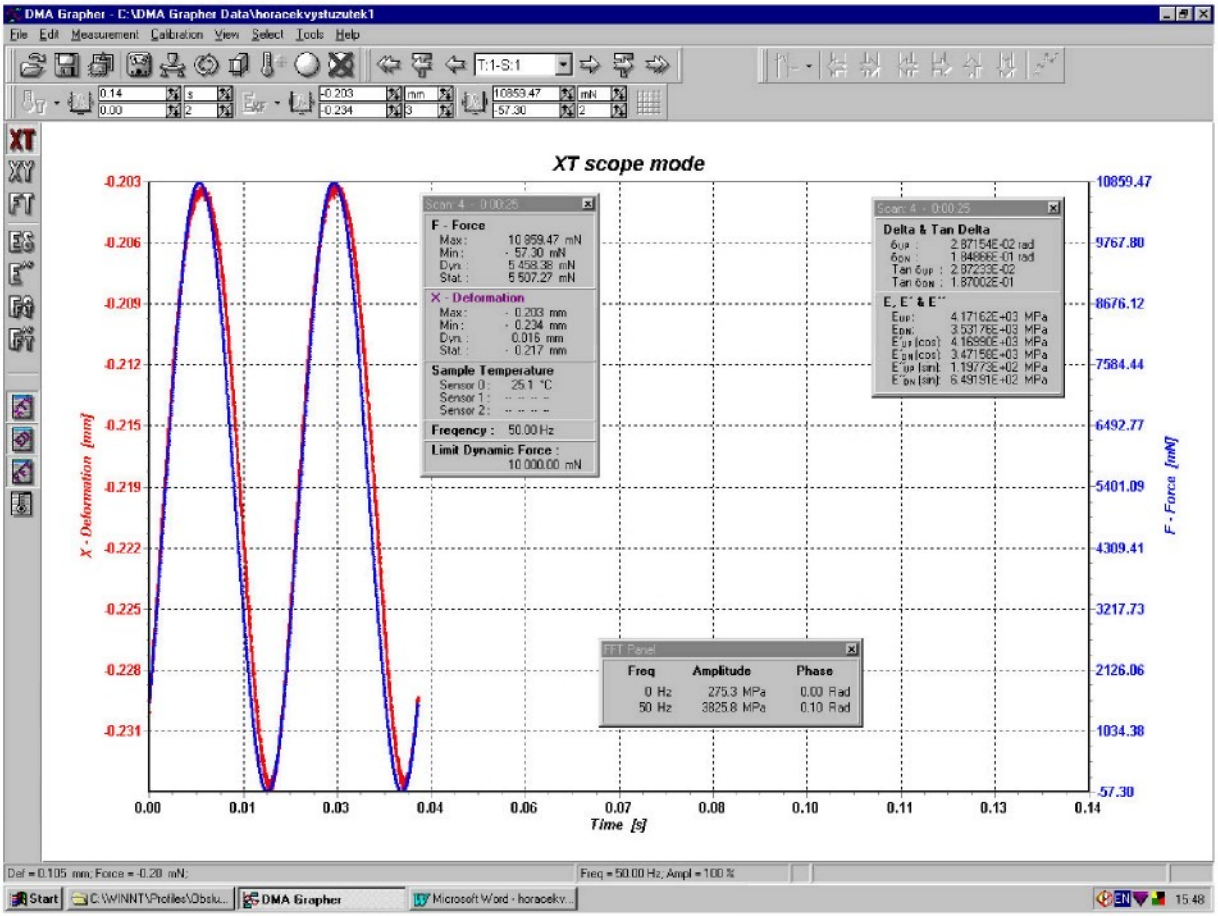
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuzutek1
- Measurement date: 18.11.2009 14:35:20
- Sample: horacekvystuzutek1
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 207.0 mN
- Operator: JH
- Comment

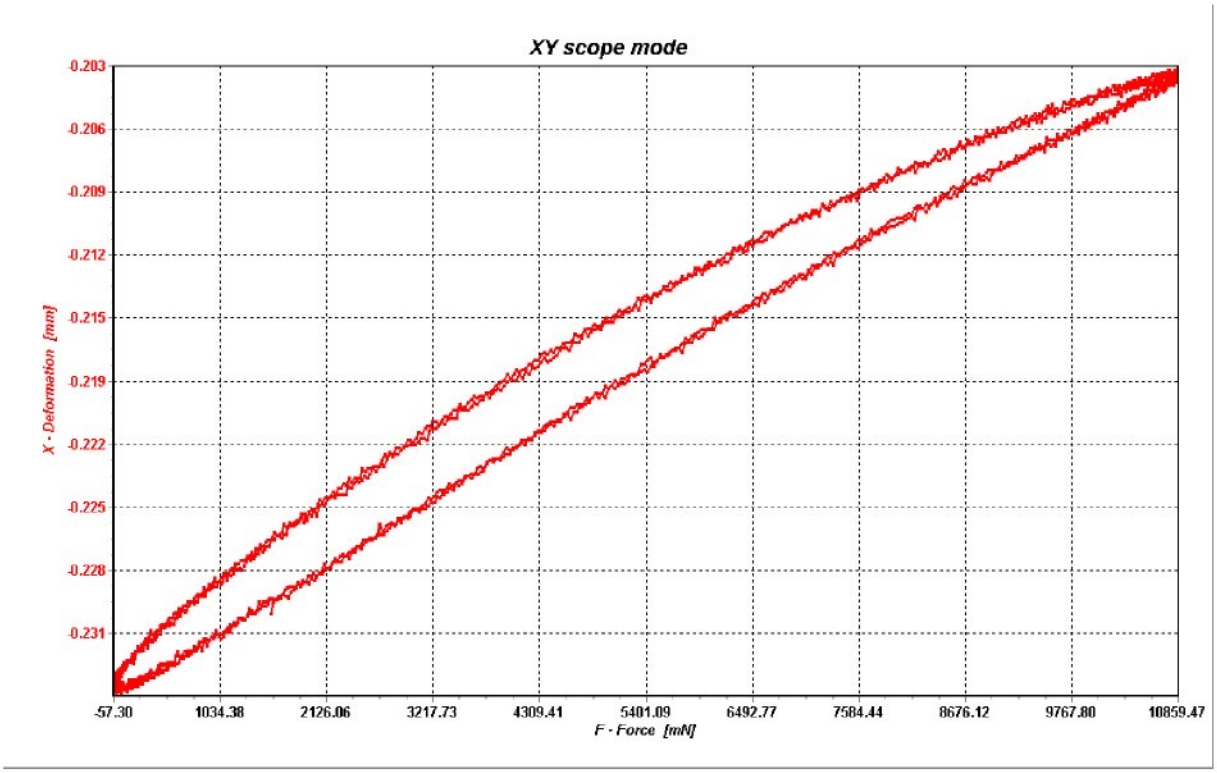
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

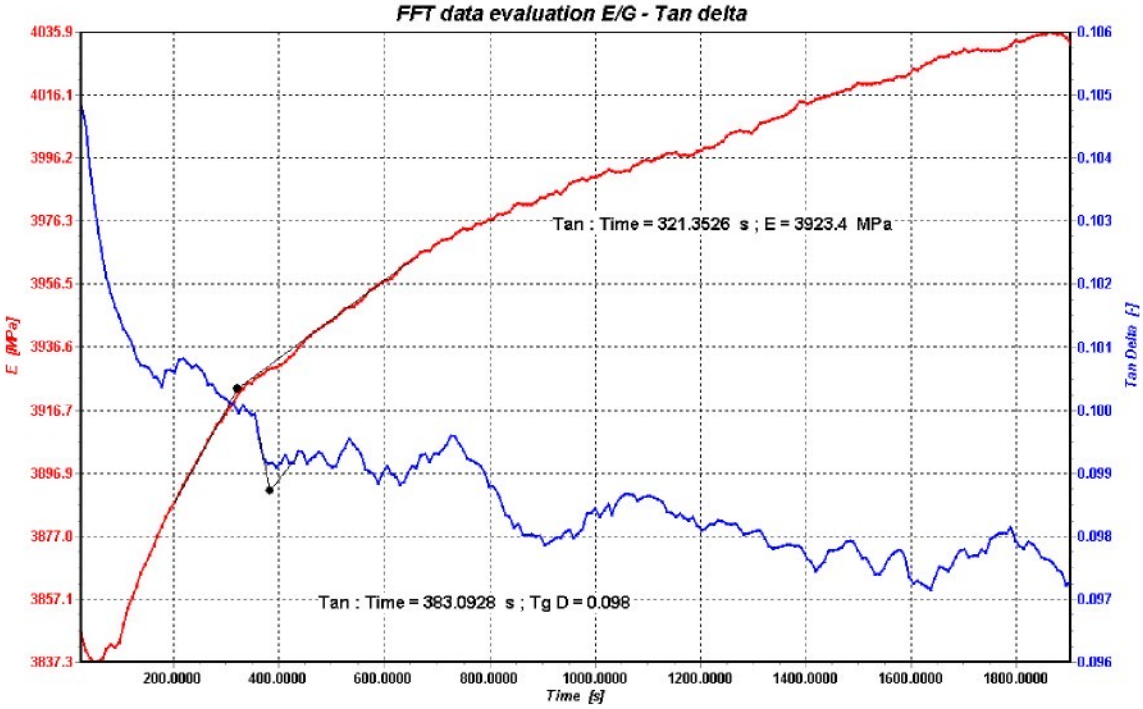
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 50 Hz
- Force limit : 10 000 mN

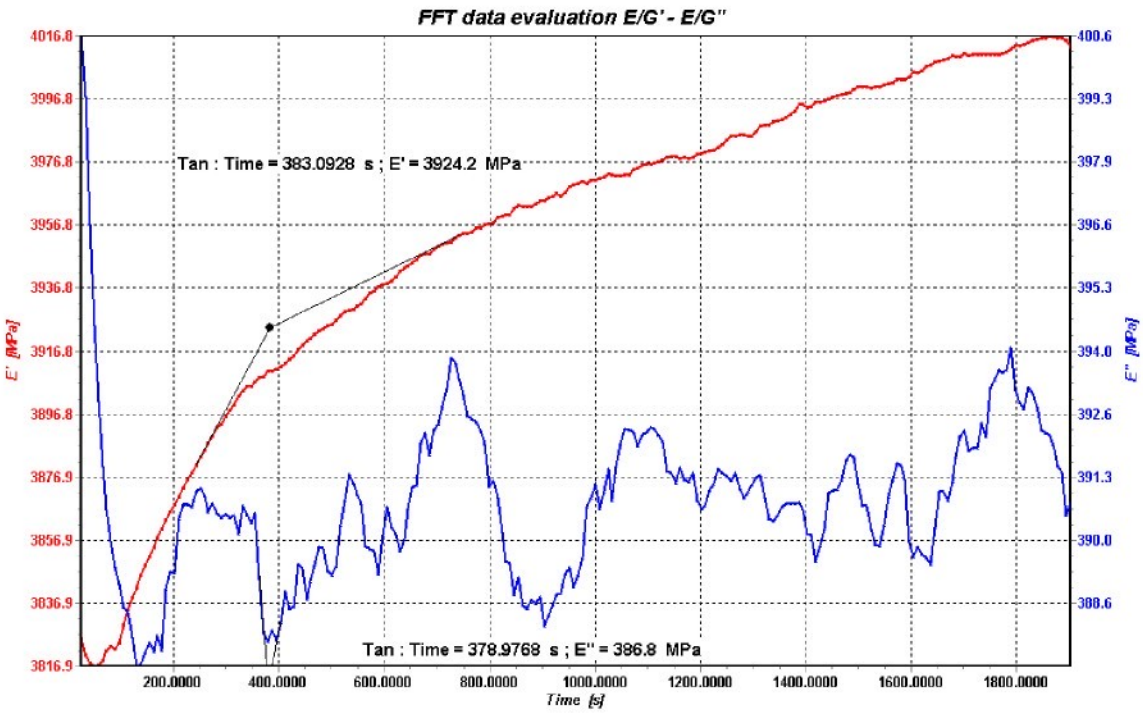
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.900 mm
  - Height: 3.850 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 1.08516E+04

Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuzutek1
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max: 10 859.47 mN
Min: - 57.30 mN
Dyn: 5 458.38 mN
Stat: 5 507.27 mN
X - Deformation
Max: - 0.203 mm
Min: - 0.234 mm
Dyn: 0.015 mm
Stat: - 0.217 mm
Sample Temperature
Sensor 0: 25.1 °C
Sensor 1: -- -- -- --
Sensor 2: -- -- -- --
Freqency: 50.00 Hz
Limit Dynamic Force: 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
E, E' & E''
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 275.3 MPa 0.00 Rad
50 Hz 3825.8 MPa 0.10 Rad
Def = 0.105 mm; Force = -0.20 mN;
Freq = 50.00 Hz; Ampl = 100 %
Start
DMA Grapher
Microsoft Word - horacekv...
15:48


XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 321.3526 s ; E = 3923.4 MPa
Tan : Time = 383.0928 s ; Tg D = 0.098
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
4035.9
4016.1
3996.2
3976.3
3956.5
3936.6
3916.7
3896.9
3877.0
3857.1
3837.3
0.106
0.105
0.104
0.103
0.102
0.101
0.100
0.099
0.098
0.097
0.096
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 383.0928 s ; E' = 3924.2 MPa
Tan : Time = 378.9768 s ; E'' = 386.8 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
4016.8
3996.8
3976.8
3956.8
3936.8
3916.8
3896.8
3876.9
3856.9
3836.9
3816.9
400.6
399.3
397.9
396.6
395.3
394.0
392.6
391.3
390.0
388.6
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

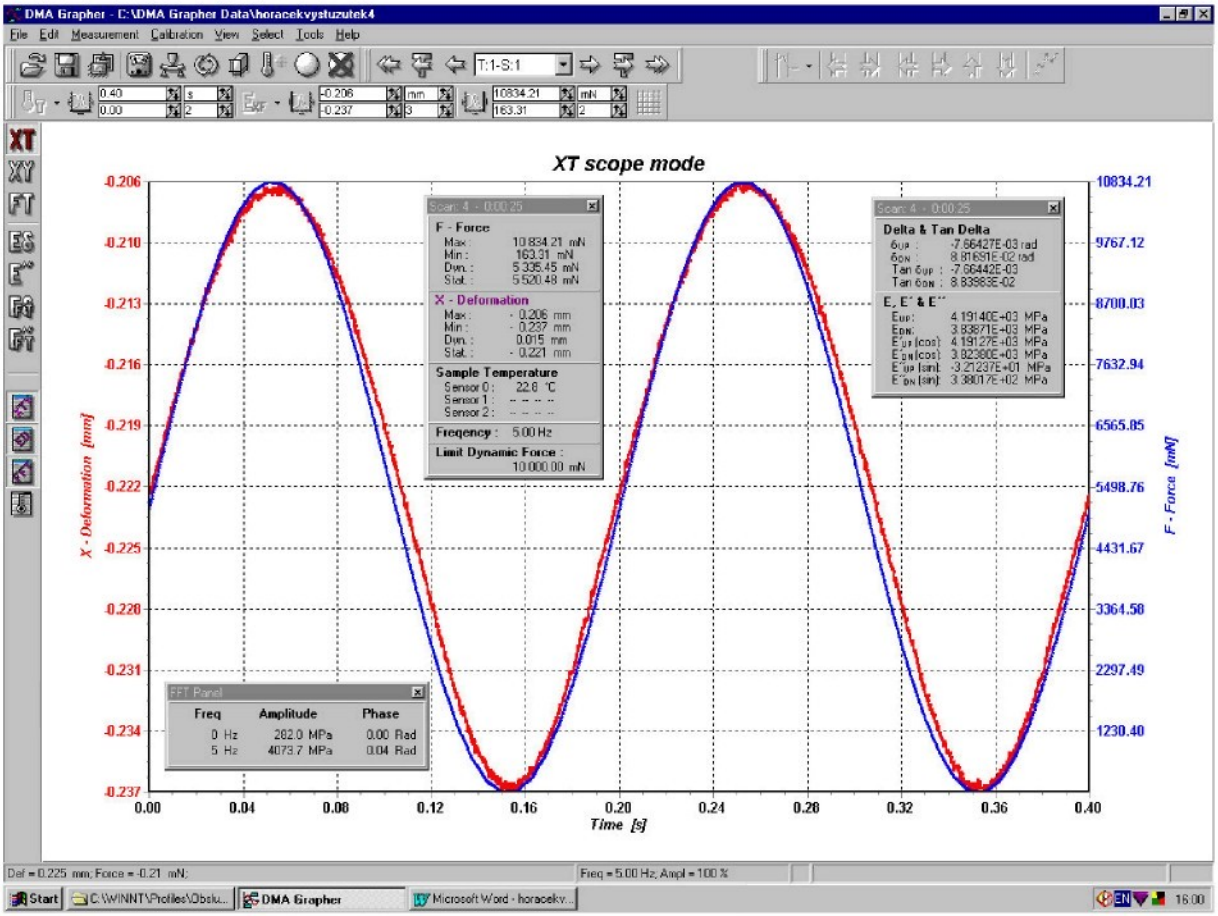
Experiment identification
- Measurement name: horacekvystuzutek4
- Measurement date: 24.11.2009 10:35:06
- Sample: horacekvystuzutek4
- Pretension:
  - Deformation: 0.000 mm
  - Force: 293.0 mN
- Operator: JH
- Comment

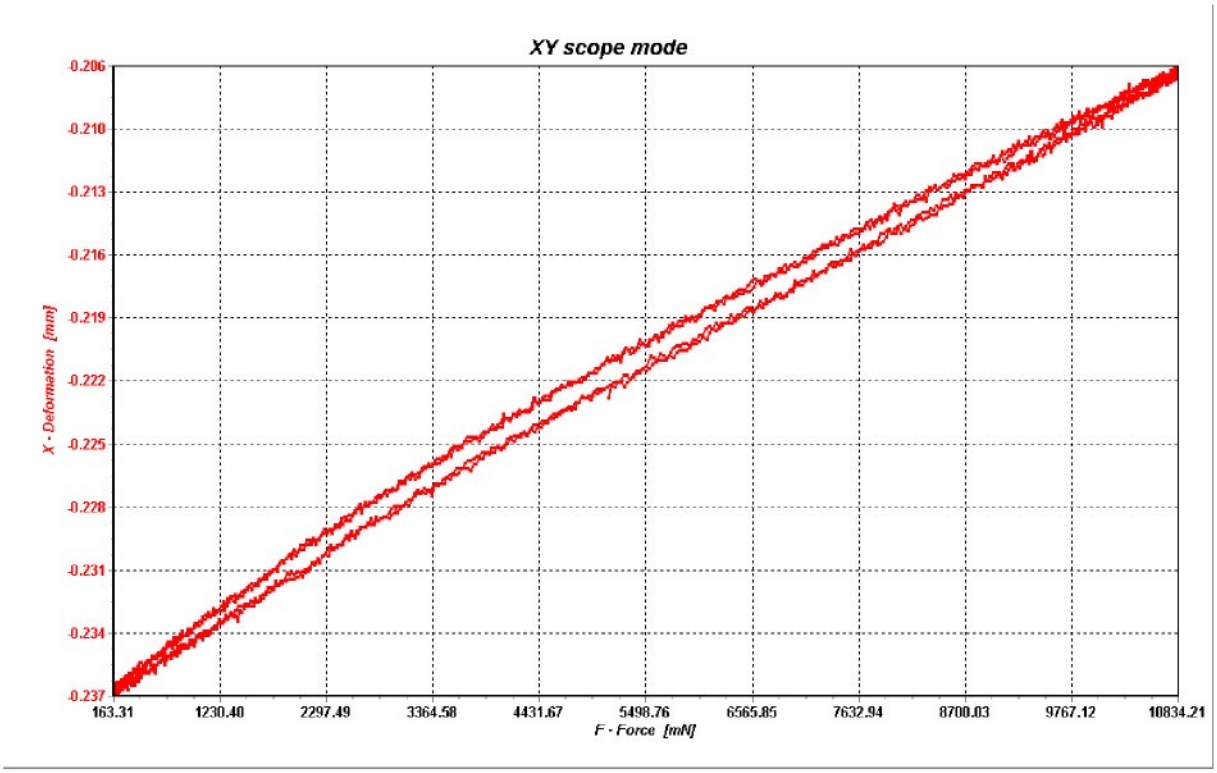
Instrument parameters
- Force wave form: Sine
- Deformation mode: 3 point bending
- Scan rate: 2048
- Force load mode: Constant deformation
- Scan delay: 0 s
- Scan count: 1
- Maximal test force: 1 000 mN

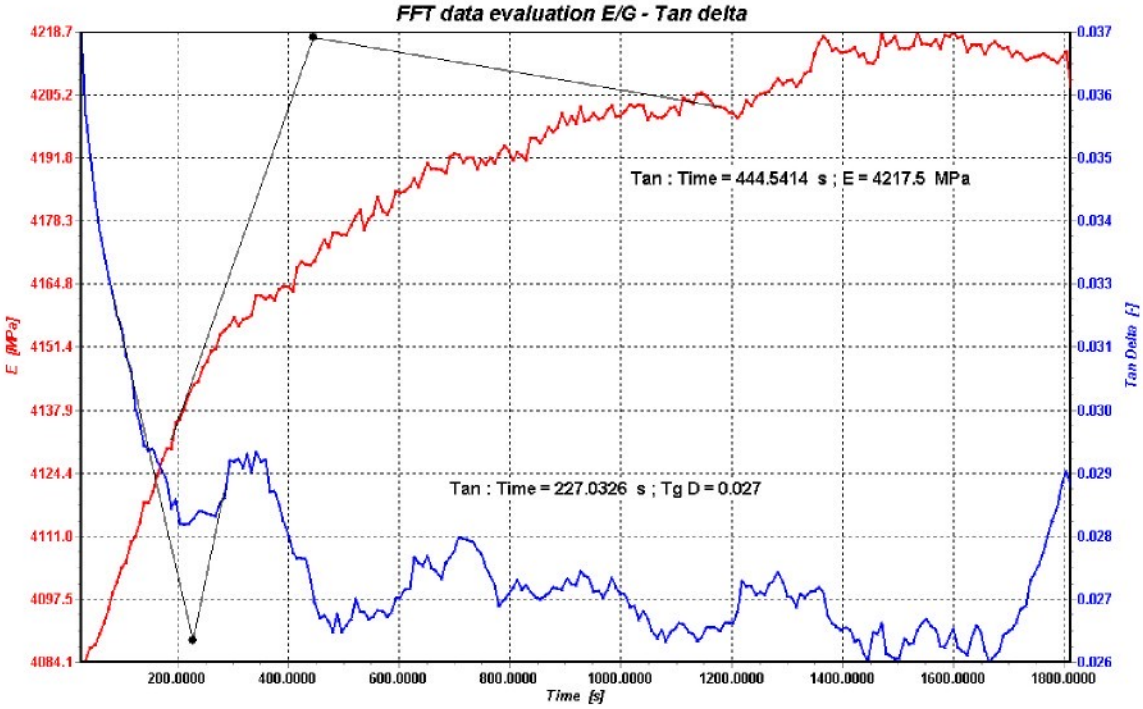
Measurement mode
- Measurement mode: Preview
- Deformation amplitude:
  - Max: 2.000 mm
  - Min: 0.020 mm
- Wave frequency: 5 Hz
- Force limit : 10 000 mN

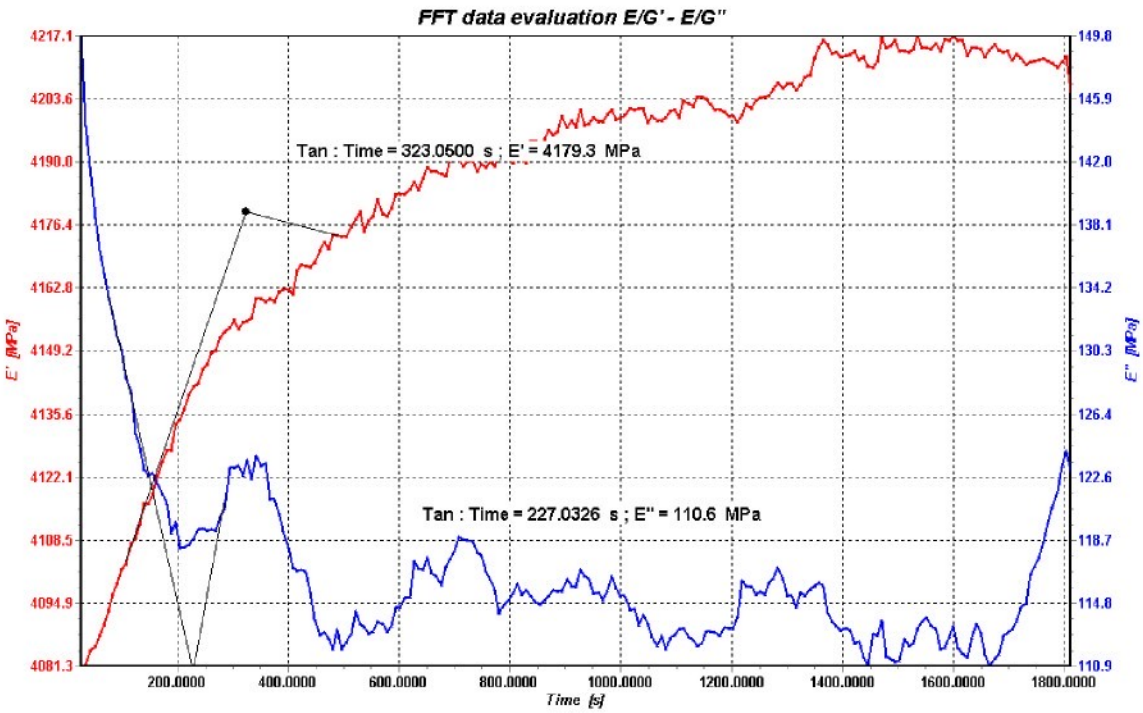
Sample parameters
- Type of enter: By proportion
- Sample shape: Rectangle
- Sample dimensions
  - Width: 10.900 mm
  - Height: 3.800 mm
  - Length: 30.000 mm
- K: 1.12856E+04

