VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra
sklářských a keramických strojů

Školní rok: 1991/92

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Dana B e r n a t a

obor Stroje a zařízení pro chemický, potravinářský a spotřební průmysl

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Teplotní pole axiálně chlazené formy

Zásady pro vypracování

Formy na výrobu obalového skla na sklářských automatech budou i u nás perspektivně navrhovány s tzv. axiálním chlazením.

Úkolem Vaší DP bude:

1. Zhodnotit dosavadní poznatky k výpočtu axiálního chlazení provedené na KSK a provést potřebné úpravy výpočtu.
2. Upravený výpočet převést do programu v jazyce Turbo Pascal 6.0.
3. Seznámit se s programem metody výpočtu konečných prvků ADAM a provést zjednodušený výpočet tvaru formy s axiálním chlazením.
4. Aproximací výpočtu podle bodů 2) a 3) zadání upřesnit teplotní pole axiálně chlazené formy.

Podmínkou pro udělení KZ za zimní semestr je zpracování bodů 1., 2. a 3. zadání.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
STUDOVNA 8

KSK/SK

V 172/92S

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 - 50 stran textu

Seznam odborné litaratury:

/1/ VZ a DP vypracované na KSK

/2/ Manuál programu ADAM

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ivo Matoušek

Konzultant: Ing. Jan Cibulka, CSc., Ing. Pavel Jirman

Zadání diplomové práce: 31. 10. 1991

Termín odevzdání diplomové práce: 29. 5. 1992

Vedoucí katedry

Doc.Ing.Vladimír Klebsa,CSc.

Děkan

Prof.Ing.Jaroslav Exner,CSc.

V Liberci dne 31. 10. 1991

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ

Fakulta strojní

Obor 23 - 21 - 8

Stroje a zařízení pro chemický, potravinářský a spotřební průmysl

Zaměření

sklářské a keramické stroje

Název tématu

Tepelné pole axiálně chlazené formy

Dan Bernat

DP 198/92

Vedoucí práce : Ing. I. Matoušek, VŠST Liberec

Rozsah práce :	149
Počet stran :	45
Počet příloh a tabulek :	53
Počet obrázků :	51
Počet výkresů :	0
Počet modelů :	0

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI
3146076564

10. 5. 1992

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury

V Liberci dne 10. 5. 1992

Bernat

DAN BERNAT

1. SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU

Tps.....teplota povrchu dutiny / °C /

Tpv.....teplota povrchu kanálu / °C /

T.....teplota uvnitř stěny formy / °C /

Tfs.....fiktivní teplota na rozhraní sklo - forma / °C /

Tfv.....fiktivní teplota na rozhraní forma vzduch / °C /

Tpredehrevu ...teplota předehřevu formy / °C /

M.....koeficient stability pro prostup uvnitř formy / 1 /

N.....koeficient stability na okraji formy / 1 /

Ko.....opravný součinitel rozložení teplotních polí / 1 /

y.....délkový rozměr v axiálním směru / mm /

x.....délkový rozměr v radiálním směru / mm /

delx.....přírůstek v radiálním směru / mm /

dely.....přírůstek v axiálním směru / mm /

alfa.....úhel, který svírá element / ° /

alfa.....součinitel přestupu tepla / $Wm^{-2}K^{-1}$ /

qcs.....teplo, které předá sklovina / J /

qcv.....teplo, které odebere vzduch / J /

qis.....teplo předané sklovinou, vztažené na element plochy na rozhraní sklo - forma /W/

qiv.....teplo odebrané vzduchem vztažené na element plochy na rozhraní vzduch - forma /W/

Nu.....Nusseltovo číslo / 1/

Re.....Reynoldsovo číslo / 1 /

Pr.....Prandtlovo číslo / 1 /

d.....průměr chladicího vývrtu / mm /

ni.....kinematická viskozita vzduchu / $m^2 s^{-1}$ /

lambda.....tepelná vodivost / $Wm^{-1} K^{-1}$ /

a.....teplotní vodivost / $m^2 s^{-1}$ /

ro.....měrná hmotnost / $kg m^{-3}$ /

cp.....měrné teplo / $J kg^{-1} K^{-1}$ /

Es.....tepelná akumulační schopnost skloviny / $J m^{-2} K^{-1} s^{-0,5}$ /

Ef.....tepelná akumulační schopnost formy / $J m^{-2} K^{-1} s^{-0,5}$ /

m.....hmotnostní tok vzduchu / $kg s^{-1}$ /

V.....objemový tok vzduchu / m^3 s^{-1} /

w.....rychlost vzduchu / m s^{-1} /

S.....styčná plocha vývrtu / m^2 /

poči.....počet horizontálních řezů / 1 /

počj.....počet vertikálních řezů / 1 /

potv.....počet chladících otvorů / 1 /

g.....gravitační zrychlení / ms^{-2} /

počw.....vstupní rychlost vzduchu / ms^{-1}/

počtv.....vstupní teplota vzduchu / °C /

t.....teplota prostředí / °C /

OBSAH

STRANA

1. Seznam použitých značek a symbolů.....3
2. Úvod.....6
3. Způsoby chlazení.....8
3.1. Konvenční metody.....8
3.2. Nekonvenční metody.....10
3.3 Popis axiálního chlazení sklářské formy.....11
4. Analytické řešení.....13
4.1. Analytické řešení rovnice vedení tepla.....13
4.2. Jednosměrné vedení tepla.....17
4.3. Stacionární vedení tepla.....18
4.4. Nestacionární vedení tepla.....19
5. Přibližné řešení úloh vedení tepla.....20
5.1. Numerické řešení jednosměrného neustáleného vedení tepla..21
5.2. Určení okrajových podmínek.....25
6. Popis předchozích diplomový prací na KSK.....28
7. Zhodnocení předcházejících diplomových prací a převzetí vhodných poznatků a postřehů.....30
8. Postup výpočtu a vývojový diagram matematického modelu....34
8.1. Postup výpočtu.....34
8.2 vývoj.diagram matematického modelu axiálně chlazené formy.35
9. Spojení a doplnění metod konečných prvků a Pascalu.....37
9.1. Využití metody konečných prvků k upřesnění výpočtového modelu v jazyce Pascal.....37
9.2. Určení opravného koeficientu Ko.....39
9.3. Návrh počtu a umístění chladících otvorů.....40
10. Závěr a zhodnocení celé práce.....43
Seznam použité literatury.....45

Přílohy : Zdrojový text v jazyce TURBO PASCAL a Obrazová dokumentace pro graf. výstupy a Metodu konečných prvku.

2. Ú V O D

Efektivnost výroby a nadměrný hluk jsou aktuálními problémy sklářského průmyslu. Jelikož požadavky na množství skleněných obalů jsou značné , je nutné každoročně zkvalitňovat výrobu.

To znamená, že je třeba průběžně zvyšovat produktivitu sklářských automatů, která souvisí s dokonalostí chlazení sklářských forem.

Pro potřeby sklářského průmyslu z toho vyplývají požadavky na modernizaci a další vývoj sklářských forem a sklářských automatů.