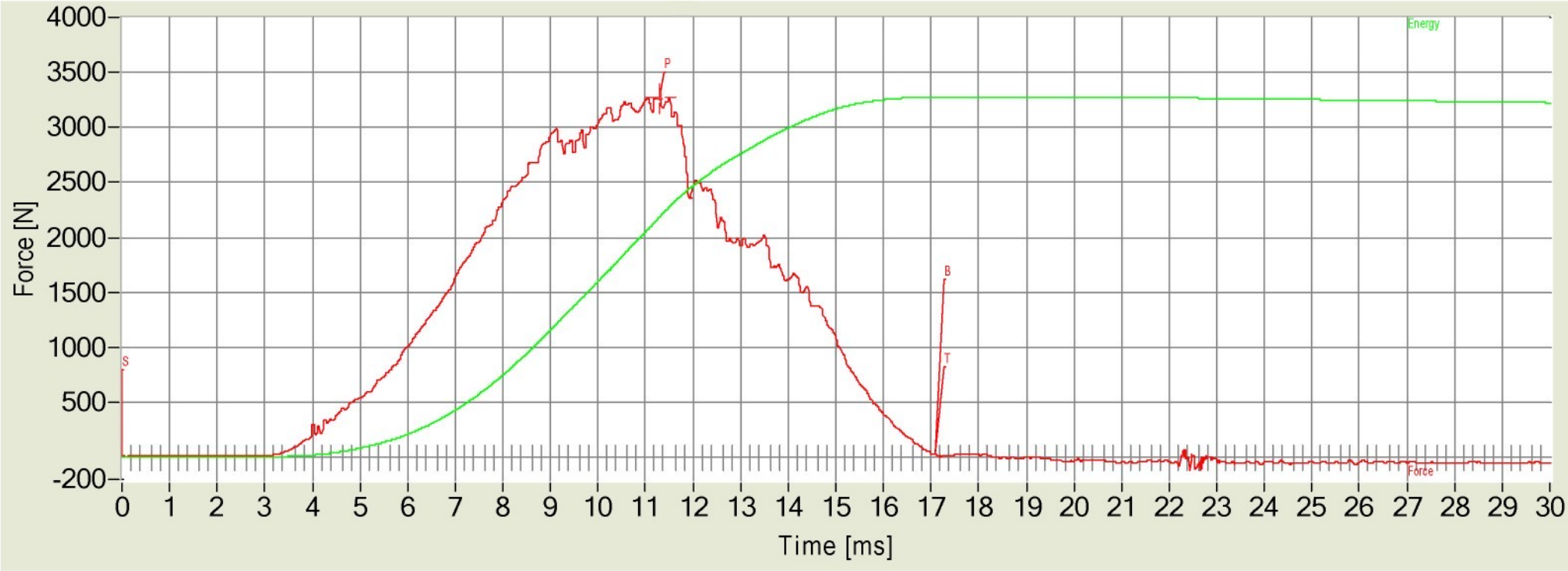
Temperature program
- Row: 1
  - End temperature: 22 °C
  - Heat/cool rate: 5.0 °C/min
  - Dwell: 30 min
  - Save interval
    - Time: 6 s


DMA Grapher - C:\DMA Grapher Data\horacekvystuzutek4
File Edit Measurement Calibration View Select Tools Help
XT scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]
Time [s]
F - Force
Max : 10 834.21 mN
Min : 163.31 mN
Dyn. : 5 335.45 mN
Stat. : 5 520.48 mN
X - Deformation
Max : - 0.206 mm
Min : - 0.237 mm
Dyn. : 0.015 mm
Stat. : - 0.221 mm
Sample Temperature
Sensor 0 : 22.6 °C
Sensor 1 : -- -- -- --
Sensor 2 : -- -- -- --
Freqency : 5.00 Hz
Limit Dynamic Force : 10 000.00 mN
Delta & Tan Delta
δup : -7.66427E-03 rad
δon : 8.81691E-02 rad
Tan δup : -7.66442E-03
Tan δon : 8.83983E-02
E, E' & E''
Eup : 4.19140E+03 MPa
Eon : 3.83871E+03 MPa
E'up (cos) : 4.19127E+03 MPa
E'on (cos) : 3.82380E+03 MPa
E''up (sin) : -3.21237E+01 MPa
E''on (sin) : 3.38017E+02 MPa
FFT Panel
Freq Amplitude Phase
0 Hz 282.0 MPa 0.00 Rad
5 Hz 4073.7 MPa 0.04 Rad
Def = 0.225 mm; Force = -0.21 mN;
Freq = 5.00 Hz; Ampl = 100 %

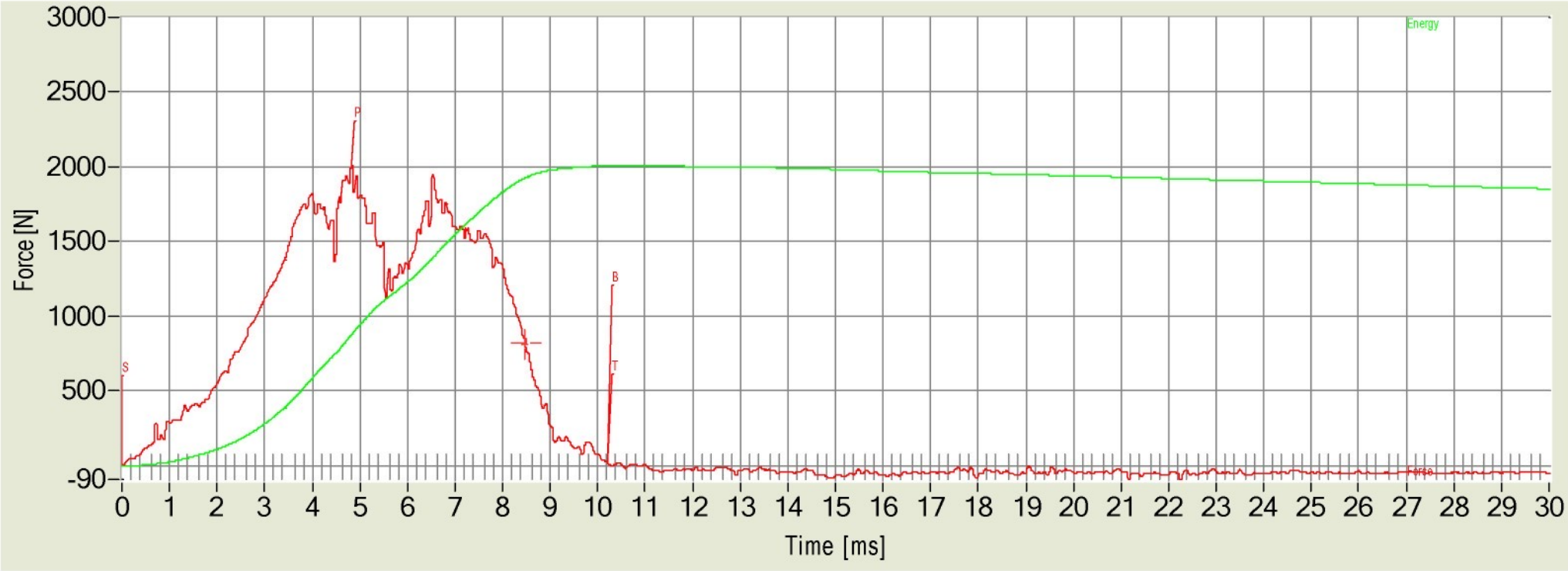

XY scope mode
X - Deformation [mm]
F - Force [mN]


FFT data evaluation E/G - Tan delta
Tan : Time = 444.5414 s ; E = 4217.5 MPa
Tan : Time = 227.0326 s ; Tg D = 0.027
E [MPa]
Tan Delta [-]
Time [s]
4218.7
4205.2
4191.8
4178.3
4164.8
4151.4
4137.9
4124.4
4111.0
4097.5
4084.1
0.037
0.036
0.035
0.034
0.033
0.031
0.030
0.029
0.028
0.027
0.026
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000

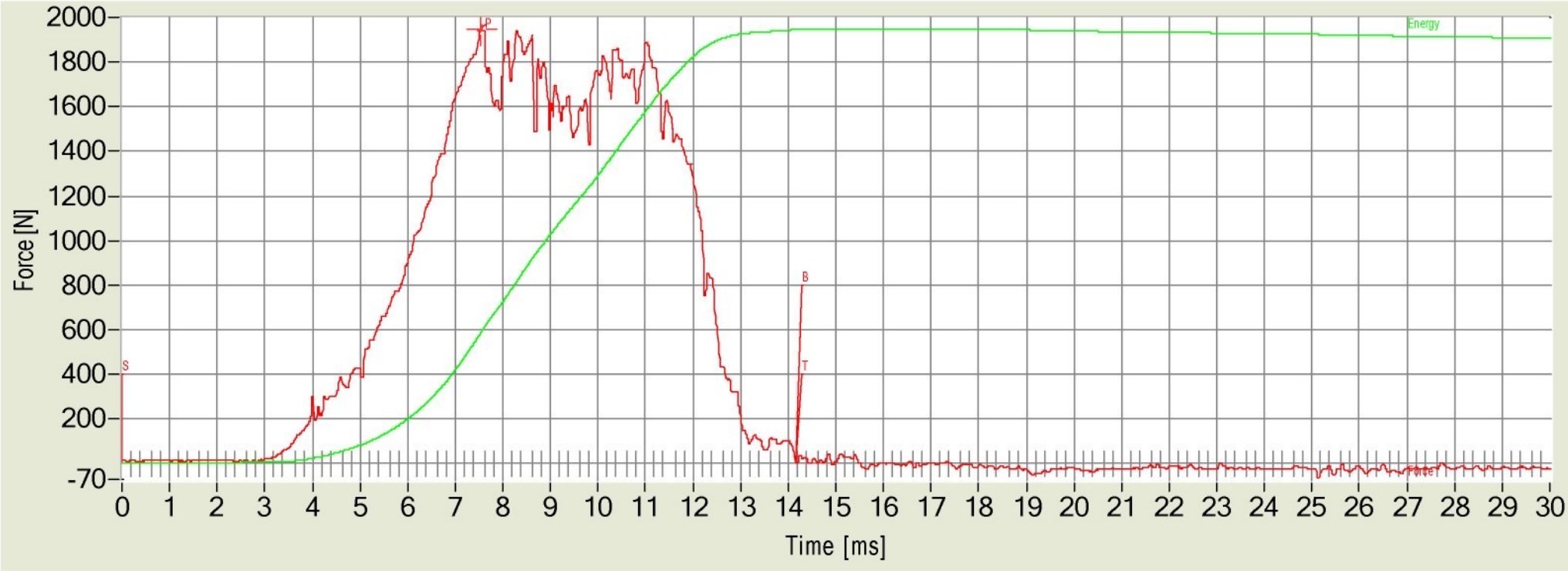

FFT data evaluation E/G' - E/G''
Tan : Time = 323.0500 s ; E' = 4179.3 MPa
Tan : Time = 227.0326 s ; E'' = 110.6 MPa
E' [MPa]
E'' [MPa]
Time [s]
4217.1
4203.6
4190.0
4176.4
4162.8
4149.2
4135.6
4122.1
4108.5
4094.9
4081.3
149.8
145.9
142.0
138.1
134.2
130.3
126.4
122.6
118.7
114.8
110.9
200.0000
400.0000
600.0000
800.0000
1000.0000
1200.0000
1400.0000
1600.0000
1800.0000