Výroba obalového skla si vyžaduje značné energetické vstupy v podobě tepla, které je nutno vložit do skloviny při tavení a čeření. Po dobu samotného tvarování je naopak nutné teplo odvádět. Teplo se ze skla odvádí do přední, konečné a ústní formy Dnes se u všech strojů používá k chlazení sklářských forem vzduchu, který proudí k formám od ventilátoru frémou stroje přes pevné chladící komíny. U tohoto způsobu je však spotřebováno velké množství vzduchu, jelikož značná část vzduchu se neúčastní chlazení, vzniká zde vysoká hlučnost, která velmi zhoršují pracovní prostředí.

Proto se v dnešní době zavádějí v chlazení sklářských forem ekonomičtější zpusoby,konkrétně účinnější použití axiál. chlazení /verti - flow/. Při tomto způsobu proudí chladící vzduch svislými vývrty rozloženými ve stěně formy, čímž je dosaženo vyššího chladícího účinku, snížení hlučnosti a snížení objemu chladícího vzduchu asi o 70 procent oproti volnému ofukování z chladících hubic, což je dosud používaný neefektivní a energeticky náročný způsob chlazení, který v současném trendu o maximální úspory energie nelze připustit.

Ovšem je nutné se také zaobírat nepřehlédnutelným a velmi důležitým faktem, a to je rovnoměrné rozdělení skloviny po povrchu formy, což má za následek rovnoměrnou tloušťku skloviny po celém povrchu výrobku. Takto vyrobený výrobek má mnohem lepší vlastnosti a mnohem lepší vzhled.

Nejdůležitějším faktorem při výrobě obalového skla, vzhledem ke kvalitě výrobku,ovšem i nadále zustává udržení optimální teploty dutiny formy při výrobním cyklu.Tato teplota by měla být udržována okolo 520 C° .

Cílem této diplomové práce by mělo být navržení vstupních veličin, tak aby byla splněna výše uvedená podmínka.

Ke splnění tohoto cíle musí být použito moderní výpočetní techniky a vhodného matematického modelu , který by co nejpřesněji popsal reálný děj.

Tato diplomová práce je navázuje na diplomové práce z předcházejících let a vylepšuje je o možnost pracovat s moderní výpočetní technikou.

3. ZPŮSOBY CHLAZENÍ

3.1 Konvenční metody

Při tvarování obalového skla , které se provádí za vysokých teplot, dochází k značnému namáhání formy dotykem vyfukované skloviny o stěnu formy. Sklo je špatným tepelným vodičem, což má za následek, že převážná část tepla se převádí do formy.

Na teplotě formy záleží, jaký povrch vyfukovaný výrobek budeme mít. Jestliže teplota formy je nízká (tj. asi pod 480 stupňů Celsia), mají výrobky špatný povrch. Povrch se vyznačuje značnou drsností,výrobek přesně kopíruje povrch formy. Vzrůstá též nebezpečí vlasových trhlinek.

Při vysoké povrchové teplotě forem je povrch výrobku lesklý, trhlinky mizí, ale je zde nebezpečí, že forma bude lepit (teploty se pohybují u přední formy okolo 560 stupňů Celsia) .

Z uvedeného vyplývá, že k regulaci teploty forem je nutné formy účinným způsobem ochladit. Nejužívanější chladící média uplatňovaná pro chlazení forem jsou voda a vzduch. Dále se budu zabývat jen vzduchovým chlazením.

Dosavadní způsob chlazen je ofukování formy pomocí komínů. Chladící vzduch je veden od ventilátorů stojanem (rámem) stroje do chladícího komínu. Forma se pohybuje v nepřetržitém proudu chladícího vzduchu. Předností je jednoduchost, snadné seřízení chladícího procesu, operativnost a spolehlivost. Systém je však značně nehospodárný v důsledku vysoké spotřeby elektrické energie na zajištění pohonu ventilátorů. Nezanedbatelná je i vysoká hlučnost, která je způsobena prouděním chladícího vzduchu.

Snahy k odstranění vysoké energetické náročnosti a hlučnosti vedly k různým konstrukčním úpravám jak formy tak i přívodu vzduchu. Jedním možným způsobem je chlazení s přívodem vzduchu radiálním směrem. Chladící prostor je tvořen vsazeným pláštěm a chladící plocha se zvýší žebrováním formy. Žebra mohou být vytvořena jako odlitek nebo mohou být ve formě vsazena.

Jiné konstrukční provedení vychází z opačného směrování žeber. Chladící vzduch je zde výhodnější vést axiálním směrem.

Uvedené plášťové typy chlazení jsou výhodné z energetického i ekonomického hlediska. Nevýhodné je naopak zvýšení náročnosti výroby forem především díky žebrování. Zvětší se i obestavěný prostor díky plášti a novému způsobu přívodu vzduchu.

Pro tyto nevýhody se ve světě přešlo na dokonalejší a energeticky méně náročnější způsob chlazení sklářských forem to na způsob axiálního chlazení.

Tato metoda je účinnější a výhodnější pouze po dokonalém návrhu. Dále tuto metodu popisuji podrobněji v dalších kapitolách.

3.2 NEKONVENČNÍ METODY

Velice účinný a relativně velmi jednoduchý způsob chlazení navrhla firma HEYE . Princip jejího řešení spočívá ve vytvoření několika desítek kruhových kanálů v tělese formy.

Tyto kanály mohou mít po celé délce konstantní průřez nebo v úsecích, kde nepotřebujeme tak velký chladící účinek jsou osazené, čímž můžeme v tepelně exponovaných částech formy chladící účinek zvýšit.

Vzduch je veden od kompresoru šachtami k uzavíracímu ventilu, který uzavírá průchod vzduchu v závislosti na tom, jaké množství právě potřebujeme. Vzduch dále prochází suvnými trubkami ke vzduchové komoře a odtud do chladících vývrtů ve formě.

Pohyb přívodního systému při otvírání a zavírání formy je zajištěn dvojicí kloubů a suvným uložením přívodních trubek.

Výhodou je, že při přívodu nám vzduch nikde neuniká, ventilem je možno regulovat velice přesně dodávané množství, forma může být chlazena nepřetržitě, sníží se ztráty a hlučnost.

Nevýhodou je značná konstrukční náročnost především kloubů. Problematická je ochrana kloubu v desce stolu před nečistotami a roztavenou sklovinou.

V diplomové práci studenta Pažouta byl uveden způsob chlazení konečné formy pomocí suvných kolen. Po úpravě na přední formu se tento postup dá použít pro náš případ.

Vzduch je veden přes regulační ventil do kolena upevněného v otočné přírubě přes mezičlánek do rozvodové desky. Deska je upevněna na spodní straně formy, což umožňuje, že část vzduchu je využita pro chlazení ústní formy. Hlavní část chladícího vzduchu jde však do otvorů ve formě.

Výhodou je jak již bylo uvedeno, že máme možnost chladit velice účinně ústní formu. Přívod vzduchu je konstrukčně i technologicky jednodušší.

Nevýhoda spočívá ve značné exponovanosti suvné části obou kolen, kdy ochrana je nesnadná a díky charakteru přívodu jsou tlakové ztráty vlivem změny směru toku a změnou průřezu větší.

3.3 POPIS AXIÁLNÍHO CHLAZENÍ SKLÁŘSKÉ FORMY

Hlavní změna oproti konvenčním způsobům chlazení sklářské formy je axiální chlazení sklářských forem.Chlazení u tohoto typu je uskutečněno pomocí chladicích kanálů , které jsou axiálně vrtány v těle formy a to buď v jedné nebo více řadách.

Kanály mohou mít po celé délce proměnlivý průřez , který v úsecích , kde nepotřebujeme tak velký chladící účinek můžeme osadit, čímž můžeme v tepelně exponovaných částech účinek měnit.

V mé diplomové práci se budu zabývat pouze kanály bez osazení, protože počítat s osazením by značně rozšířilo již tak široké téma a časově bych jej nezvládl.

Nízkotlaký vzduch je veden kanálem do chladicího mechanismu vyfukovací formy a je nucen procházet axiálními otvory vyvrtanými do konečné formy. Chlazení je prováděno v přední formě při otevření i uzavření formy.

V konečné formě je chlazení v provozu pouze v době pobytu láhve ve formě.V době kdy láhev je mimo konečnou formu k chlazení nedochází.Dále pouze pro upřesnění.

V přední formě je vzduch veden od tlakového zdroje šachtami k uzavíracímu ventilu, který uzavírá průchod v závislosti na tom jaké množství právě potřebujeme. Vzduch dále prochází suvnými trubkami k vzduchové komoře a odtud do axiálního chladicích vývrtů ve formě.Kde chladící vzduch,který prochází v axiálně vrtaném chladicím otvoru , odebírá teplo z těla formy .Vzduch proudí nepřetržitě po celou dobu cyklu, tj okolo 8 vteřin.

V uvedeném provedení soustavy forem přechází vzduch na vstup jednotlivých chladicích průchodů s přibližně stejným tlakem, který je pro konečnou formu zajištěn přetlakovou komorou a pro přední formou regulován ventilem. Přímá dráha proudění chladicího vzduchu snižuje na minimum nerovnoměrnost proudění v chladicích vývrtech. Zásluhou toho lze předpovídat chladící účinek jednotlivých kanálů a rozložení teplotních polí kolem kanálu, může být použito při výpočtu.

Rozmístění kanálů v boční části formy nebudu předpokládat těsně vedle sebe, i když se tak nevyhnu problémům prostupu tepla mezi kanály.

Budu též předpokládat, že odeberu vzduchem téměř všechno teplo.

Pro doplnění bych rád uvedl ještě jeden zpusob přívodu vzduchu do rozvodného krytu a to pomocí pancéřové trubky.

Pancéřová trubky má tu vlastnost, že ji můžeme v určitém délkovém rozsahu prodlužovat a zkracovat.

Trubky jsou kromě namáhání při prodlužování a zkracování ,ještě na kroutící moment mezi oběma komíny.

Otázkou zůstává, jaká by byla životnost při značném množství cyklů, které u sklářských automatů existují. Nutno poukázat na to, že články jsou do sebe suvně spojeny a suvné spojení kombinováno s pryží,což samo o sobě nemůže zajistit dlouhou a bezchybnou práci v extrémních podmínkách při výrobě obalového skla.

4 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

4.1 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA

Sdílení tepla je děj, při kterém dochází k přestupu tepelné energie z jednoho místa systému na místo jiné. Pokud má k tomuto přenosu docházet bez přívodu vnější práce, musí být v systému rozdílné teploty. V předchozí kapitole jsem definoval pojem kontinual. Při úvahách v této části práce budu uvažovat kontinuum, které je v klidu vůči námi zvolené souřadné soustavě. Pokud je uvažováno prostředí v podobě tuhé fáze, případně nepohybující se tekutiny, uplatňuje se pouze mechanismus označovaný jako vedení tepla. Při popisu tohoto děje je výhodné vycházet z teplot v jednotlivých časových okamžicích v různých místech systému nebo - li ve smyslu definice pole fyzikální veličiny z pole teplot

$$t = f(x_1, x_2, x_3, \quad)$$

kde toto pole je popsáno obecně ve všech třech směrech a je doplněno 4 - tým rozměrem a to reálným časem, který hraje velmi důležitou roli hlavně při popisu nestacionárně orientovaného děje.

V takto určeném skalárním poli teplot lze definovat izotermické plochy (čtvercové nebo obdélníkové, dle požadavků stability systému). Tyto izotermické plochy musí být ve funkční závislosti na počtu horizontálních a vertikálních rovin. Toto rozdělení je velmi důležité vzhledem k zachování stability celého systému. Tyto izotermické plochy, v jejichž plochách je stejná hodnota teploty v daném časovém okamžiku, popisují a vizuálně znázorňují skokový přestup tepla danou látkou.

Přiřadíme - li libovolné ploše pole vektor, jehož směr je kolmý na izotermickou plochu a velikost odpovídá změně teploty na jednotkové délce, pak tento vektor označený jako gradient teploty grad t udává směr nejstrmějšího vzrůstu teploty.

Množství tepla sdíleného vedením závisí na hodnotě gradientu teploty. Na základě empirických poznatků byla pro izotropní prostředí definována závislost hustoty tepelného toku q na tomto vektoru v podobě tzv. Fourierova empirického zákona pro vedení tepla ve tvaru :

$$q = - \text{lambda} \cdot \text{grad } t \quad ,$$

kde lambda je součinitel tepelné vodivosti, zkráceně tepelná vodivost

a hustota tepelného toku ,která je definována rovnicí :

$$dQ = q \cdot ds$$

Na základě těchto představ o obecné bilanční rovnici lze odvodit základní diferenciální rovnici pro vedení tepla zvanou také rovnicí Fourierovou. Musí být ovšem splněny následující podmínky:

1...Prostředí, kterým se teplo šíří, musí být izotropní

2...V prostředí, kterým se teplo šíří nesmí nastat proudění

3...Platí Fourierův zákon vedení tepla

4...Tepelná vodivost , měrná hmotnost a měrné teplo q nejsou závislé na čase, teplotě a tlaku

5...zdrojový člen v bilanci je nulový

6...v systému nedochází ke změně fáze.

Bilancováním pak dostaneme parciální diferenciální rovnici :

$$\partial t / \partial tau = a \cdot (grad\ t)^2$$

a.....je teplotní vodivost definovaná níže uvedeným vztahem a je závislá pouze na teplotě prostředí v kterém se teplo šíří.

$$a = lambda / (ro \cdot cp)$$

Integrací rovnic, které vyplývají z výše uvedených rovnic a po provedení úprav odpovídajících konkrétnímu zadání úlohy (např. ustálený nebo neustálený rovinný děj) získáme tzv. profil teploty či teplotní profil, což je funkce typu:

$$t = (x1, x2, x3, tau)$$

kde na základě znalosti teplotního profilu lze pak najít i hustotu tepelného toku ze vztahu

$$q = - \quad grad\ t$$

K nalezení konkrétního teplotního profilu je ovšem nezbytné aplikovat okrajové a počáteční podmínky, o kterých se zmíním podrobněji v následujících bodech.