Force [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
Time [ms]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Energy
Force
S
P
B
T

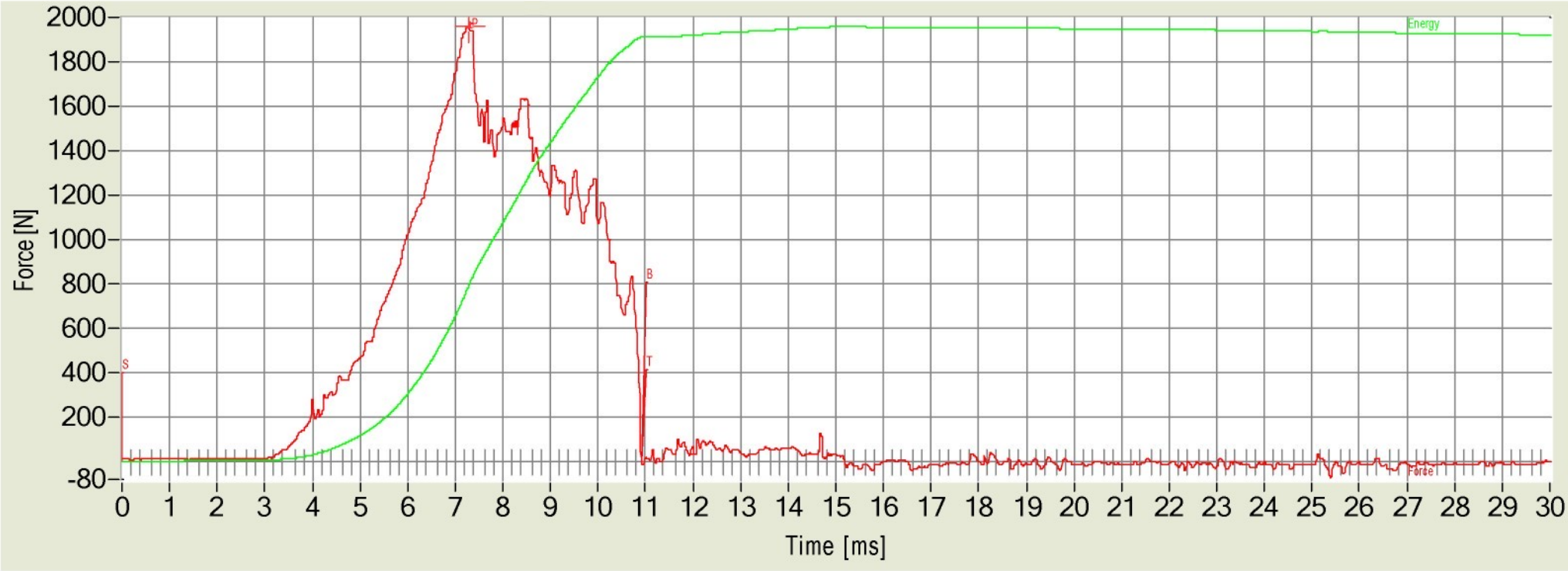
basaltB_0


Energy
Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-90
P
B
S
T
Time [ms]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

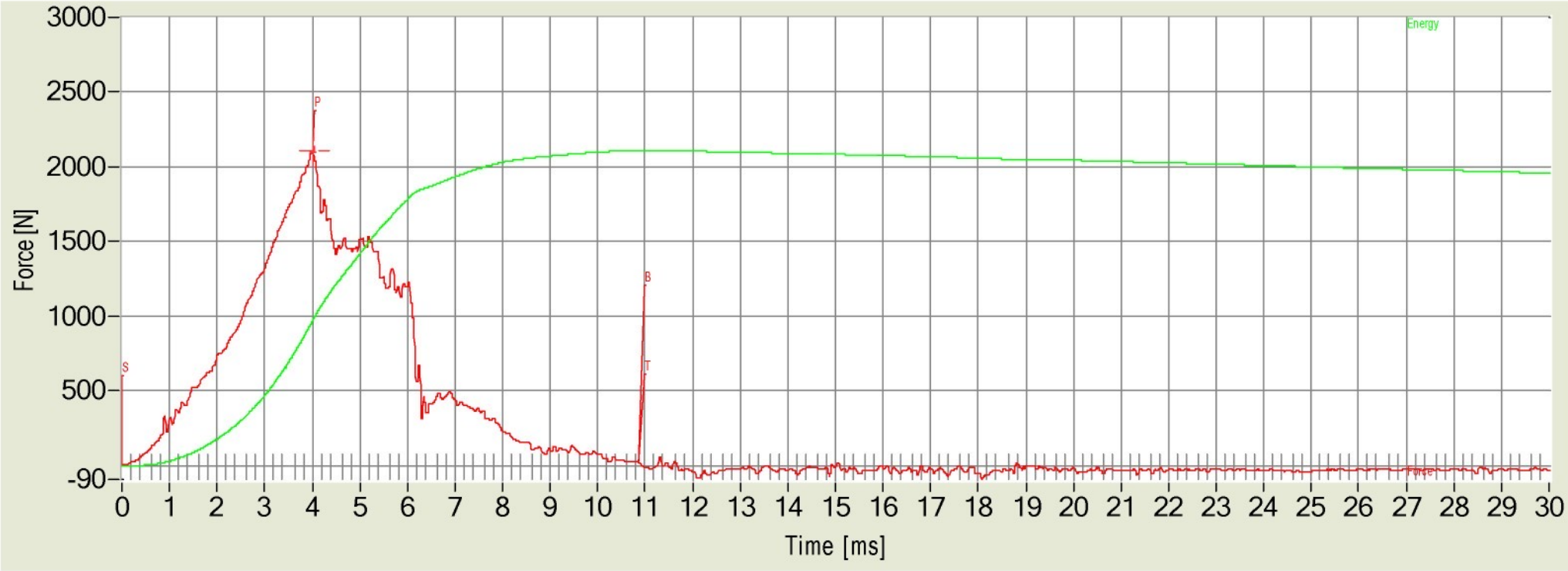
basaltB_1


Force [N]
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
-70
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Time [ms]
Energy
S
P
B
T

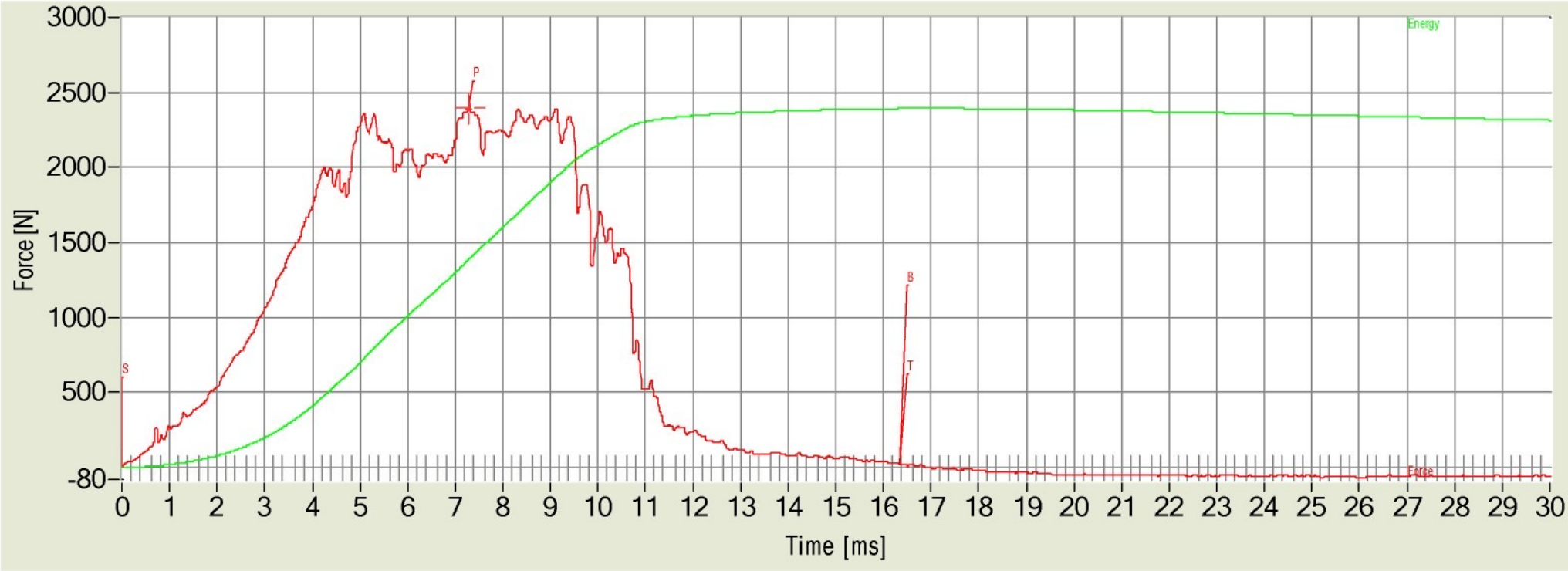
basaltB_2


Force [N]
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
-80
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Time [ms]
Energy
Force
S
P
B
T

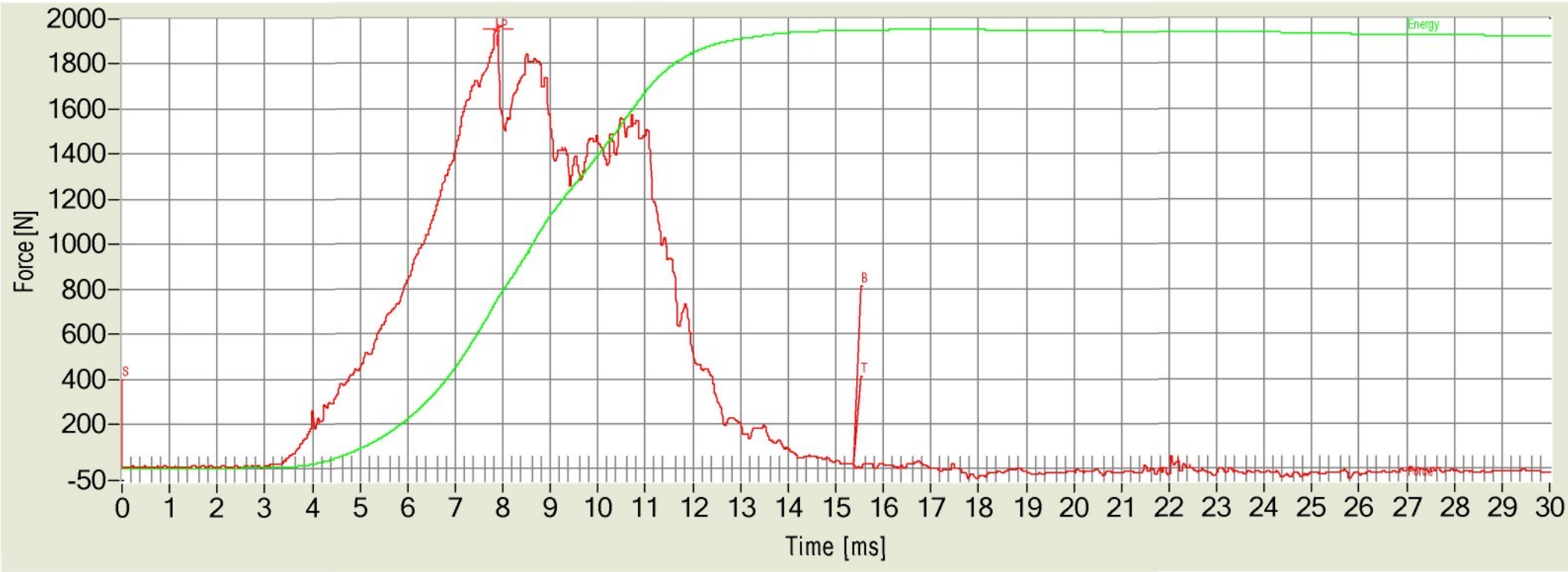
basaltB_3


Energy
Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-90
P
S
B
T
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Time [ms]