Okrajové podmínky řadíme zpravidla do čtyř skupin. Hovoříme o podmínkách 1., 2., 3. a 4. druhu, jež jsou vymezeny takto:

<u>Podmínka 1. druhu:</u> je známo rozdělení pole teplot na povrchu tělesa $t_w = f(x_1, x_2, x_3,)$
V mém případě prezentováno předehřevem formy.

<u>Podmínka 2. druhu:</u> je známo rozdělení hustoty tepelného toku na povrchu tělesa $q_w = f(x_1, x_2, x_3,)$

<u>Podmínka 3. druhu:</u> jsou dány rozdělené teploty v okolí povrchu tělesa , tepelné vodivosti v tělese a součinitel přestupu tepla z okolního prostředí do tělesa, tedy:

théta = f (x1 ,x2 ,x3 ,tau)
lambda = f (x1 ,x2 ,x3 ,tau)
alfa = f (x1 ,x2 ,x3 ,tau)

V každém místě povrchu tedy lze upravit vztah,

$$-\text{lambda} \cdot (\partial t / \partial N) \cdot w = \text{alfa} \cdot (t_w - \text{théta})$$

který vyjadřuje identitu tepelného toku vedením z povrchu nehybného prostředí a tepelného toku prouděním z povrchu. Proměnná n zde označuje vzdálenost ve směru vektoru hustoty tepelného toku

<u>Podmínka 4. druhu:</u> Mluvíme o ní tehdy, jestliže v daném okamžiku dochází ke styku dvou těles A a B tak dokonalému, že teplota obou povrchů je stejná a jsou dány fyzikální vlastnosti obou těles tedy

$$t_a (x_1, x_2, x_3,) = t_b (x_1, x_2, x_3,)$$

a je splněna rovnost tepelných toků.

Fourierova diferenciální rovnice pro vedení tepla je lineární parciální diferenciální rovnice 2. řádu. Tyto rovnice mají nekonečně mnoho partikulárních řešení, nalezení obecného řešení není prakticky možné. Jednotlivá řešení vyhovují konkrétním okrajovým a počátečním podmínkám a je nutno zkoumat, zda ten který typ řešení daným podmínkám vyhovuje. Úvodem bych se rád zabýval nejjednodušším dějem a to prostupem tepla v jednom směru. Vzhledem k možnostem současného počítačového vybavení na KSK, bych jiný než tento postup volit nemohl. Výpočty tohoto druhu jsou velice náročné na kapacitu počítače a na rychlost výpočtu. Proto jsem nemohl použít přesnější metody výpočtu, který by přesněji vyjádřil chování a průběh děje. Tohoto nedostatku je možno si všimnout při animaci prostupu teploty stěnou formy, kde tepelné pole v jednotlivých horizontálních rovinách neovlivňuje tepelné pole v horizontálních rovinách sousedících. Dochází k ostrému ohraničení tepelných polí na hranicích horizontálních vrstev.

4.2 JEDNOSMĚRNÉ VEDENÍ TEPLA

O jednosměrném vedení tepla se dá hovořit, můžeme - li se ve svých úvahách omezit na změnu teploty pouze ve směru jedné souřadné osy. To znamená, že tepelné pole se ovlivňuje ve směru šíření tepla. V mém případě je tento směr definovaný od středu formy kolmo axiálně vedeným kanálem. Při takto pojatém způsobu abstrakce nejsem schopen sledovat ovlivňování jednotlivých horizontálních řezů, což by bylo zajímavé a ukázka ve formě animovaného prostupu tepla stěnou kanálu by byla blíže realitě.

Metoda jednosměrného vedení tepla byla uzpůsobena pro prostup tepla rovinným útvarem. Ve své diplomové práci řeším prostup tepla válcovým útvarem, a tak jsem musel výsledky korigovat.

Korekce výsledků spočívá v zavedení opravného součinitele Ks. Tento součinitel vychází z předpokladu, který je vyjádřen ve tvaru:

$$Ks = Sz / Sp = < 1$$

Sz.....plocha přestupu tepla na rozhraní sklo - forma

Sp.....plocha přestupu tepla mezi jednotlivými vertikálními díly horizontální roviny.

Tímto součinitelem jsem musel násobit spočítaný rozdíl teplot stěny, aby byla zachovana podmínka rovnosti množství šířeného tepla.

Popis pole teplot se pak redukuje na vztah:

$$t = f(x_i, tau)$$

a dále mohu popsat změny teploty na čase

$$\partial t / \partial tau = a \cdot (\partial t)^2 / (\partial x_i)^2$$

neboť po derivaci teploty ve zbývajících směrech získám nulové hodnoty.

Jednosměrné vedení tepla mohu rozdělit do dvou hlavních částí na stacionární a nestacionární.

4.3 STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA

Tento děj je možné prezentovat ve tvaru, který vznikl za předpokladu

$$d^2t / d^2x = 0$$

Výsledný vztah mohu uvést ve tvaru:

$$Q = alfa \cdot S \cdot (T2 - T1)$$

Tento vztah vyjadřuje teplo , které projde za jednotku času.

Kde

S.....plocha , plocha kolmá na směr šíření tepla.

alfa..součinitel přestupu tepla , závislý na podmínkách při kterých k přestupu dochází a na prostředí šíření tepla.

T2....Teplota tělesa z kterého se bude teplo odvádět.

T1....Teplota tělesa do kterého se bude teplo přivádět.

Dále se tímto úsekem nebudu zabývat, protože jsem použil pro matematický model nestacionárni sdílení tepla ve sklářské formě. a Předchozí práce na KSK byly řešeny za předpokladu stacionárního vedení tepla. Pokusil jsem se problém převést do podoby, která lépe simuluje reálný průběh. Avšak ani moje řešení se plně nepřibližuje skutečné situaci.

4.4 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA.

Popsat tento děj bude již obtížnější a složitější a to z důvodu, že nemohu použít výše uvedeného vztahu, který byl roven nule.

Lineární povaha rovnice (1) má za následek, že z daného řešení (či z daných řešení) získáme lineární operací další řešení

Pokud tedy $t_1 = f(x_1, tau)$

$t_2 = f(x_2, tau)$

jsou některá řešení lineární fce těchto fcí tj.

$t(x, tau) = ko + k1 \cdot t1(x, tau) + k2 \cdot t2(x, tau)$

kde k_0, k_1, k_2....jsou konstanty

Počet řešení vystupujících v lineární kombinaci může být i větší. Obecně dokonce platí:

$t(x, tau) = ko + k1 \cdot t1(x, tau) + k2 \cdot t2(x, tau) + kn \cdot tn(x, tau)$

pokud ovšem tato řada konverguje.

Po tomto stručném úvodu bych mohl přistoupit k popisu numerického řešení výše uvedených dějů.

Tyto metody budou podrobně popsány v kapitole " Přibližné řešení úloh z vedení tepla".

Kde v těchto kapitolách budu podrobně popisovat tvorbu a postupného sestavení matematického modelu , který je dále zpracován v jazyku Pascal .Výsledky ověřil a opravil v Metodě konečných prvků . Matematický model byl převzat z odborné literatury a poopravil jsem ho , abych mohl tuto metodu aplikovat pro přestup tepla v tělese válcového tvaru.Tato úprava byla již uvedena a popsána v kapitole 4.2. Kde je prezentována tvorba a použití opravného koeficientu.

5. PŘIBLIŽNÉ ŘEŠENÍ ÚLOH Z VEDENÍ TEPLA

Matematická formulace problému vede často k obyčejným či parciálním diferenciálním rovnicím. Některé případy, kdy je možno užít analytického řešení takových rovnic, které byly ukázány v předchozí kapitole.

Mnohdy je však analytické řešení obtížné nebo dokonce nemožné. Potom přicházejí v úvahu řešení přibližná, a to numerická nebo grafická. Tyto výpočetní metody jsou založeny na převedení diferenciálních rovnic do formy diferenční, kdy diferenciály jsou nahrazeny konečnými diferencemi.

Je patrné, jaký význam v souvislosti uplatnění numerických metod nabývají samočinné počítací stroje. I když však takovými stroji disponujeme stále více, budou se i nadále uplatňovat přibližné metody, jež počítače nevyžadují, např. pro předběžné úvahy.

Z metod založených na konečných diferencích budou uvedeny: numerická relaxační metoda pro stacionární vedení tepla, jednoduchá numerická metoda a grafická Schmidtova metoda pro nestacionární vedení tepla. Tyto postupy jsou elementární a názorné.

Přesto lze jimi dospět k užitečným výsledkům při řešení mnoha běžných úkolů technické praxe, a to obvykle velmi rychle a aniž je třeba vynakládat neúnosné úsilí.

Uvedené výpočtové postupy jsou vhodné k řešení velkého počtu problémů formulovaných rovnicemi různých druhů (algebraických, diferenciálních, integrálních) z různých oblastí fyziky a techniky. Já je uplatním při řešení úkolů týkajících se úkolů vedení tepla.

Z těchto metod jsem zvolil pro mě přijatelnou metodu numerického řešení jednosměrného neustáleného vedení tepla. Pokusím se tuto metodu stručně popsat.

5.1 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ JEDNOSMĚRNÉHO NEUSTÁLENÉHO VEDENÍ TEPLA

Při neustáleném vedení tepla bývá zadáno teplotní pole v počátečním okamžiku (počáteční podmínky).

Úkolem a cílem tohoto matematického modelu je určení závislosti

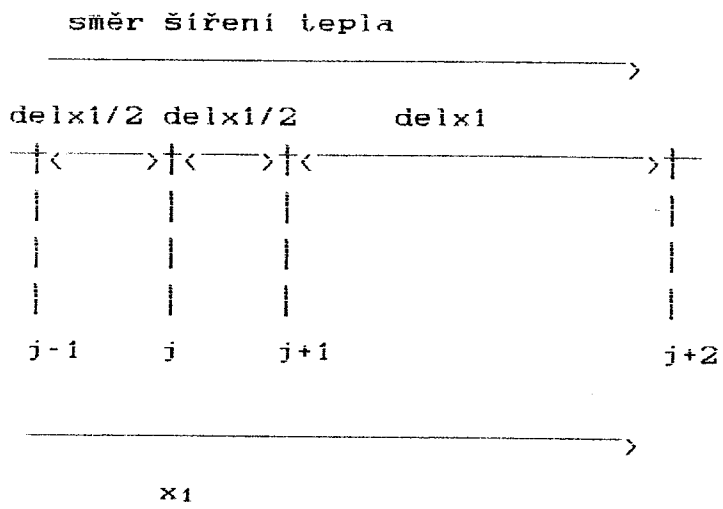
$$t = f(x_1, x_2, x_3, tau)$$

V případě jednosměrného vedení tepla orientuji těleso v pravoúhlých souřadnicích tak, že změna teploty nastává pouze ve směru osy x_1. Pak je úlohou matematického modelu určení teplotního rozdělení v následujícím tvaru:

$$t = f(x_1, tau)$$

Roviny rovnoběžné s rovinou (x_2, x_3) jsou při této orientaci izotermické. Pro numerické řešení metodou konečných rozdílů vedeme orientovaným tělesem myšlené řezy rovnoběžné s rovinou (x_2, x_3) a vzdálené navzájem o krok . Zanimovaná část programu se měří jakoby skokově, což se dá odstranit zvětšením počtu rovin (x_2, x_3). Pro numerické řešení metodou konečných rozdílů je nutnost rozdělení největším problémem. Problém spočívá hlavně ve velkém datovém segmentu, který se velmi těžko uskladňuje do paměti a práce s těmito datovými segmenty je náročná.

Myšlené řezy rovnoběžné s rovinou (x_2, x_3) a vzdálené vzájemně o krok x_1 jsou, jak je výše uvedeno, izotermické roviny, které se promítají do nákresné roviny (x_1, x_2) jako rovnoběžky viz obr.



Jednotlivé izotermické roviny označíme pořadovými čísly j, kde index j = 0.....poc j, kde rovina s indexem 0 je o $x_1/2$ pod povrchem dutiny formy a rovina s indexem poc j se nachází o $x_1/2$ pod povrchem kanálu. Tok tepla probíhá ve směru osy x_1.

Vzhledem k neustálenosti děje se teploty v jednotlivých izotermických rovinách s časem mění. Představme si, že čas neplyne nepřetržitě, ale skokově po intervalu .Pořadí časového intervalu budeme označovat k . Hodnota k jako index bude nabývat hodnot od 0 až do hodnoty , která vyjadřuje celkový čas děje. Hodnotu mohu vyjádřit

k = tau / deltau

tau..... čas celého cyklu.
deltau.. čas krok.

V následující části bych se chtěl věnovat zvláště hodnotě deltau .

Tuto hodnotu získám po zadání počátečních podmínek a to přesněji

deltau = dely / wpoc

dely.....vzdálenost rovin, které jsou kolmé k rovinám (x_2, x_3) nebo také vzdálenost mezi horizontálními rovinami. Toto rozdělení je důležité pro následný správný výpočet. Na správném rozdělení a na počtu rovin (x_2, x_3) a na počtu rovin na ně kolmých přímo závisí stabilita systému.

Wpoc.....je to rychlost vstupujícího chladícího vzduchu.Po konzultaci a po prostudování předchozích prací jsem volil hodnotu 20 m/s. Tato hodnota je optimální vzhledem k ekonomickým i technickým možnostem. Index značí počáteční hodnotu, protože v době průchodu chladícího vzduchového elementu kanálem rychlost pochopitelně mění zvětšováním objemu vzduchu. Pro svůj výpočet předpokládám, izobarický děj. Tento předpoklad není zcela přesný, ale ve svém výpočtu nejsem schopný uvažovat ani tento, ani jiný např. aspekt např. tření.

Chladící vzduch proudí fiktivní rovinou t_f, která je vzdálená o $x_1/2$ od povrchu chladícího kanálu.

deltau...časový okamžik, po kterém se skokově mění čas. Tato časová fikce je uskutečněná po době, kdy vzduchový element projde celým chladícím kanálem. Dojde k posuvu všech vzduchových elementů naskládaných na sebe o dely ve směru proudění vzduchu.

k.....časový krok, který vyjadřuje v kterém časovém skoku se děj právě nachází. Rozdělení času do určitých kroků je pro následující výpočet nezbytné.