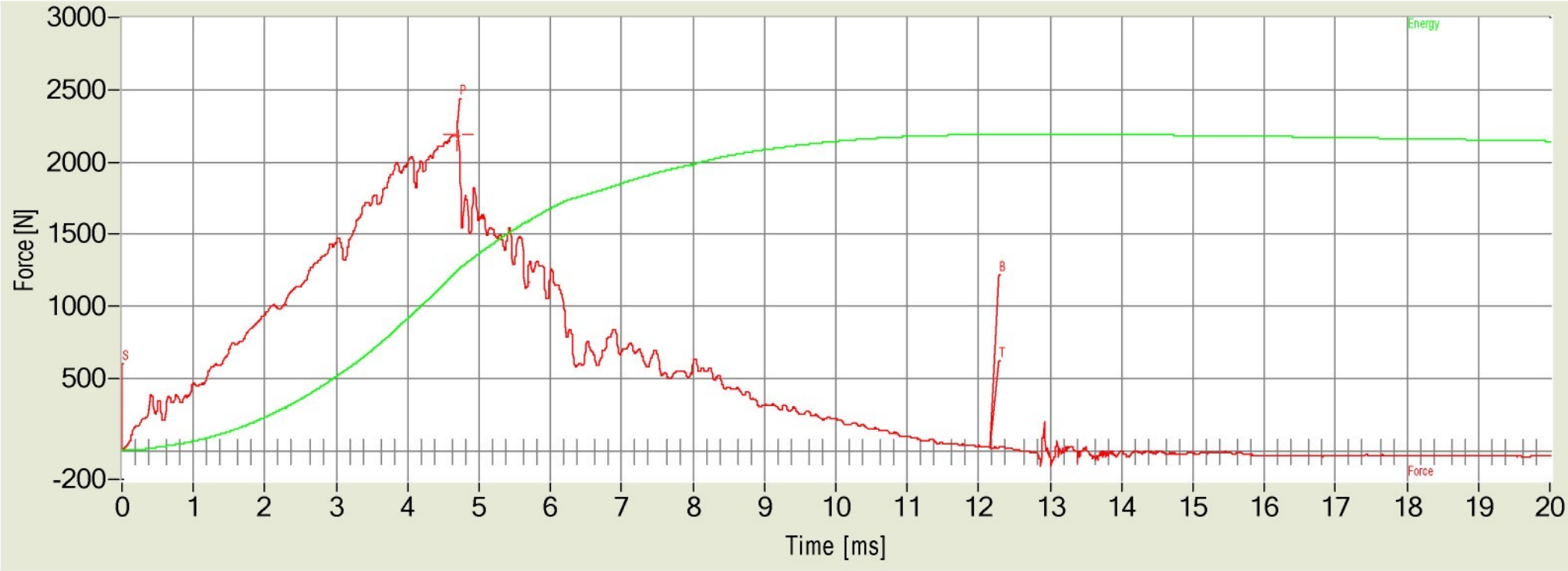
basaltB_4


Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-80
Time [ms]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Energy
Force
S
P
B
T

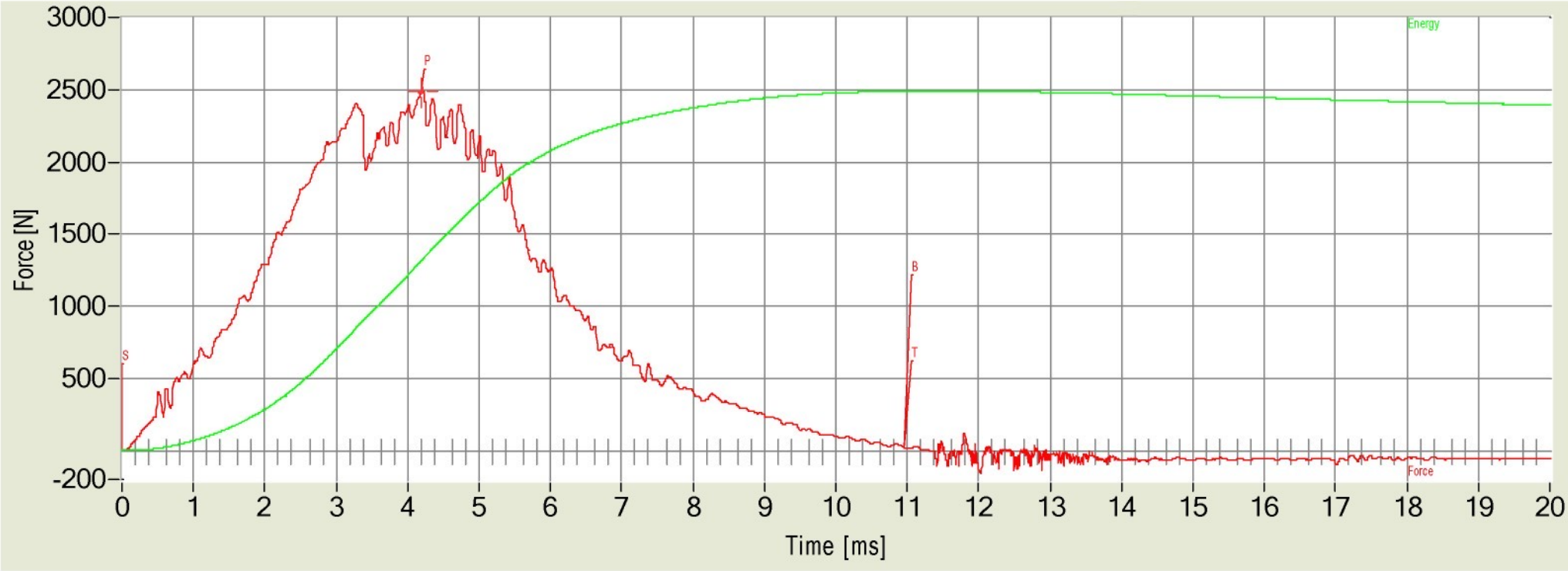
basaltB_5


Force [N]
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
-50
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Time [ms]
Energy
S
P
B
T

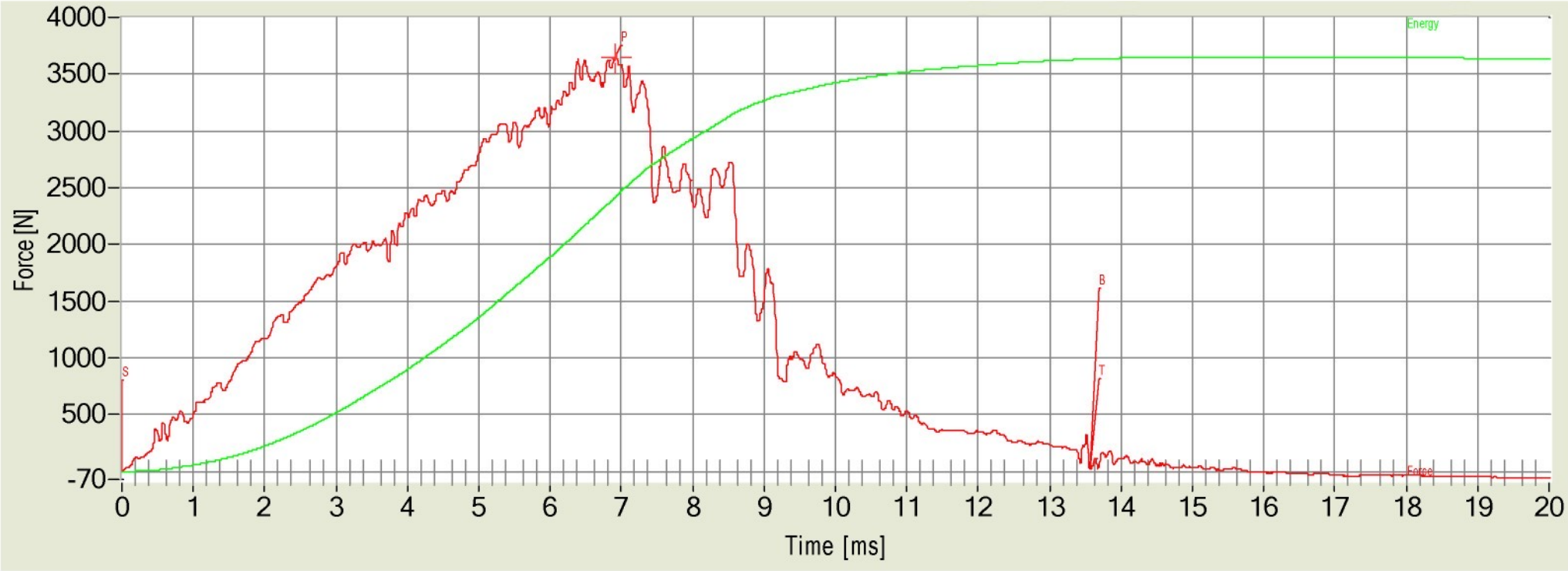
basaltB_6


Energy
Force
P
B
T
S
Force [N]
Time [ms]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

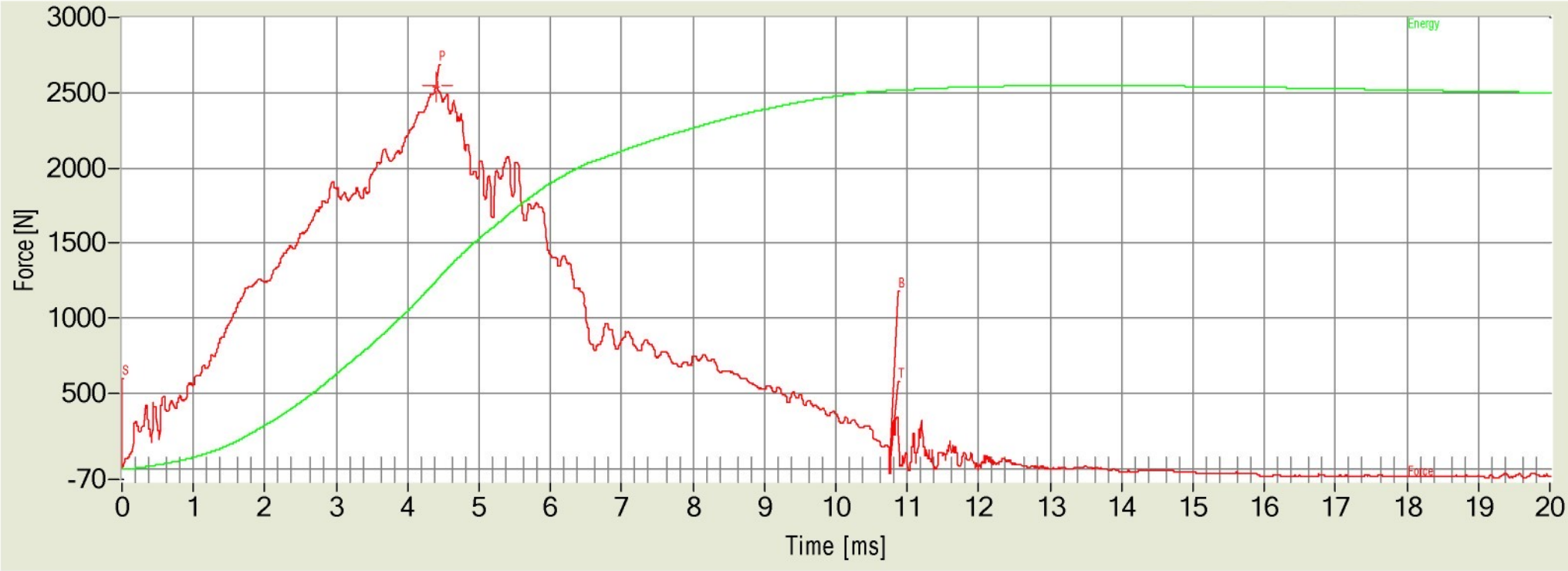
BR_____0


Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Time [ms]
Energy
Force
S
P
B
T