Pro další postup předpokládáme:

1. Fyzikální vlastnosti tělesa ,lambda ,ro,a jsou nezávislé na místě teplotě a čase

2. Zdroj tepla v tělese je nulový.

3. Vzdálenost x_1 je tak malá, že lze předpokládat lineární průběh teplot ve směru x_1 mezi jednotlivými po sobě jdoucími izotermickými rovinami.

4. Časový interval je tak krátký, že se během něj velmi málo změní původní hodnoty gradientů teplot v okolí j - té roviny.

Za těchto předpokladů můžeme v diferenciální rovnice popisující neustálené jednosměrné vedení tepla nahradit diferenciální přírůstky konečnými diferencemi. Při uplatnění zavedeného značení obdržíme pro j - tou rovinu vztah pro výpočet teploty v následujícím kroku.

Součinitel teplotní vodivosti a je dán vzorcem

a = lambda / (ro . cp)

Z upravené diferenciální rovnice obdržíme vzorec pro výpočet teploty $t_{j,k+1}$, tj. teploty v j - té rovině po uplynutí časového intervalu (k + 1), na základě teplot po předchozím (k - tém) časovém intervalu.

Aby byl tento výraz spočitatelný, musím znát tepelné rozdělení z předcházejícího časového kroku. Pro zahájení výpočtu je nutné také předpokládat rovnoměrné teplotní rozdělení. To je v praxi sice možné předehřevem formy, ale velmi problematické díky dlouhému předehřívání formy. Nedovoluji si zároveň tvrdit, že i při dlouhém předehřívání formy bude teplotní pole homogenní.

Dalším problémem tohoto vztahu je stabilita celé soustavy, která je zajištěna tím, že součinitel teplotní vodivosti bude udržen v pevně daných mezích. Pro přehlednost označím teplotní součinitel M. Stabilita celého systému je zaručena tím, že M nebude větší než 2. Podmínka stability systému je důležitá pro výše popsané síťové rozdělení (návrh sítě je postaven ne právě této podmínce, z podmínky vyplývá počet horizontálních a vertikálních řezů). Rozdělení a rozvržení výpočetní sítě je podrobně popsáno v přiloženém zdrojovém textu.

Ve stabilním systému jsou zaručeny rovnoměrné přírůstky teploty.

Dalším problémem je určení počtu časových kroků, kterými je rozdělen celý takt pobytu skla ve formě. Zde je největší úskalí celé práce, protože optimální počet kroků je značný. Výpočet probíhá i s použitím počítače řádově několik hodin, a získané výsledky jsou nepřehledné, právě pro jejich množství a těžko se porovnávají, proto jsem volil grafické výstupy, kde se výsledky snáze porovnávají.

Použití vztahu je zřejmé. Ze známého počátečního rozdělení teplot získávám postupně rozdělení teplot pro jednotlivé časové intervaly. Pokud by se okrajové teploty silně neměnily, mohl bych bez doplnění použít výše uvedený postup. V mém případě však dochází ke skokové změně teploty na okrajích formy, proto musím použít okrajové podmínky, abych výpočtový matematický model doplnil.

Součinitel teplotní vodivosti a je funkcí:

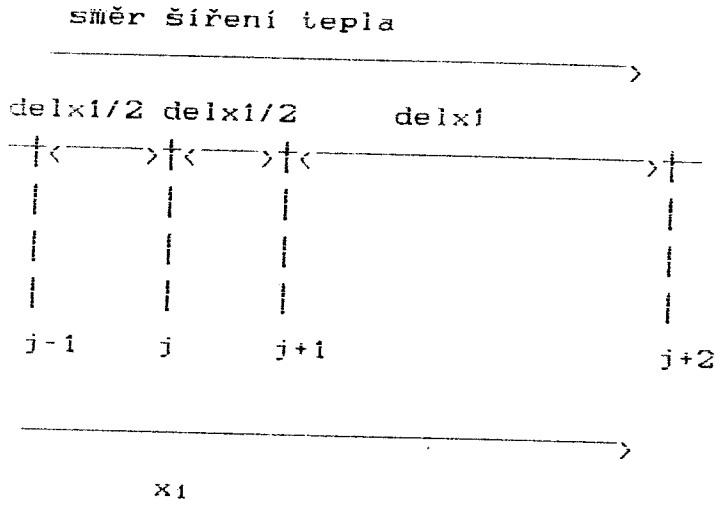
- tepelné vodivosti materiálu formy
- měrného tepla materiálu formy
- měrné hustoty materiálu formy.

Z toho vyplývá, že součinitel tepelné vodivosti je závislý pouze na teplotě formy v jednotlivých horizontálních a vertikálních řezech.

5.2 URČENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Okrajové podmínky musí být určeny vzhledem k velkým změnám teplot na přestupných hranicích. Dalším důvodem, proč musím metodu výpočtu doplnit o okrajové podmínky je, že při známých hodnotách měrného tepelného toku skloviny, předpokládané teploty skloviny, a tepelné vodivosti formy bych nebyl schopen určit teplotu na okrajích formy.

Uvažujeme - li platnost okrajové podmínky vycházíme ze schématu podle obr. 3 - 5. První j - tá rovina je vzdálenena od povrchové roviny označené 0 o délkový interval delx/2. Rozložení dalších izotermických řezů je dáno krokem o délce delx. Povrchová rovina je ve vzdálenosti delx od zvolené pomocné vnější (fiktivní) roviny F. Tato fiktivní roviny simuluje chování předpokládaného prostředí na daném rozhraní (skla, vzduchu).



obr 3.5

Myslím, že by bylo na místě poznamenat právě v tomto okamžiku, že vše co popisuji, platí pouze pro jeden horizontální pás. Počet těchto horizontálních pásů mi vychází z podmínky stability pro prostup tepla stěnou formy. Počet vertikálních dílů vyjde z výše popsané okrajové podmínky.

Stejně jako v případě ustáleného vedení tepla si představujeme prostor vně povrchové roviny zaplněný hmotou týchž termických vlastností jako má těleso. Nahradíme myšlený konvektivní průtok tepla z roviny F do roviny 0 konduktivním průtokem, avšak při fiktivní teplotě $t_{F,k}$ namísto skutečné teploty okolí a dostaneme vztah

$$t_{Fk} = alfa/lambda \cdot delx \cdot (théta - t_{0,k}) / 2 + t_{0,k}$$

Odtud dále vyplývá vztah pro určení teploty $t_{F,k}$. Jak je vidět z rovnice bude fiktivní teplota v pomocné rovině obecně fcí času. Bezrozměrný výraz v rovnice označíme

N = alfa / lambda . delxi

a právě z tohoto bezrozměrného výrazu určíme počet dílů ve vertikálním dělení. Tento výraz ovlivňuje velmi výrazně vývoj teplot na obou stranách formy.

Pro změnu teploty v blízkosti povrchu musí platit rovnice výše uvedené, pokud uvažuji pomocnou rovinu F (fiktivní rovina), jako náhradu za předpokládané prostředí.

Vzhledem k předpokladu lineárního průběhu mezi dvěma izotermickými rovinami vzdálenými o úsek delx a vzhledem k výše popsaným rovnicím musí ještě platí:

$$t_{0,k} = (N.téta + 2.t_{j,k+1})/ (N +2)$$

Aby byla zajištěna stabilita řešení musí být splněna ještě podmínka

$$N < 2.$$

Tato podmínka, spolu s podmínkou M>2 je po celý výpočet striktně dodržována to přizpůsobováním počtu vertikálních a horizontálních rovin, v každém časovém kroku a v závislosti na tvaru dutiny. Dutina nemá samozřejmě tvar válce, ale tvar, který jsem převzal z výrobních výkresů.

Nakonec bych rád přidal popis rozdělení sítě ve stěně modelu. Musím vyjít ze dvou známých podmínek stability systému:

$$N<2;$$

$$M>= 2$$

kde:

N = alfa / lambda . delxi

$$M = delxi^2 / (a . deltau)$$

Horizontální izotermické roviny jsou široké dely.
Vertikální izotermické roviny jsou široké delx

Časový krok po kterém se imaginární čas odvíjí, je určen z předpokladu , kde Wpoc je vstupující rychlost vzduchu, kterou jsem volil dle předcházejících diplomových prací 20 m/s.

Po složení všech podmínek dohromady dostávám nerovnici:

$$delxi^2 / (a . deltau) >= 2 > alfa / lambda . delxi$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti plně závislý na teplotě hmoty formy.

Základem řešení nerovnice je dostat hodnoty deltau , delxi a z hodnoty deltau pak při znalosti Wpoc určit dely .

Výraz na levé straně musí být pro výpočet brán ve své maximální hodnotě, která může během výpočtu nastat Oproti tomu na pravé straně uvažujeme hodnotu minimální, která může během výpočtu nastat.

Pro splnění podmínky levé strany dosadím součinitel tepelné vodivosti co nejmenší. To se splní jestliže do funkčních závislostí dosadím teplotu předehřevu.

Do pravé strany dosadím hodnoty = 20 000 (hodnota je určena dle literatury).

Na základě těchto úvah mohu z pravé části vyjádřit:

$$delxi <= 2 . lambda / alfa$$

Pak z levé části dopočítám delx . Z delx vyplyne hodnota dely.

Ze znalosti těchto veličin mohu získat síťové rozložení stěny formy, která se podle tvaru dutiny upravuje z důvodu zajištění stability systému.

Zajištění stability systému je věc nesmírně důležitá a nutná pro další správný výpočet.Stačí aby byla stabilita porušena pouze jednou a celý výpočet se dostane do nedefinovatelných hodnot. (např teplota formy se z 500 C dostane do záporný hodnot)

V programu je tomuto nutno předcházeno dopočítaváním rozloženi sítě v každém kroku , aby byly splněny podmínky stability.

6. POPIS PŘEDCHOZÍCH DIPLOMOVÝCH PRACÍ NA KSK

Na katedře sklářských a keramických stroju byly již dříve řešeny diplomové práce na podobné téma. Čerpal jsem z diplomových prací z let 1989-1991. V následujícím popisu se budu zabývat popisem diplomové práce z roku 1991 od P. Martinu.

Celý vypočet byl řešen odtržitě od skutečného děje, protože nebyl uvažován čas faktor.

Vycházelo se z rozdělení homogeního a to po celém kanálu, který byl rozložen na elementy o tloušce 1mm. Nebyl uvažován přístup tepla během pracovního cyklu. Celý výpočet byl realizován pouze na jednom elementu.

Pro zjištění množství tepla, které je nutné odvést, bylo použito kalorimetrické rovnice a z ní určení množství předaného tepla ze skloviny do formy. Množství převedeného tepla za skloviny do formy a další tepelný prostup do chladícího vzduchu kanálů nebo do držáků formy v neposlední řadě konvencí do okolního vzduchu, bylo procentuálně vyjádřeno ze známých a snadno zjistitelných veličin a to hmotnosti láhve, středního měrného tepla skloviny a z rozdílů teploty kapky a láhve na odstávce za předpokladu q = konstanta. Teplota kapky byla vzata v rozmezí 1050 - 1170 stupňů Celsia a teplota láhve 800 stupňů Celsia. Vypočítané celkové odvedené teplo bylo získáno z kalorimetrické rovnice

$$Q_c = c_{ps} \cdot m \cdot (t_h - t_d)$$

kde takto vypočítané teplo se rozdělí podle procentuálního klíče na přední a zadní formu. Celkové množství tepla se dělí v poměru 44 : 56 pro přední a konečnou formu. Dále se bere do úvahy skutečnost, že asi 30 % z celkového množství tepla se předá do okolního vzduchu volnou konvencí držákem a čelistmi formy.

Dále se bere v úvahu 6% ztrát, které vznikají při skluzu kapky do formy.

V dalším výpočtovém kroku je počítán tepelný tok ze skloviny do stěny formy. K jeho určení byla vzata v úvahu doba chlazení Tauch, která byla určena z celkové doby trvání taktu Tauo a opět procentuální rozdělení 56 : 44 doby chlazení. Doba chlazení Tauch= 0,56. Tauo . Tato skutečnost je podepřena výzkumnými pracemi a odbornou literaturou.

V další fázi výpočtu u předchozí DP je počítán průměrný tepelný

tok, kde je brán v úvahu prostup tepla bez braní zřetele na nestacionární přestup a časový faktor.

V dalším kroku jsou do děje započítávány teploty skloviny ve formě kapky a teplota láhve na odstávce, které se dají změřit. Z těchto hodnot jsou počítány okrajové podmínky pro výpočet přední a okrajové formy. Teploty skloviny v přechodu mezi oběma formami jsou vypočítány z předešlého procentuálního rozdělení celkového množství tepla. Problematické chování na rozhraní sklo-forma je vynecháno.

Tvar dutiny, který se předpokládá stejně široký po celé délce (tvar válce) a nebere se v úvahu různá šířka stěny v jednotlivých horizontálních rovinách, při pevně daném tvaru dutiny formy.

Další kapitola se týkala tepelných vlastností vzduchu. Z ní jsem čerpal mnoho poznatků, které jsem využil pro programové zpracování funkčních závislostí. Všechny potřebné závislosti jsou jsou vesměs zpracovány do lineárních závislostí, které velmi dobře vystihují naměřené a v literatuře vyhledané hodnoty. Touto kapitolou se budu zabývat dále podrobněji a je zbytečné se o ní zde podrobně rozepisovat.

V předchozí diplomové práci jsou graficky vyjádřeny funkční závislosti tepelné vlastnosti skloviny a tepelně akumulační vlastnosti skloviny Es.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla bylo použito vztahu z odborné literatury[Smrček]. Další postřeh, který byl uvažován je korekční součinitel epsilon závislý délku kanálu. Tento opravný součinitel je dán funkční závislostí na délce kanálu ve formě kružnice.