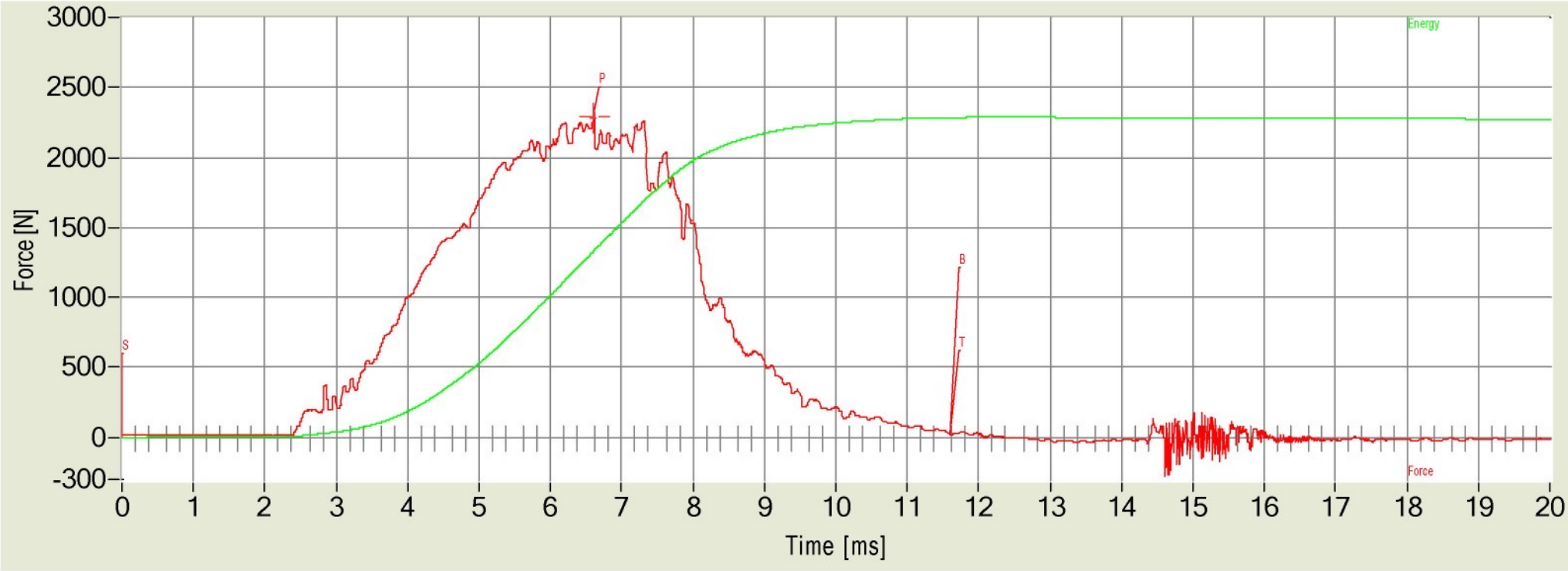
BR_____1


Force [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
-70
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Time [ms]
Energy
Force
S
P
B
T

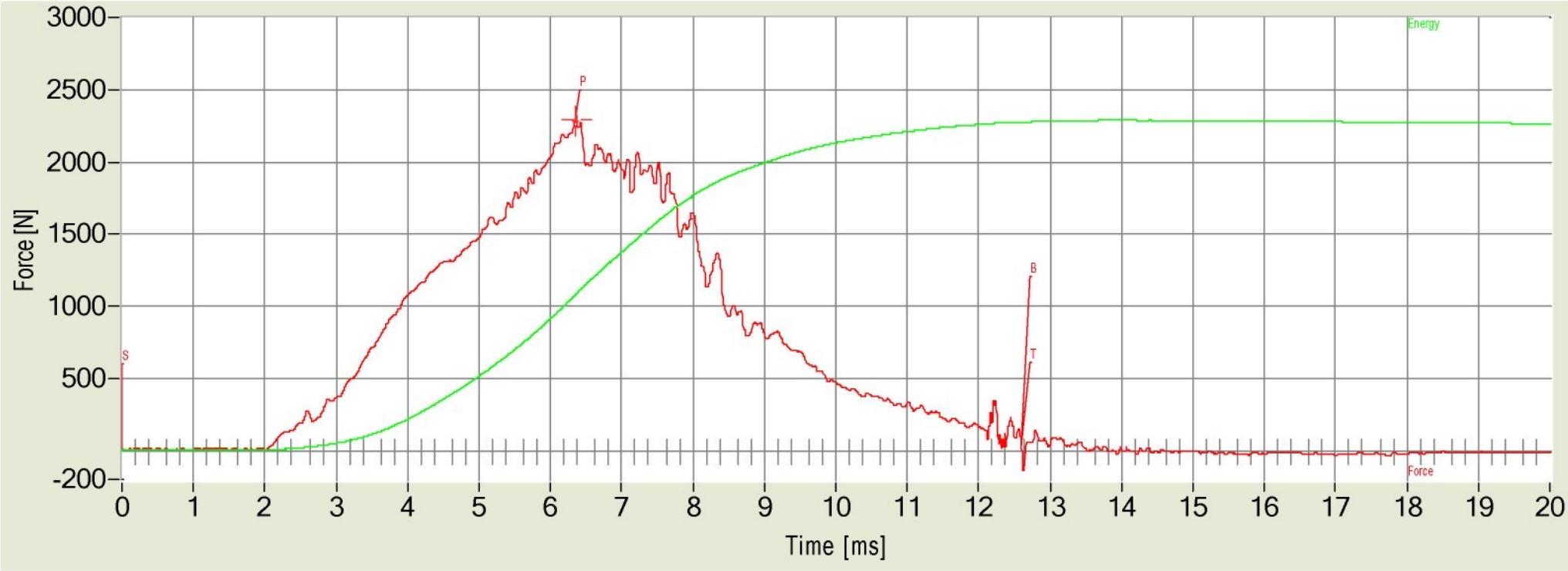
BR_____2


Energy
Force
P
B
S
T
Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-70
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Time [ms]

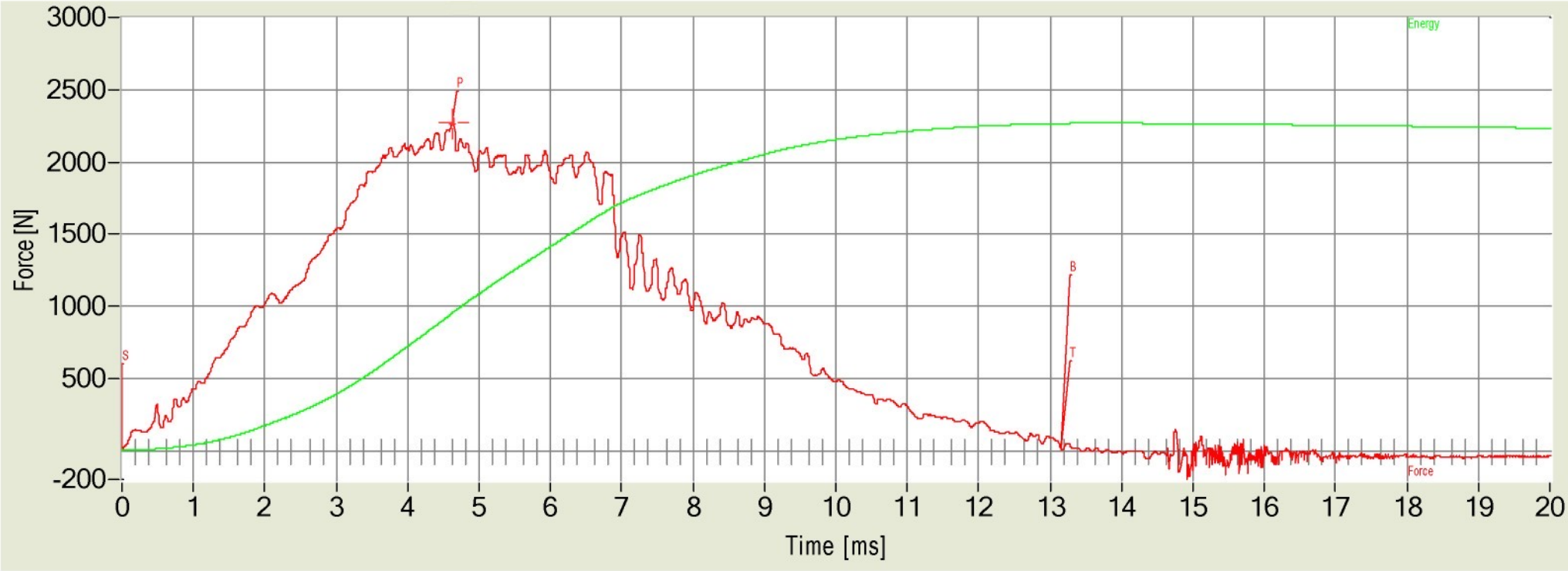
BR_____3


Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
-300
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Time [ms]
Energy
Force
S
P
B
T

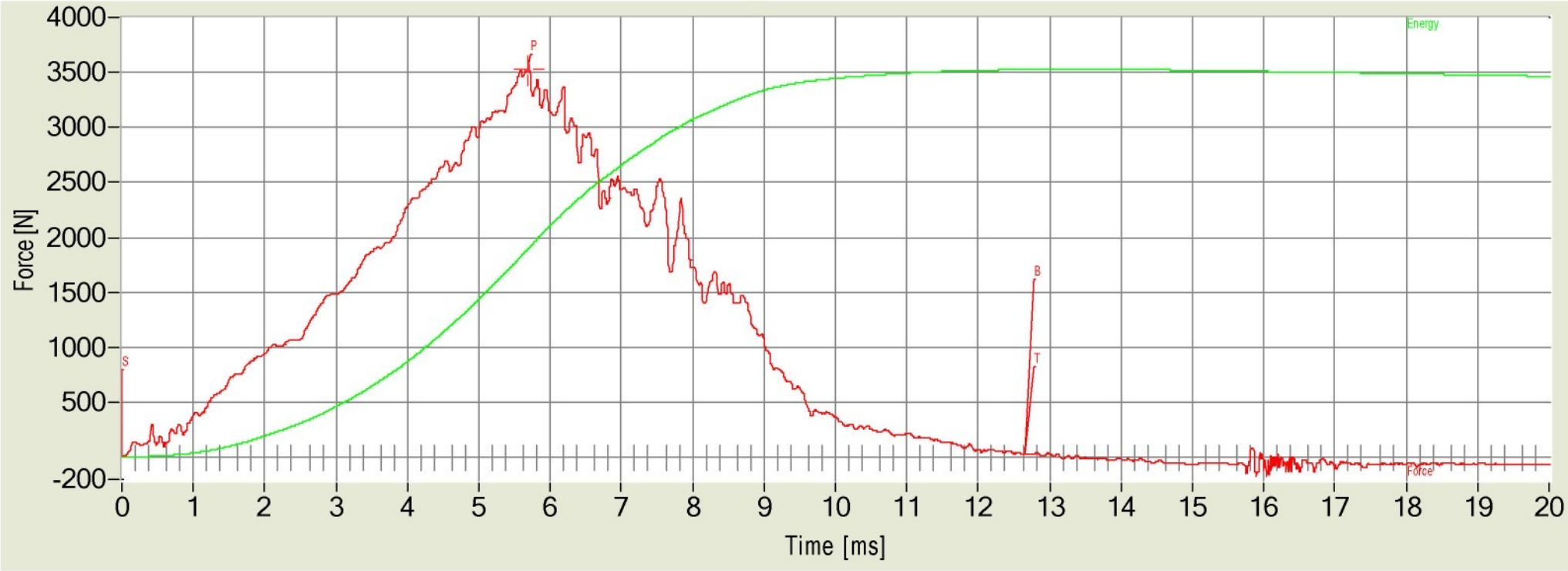
basaltR_0


Energy
P
B
T
S
Force
Force [N]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Time [ms]

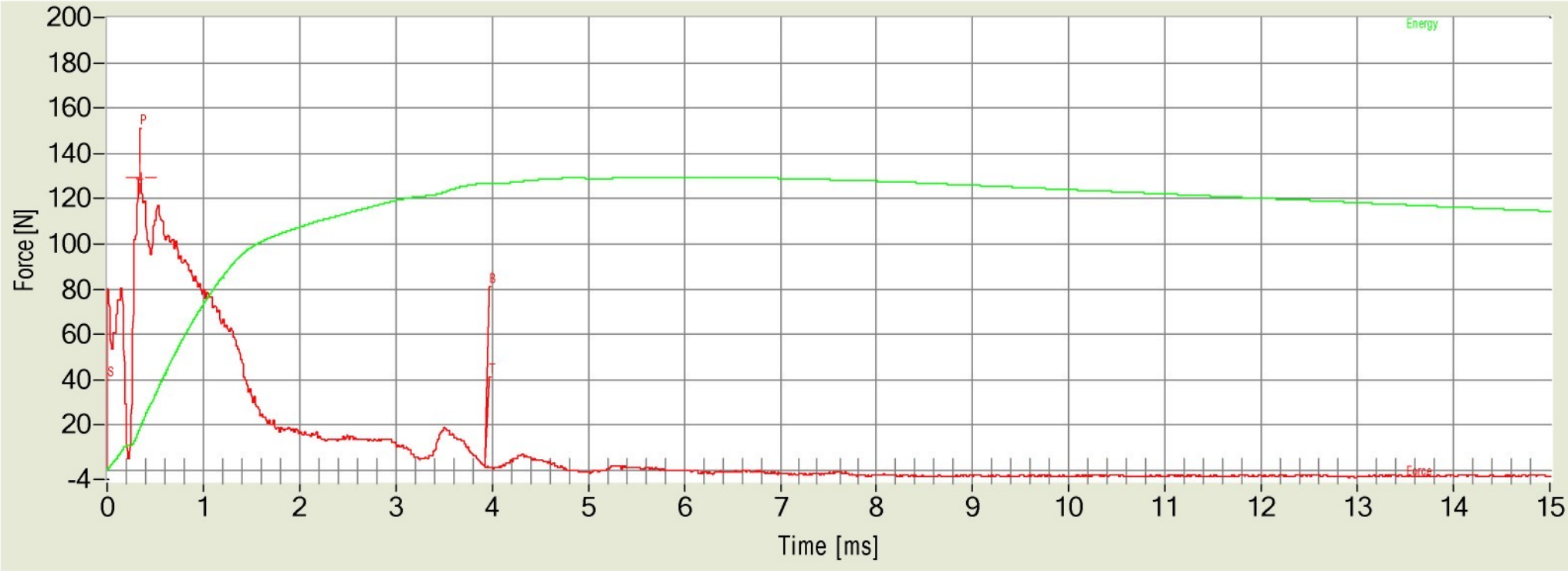
basaltR_1


Energy
Force
P
S
B
T
Force [N]
Time [ms]
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

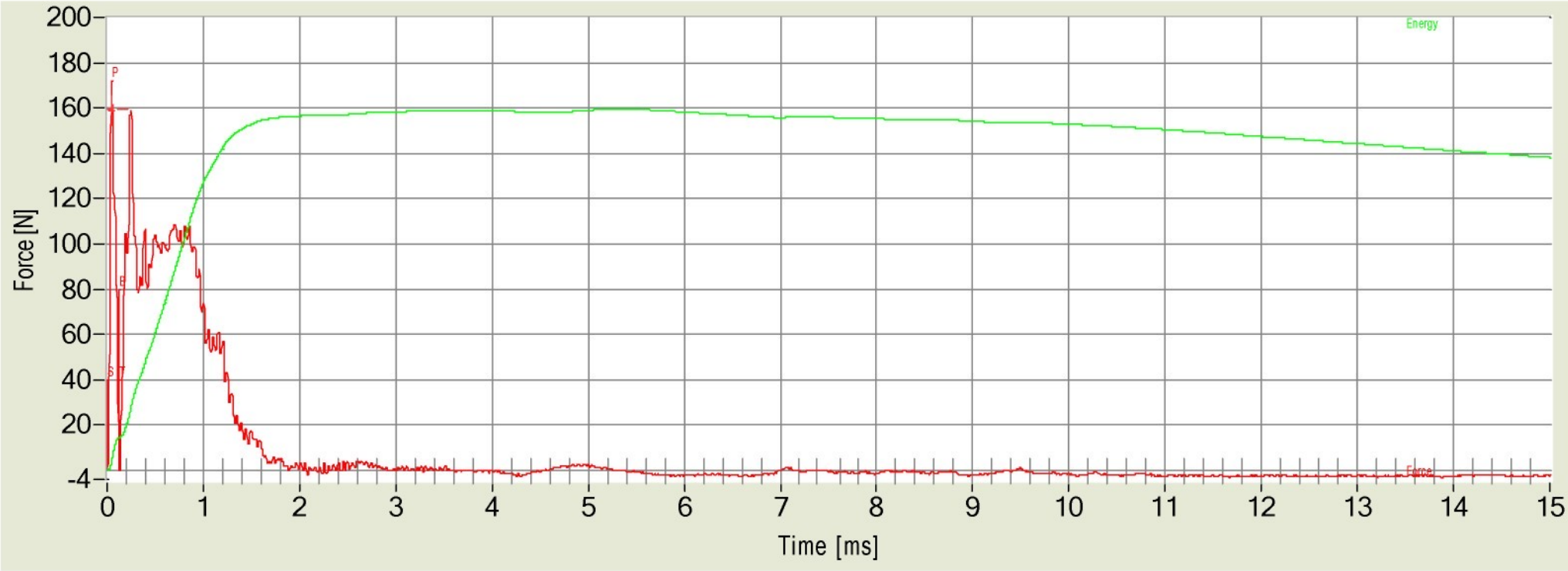
basaltR_2


Force [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
-200
Time [ms]
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
Energy
Force
S
P
B
T

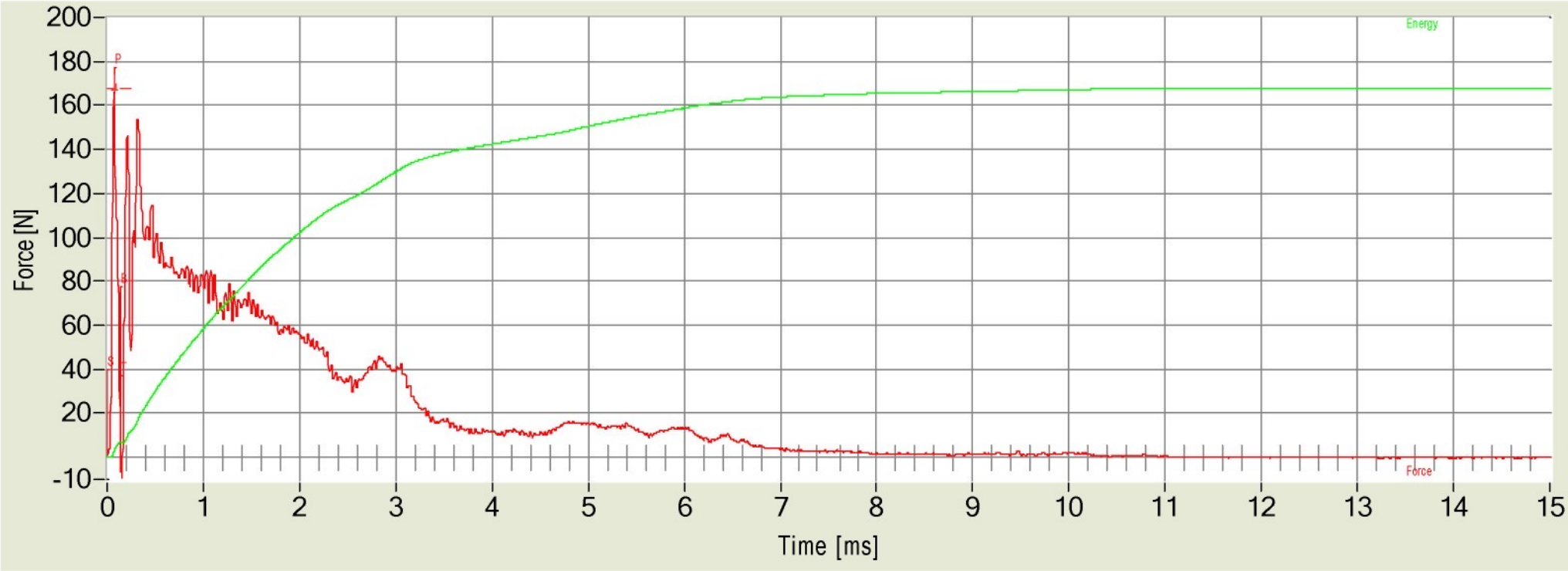
basaltR_3


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-4
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

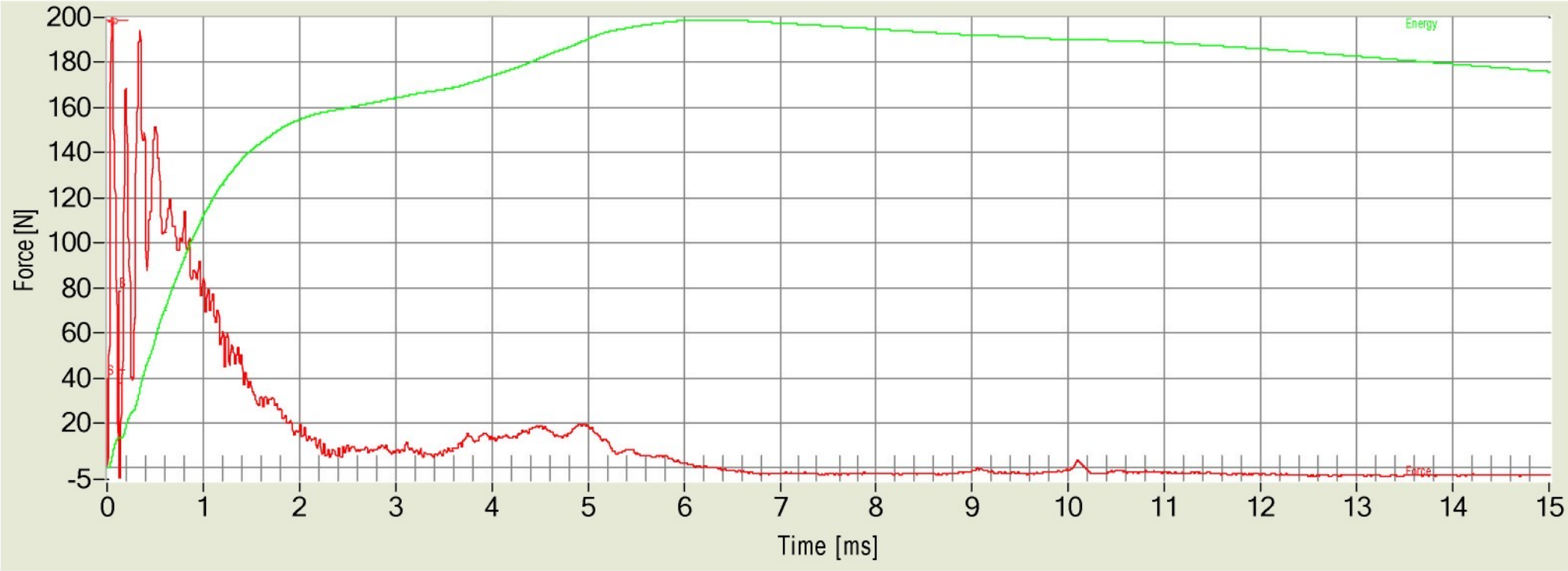
osnovaBR_0


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-4
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

osnovaBR_1


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-10
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

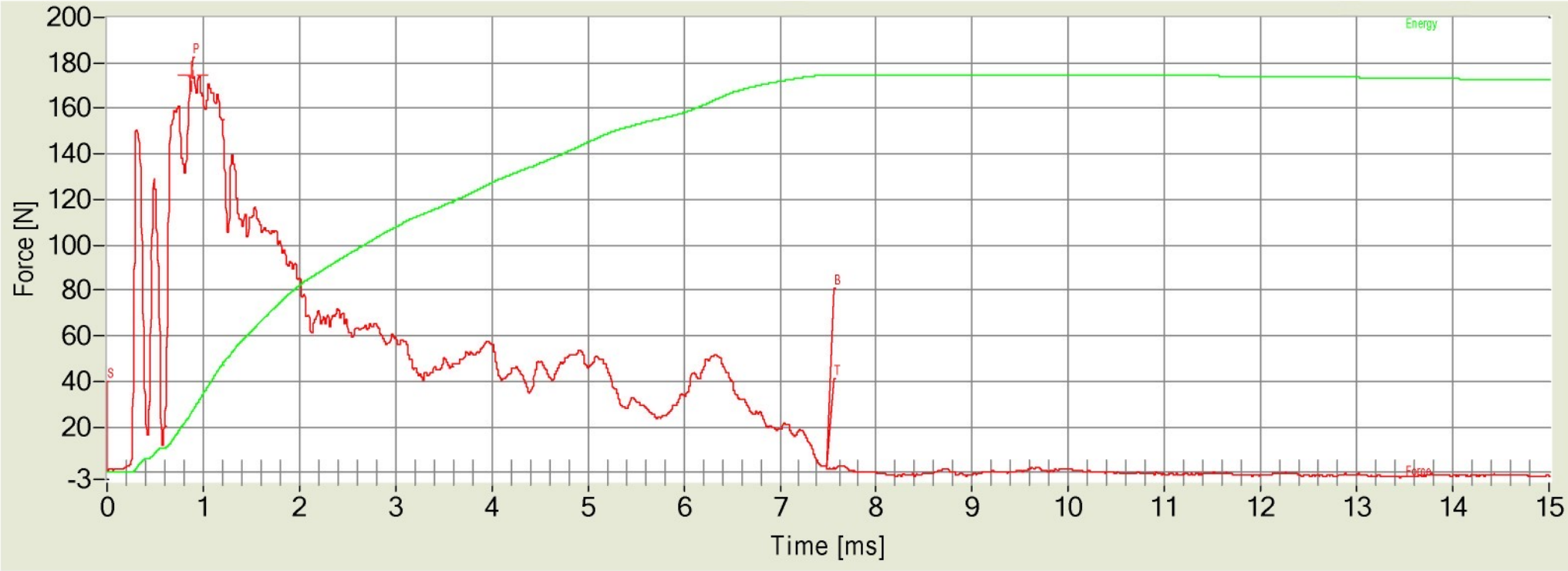
osnovaBR_2


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-5
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

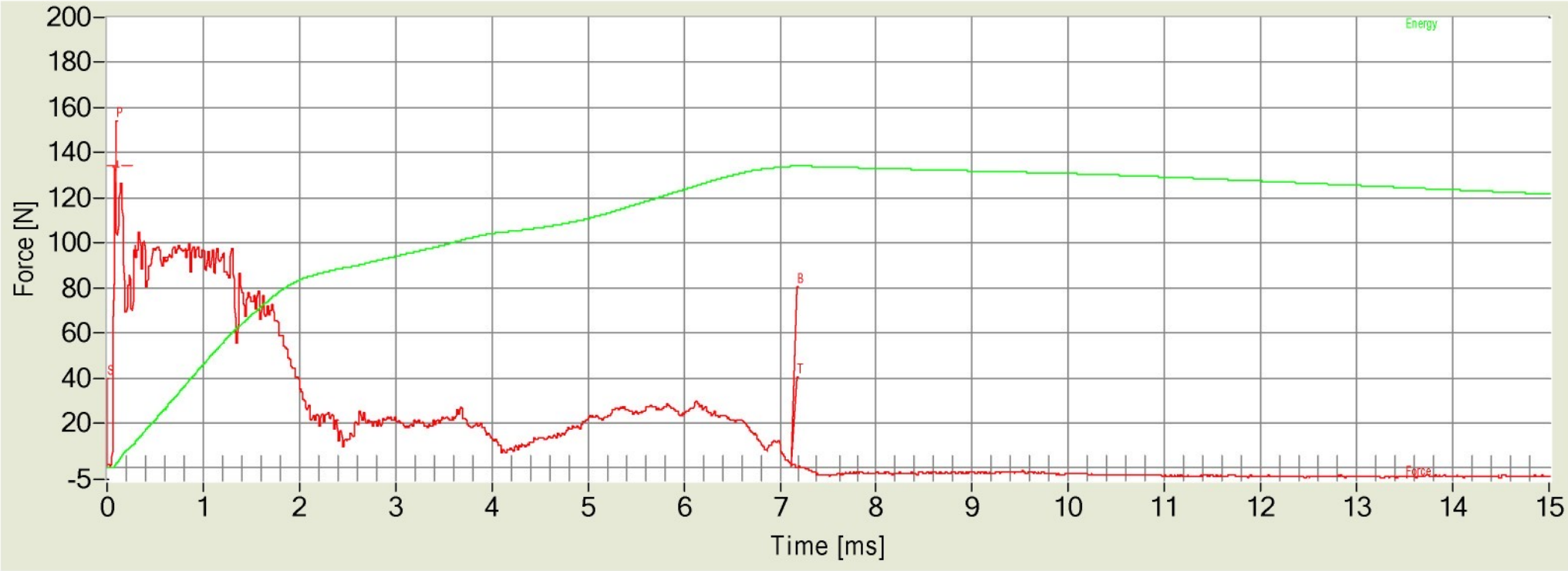
osnovaBR_3

Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-4
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

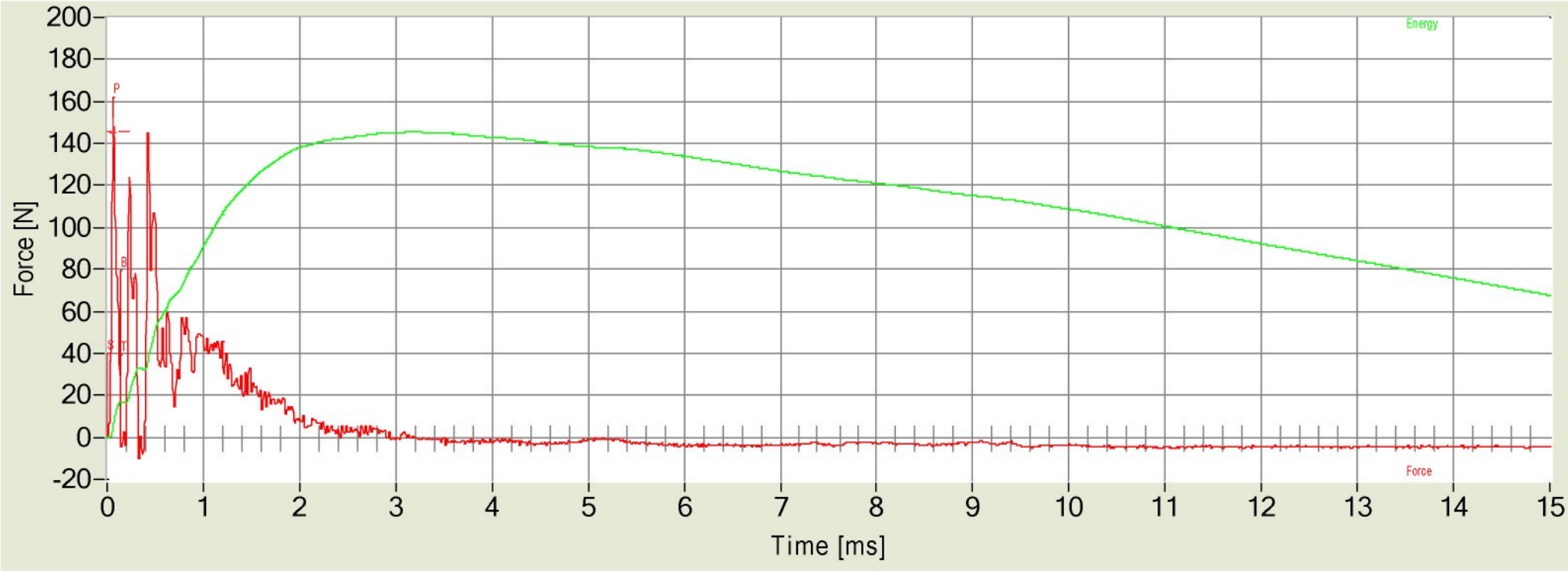
osnovaBR_4


Force [N]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-3
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Time [ms]
Energy
Force
P
S
B
T

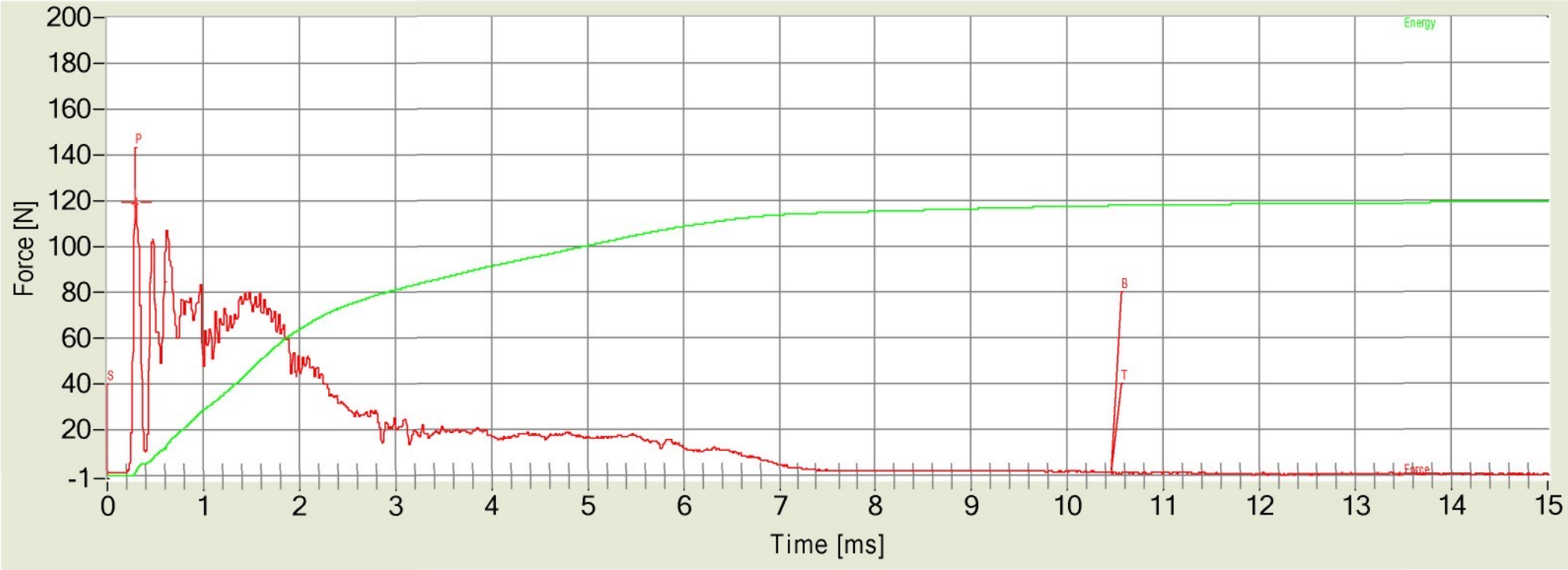
utekBR_0


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-5
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
P
S
B
T

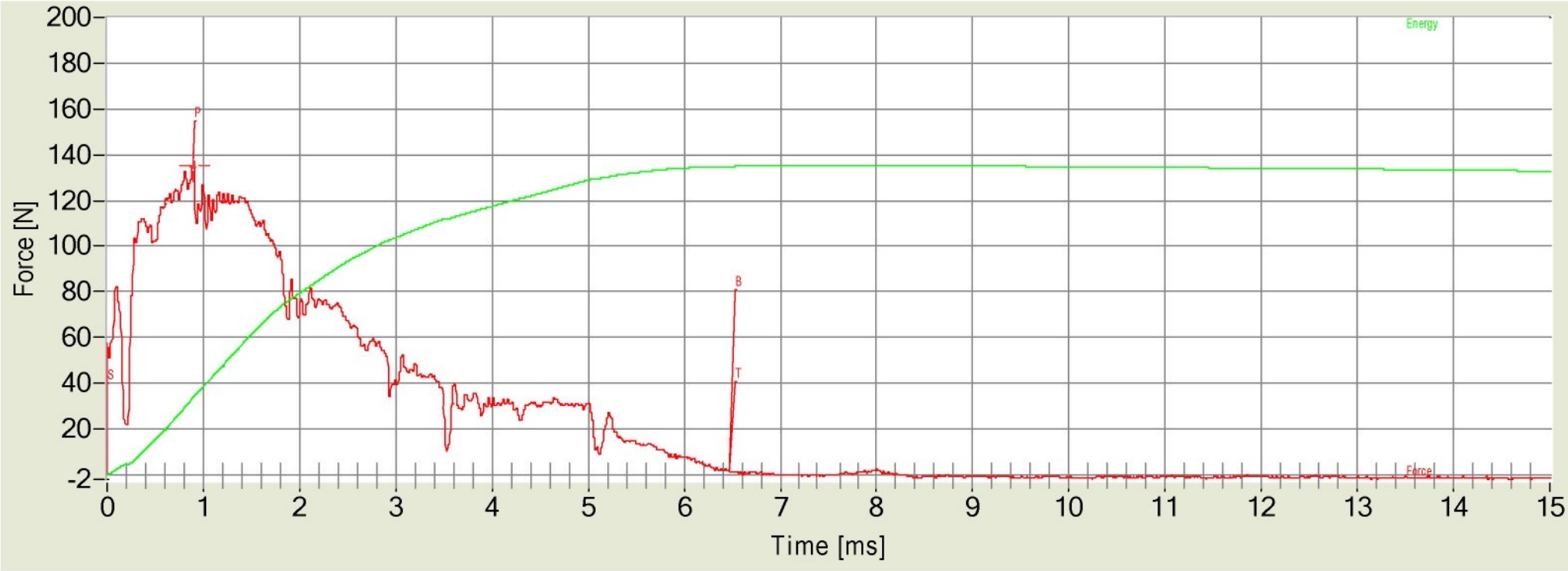
utekBR_1


Energy
Force
P
B
S
T
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

utekBR_2


Energy
Force
P
S
B
T
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

utekBR_3


Energy
Force
Force [N]
Time [ms]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
-2
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
P
S
B
T

utekBR_4