7. HODNOCENÍ PŘEDCHOZÍCH DIPLOMOVÝCH PRACÍ A PŘEVZETÍ VHODNÝCH POZNATKŮ A POSTŘEHŮ.

Jedním z podkladů pro získání informací o nestacionárním přestupu tepla v sklářské formě s axiálním chlazením byly diplomové práce z let 1988 - 1991. Tyto práce se ovšem zabývaly pouze kalorim.vypočtem odved.tepla,proto jsem z těchto prací čerpal pouze základní informace.

Ze vztahů uvedených v těchto pracech jsem použil pouze princip výpočtu tepelného toku v jednotlivých horizontálních řezech a výpočtu termofyzikálních parametru materialu sklařské formy a chlad. vzduchu, z kterých pak dále počítána teplota chladicího vzduchu, teplota stěny chladicího kanálu a dalších parametrů chladicího média.

V tomto bodu se musím zmínit o změně algoritmu výpočtu odvedeného tepla chladicími kanály. V předchozích pracích byl výpočet chybně pojat, protože pro výpočet odvedeného tepla se bralo v úvahu teplota stěny z předešlého horizontálního řezu a teplota vzduchu z příslušného řezu.Z těchto parametru se určilo odvedené teplo, ovšem bez braní zřetele na čas. Z odebraného tepla se spočítala teprve teplota stěny kanálu.

Tento chybný postup se projevil v klesající tendenci teploty povrchu chladicího kanálu [teplota klesala od vstupu vzduchu k výstupu z chladicího kanálu].

Má oprava spočívala ve výpočtu odebraného tepla z teploty vzduchu chladicího kanálu a teploty stěny chladicího kanálu v stejném horizontálním řezu.Touto opravou jsem odboural nežádoucí průběh teploty stěny chladicího kanálu,která mi vyšla ve specifickém tvaru se vzrůstající tendencí.Což je velmi pravděpodobné i když toto tvrzení nemohu opřít o laboratorní nebo o jiná měření.

V této části bych rád popsal postup řešení předchozích prací, jak jsem je pochopil a vhodné údaje použil. Pro zjištění množství odebraného tepla byl vzat tento předpoklad: potřebné odvedené teplo

Q = cp. m. (tkapky - tlahve na odstavce) .

Bez uvažování časové závislosti celého chladicího cyklu.

Hlavní nedostatky postupu z předchozích diplom. prací:

- V praxi dochází k nestacionárnímu ději,který je zde vyloučen.
- problematické sdílení tepla v kanále nelze řešit odtržitě od pruběhu teplotních polí ve sklářské formě.

- teplota láhve na odstávce by měla vyplynout z výpočtu, ne ze zadání a regulace. I když tento úkol se mi nepodařilo splnit.

K prvnímu bodu bych chtěl dodat, že problém se nestacionárním řešením jsem se zabýval sám a došel jsem k přijatelným výsledkům.

Hodnoty teploty láhve na odstávce, by měly být směrodatné pro návrh všech veličin, které ovlivňují výrobu láhve.

Celá práce je založena na výše uvedeném způsobu výpočtu celkového tepla nutného k odebrání ze skloviny do chladícího média tak, aby výsledný výrobek splňoval požadované parametry. Množství předaného tepla ze skloviny do formy a další tepelný prostup do chladícího vzduchu, který proudí axiálními chladícími kanály nebo do držáků formy a prostupuje do okolí je převzat z odborné literatury v procentuálním vyjádření. Do tohoto vyjádření použijeme známé a zjistitelné veličiny jako hmotnost láhve m = 315 g, střední měrné tepla skloviny a rozdíl teploty kapky, která je rozmezí 1050 - 1170 C a teplota láhve na odstávce, která byla vzata 800 stupňů Celsia. Vypočítané celkové odvedené teplo bylo získáno z jednoduché, výše uvedené kalorimetrické rovnice. Takto vypočítané teplo se rozdělilo podle procentuálního klíče na přední a zadní formu. Byl to krok, na kterém byl postaven celý další výpočet. Tento výpočet popisuje skutečný děj v hrubých rysech.

Celkové množství tepla se dělí v poměru 44 : 56 pro přední a skutečnou formu. Do výpočtu je nutné zahrnout skutečnost, že asi 30 % celkového množství tepla se odvede do okolního vzduchu volnou konvencí, držáku a čelistí formy. Tento údaj jsem se pokusil opravit ve výpočtu v jazyce Pascal, který podrobný popis je uveden dále.

Za nepříliš podstatné považuji uvažovat 6 % ztrát skluzem kapky do formy.

V dalším kroku byl počítám na základě předpokládaného odvedeného tepla ze sklářské formy tepelný tok ze skloviny do stěny formy alfasklovinyy. K jeho určení bylo nutné znát dobu chlazení tauch, která vyplynula z celkové doby taktu tauo po procentuálním rozdělení 44 : 56. Moji předchůdci uvažovali průměrný tepelný tok, který je vzhledem k nestacionární povaze sdílení tepla v soustavě sklo-forma velmi obtížně zjistitelný. Například v cizí literatuře anglické firmy byla Emhart nebo HEYE tato úvaha zveřejněna také. K této části bych chtěl poznamenat, že procentuální rozdělení tepla není ideální a mělo být předem

určeno spíše výpočtem. Zde jasně vyplývají nedostatky předchozích prací jako zanedbání času a nestacionární povahy děje.

Dále jsou do děje započítávány teploty skloviny ve formě a teploty láhve na odstávce, které se dají snadno změřit a výsledky nejsou zatíženy velkou chybou. Z těchto hodnot byly určeny okrajové podmínky, které jsem do své práce použil.

Teploty skloviny v přechodu mezi oběma formami jsou vypočítány z předchozího procentuálního rozdělení celkového měrného tepla.

Výpočet tepelného diferenciálu provedený v následujícím kroku a jeho výsledek rozdělení teploty na 1 mm délky chladicího vývrtu je discutabilní.

tepelný diferenciál = (t_{kapky} - $t_{na\ odst.}$) / délka vývrtu

Úvaha o tzv. střední teplotě

$$t_{si+1} = t_{si} - \text{tepelný diferenciál}$$

je sice náznak o zapojení veličiny času, ale podle mého názoru ne zcela zdařilý, vzhledem k nestacionární povaze děje.

Další úvaha, že se diferenciál teploty skloviny a diferenciál teploty formy rovnají je zahrnuta v předešlé práci.

Výpočet teploty formy

$$t_{f_{i+1}} = t_{f_i} + \text{delta } t$$

je po delším délkovém kroku dosti nepřesný.

Vzhledem k tvaru dutiny, která není uzpůsobena praxi, ale počítá se s jakýmsi válcem o konstantním poloměru.

A přitom právě tvar dutiny jak ukázal můj výpočet je dosti závažným faktorem při prostupu tepla. Přesný popis i zpracování výsledku je popsán v samostatné kapitole.

8. Postup výpočtu a vývojový diagram matematického modelu.

8.1. Postup výpočtu

Jak již bylo dříve uvedeno, je řešení problematiky axiálního chlazení sklářských forem poměrně složitým úkolem. Při jeho řešení je nutno brát zřetel na nestacionární charakter úlohy a časově proměnné okrajové podmínky.

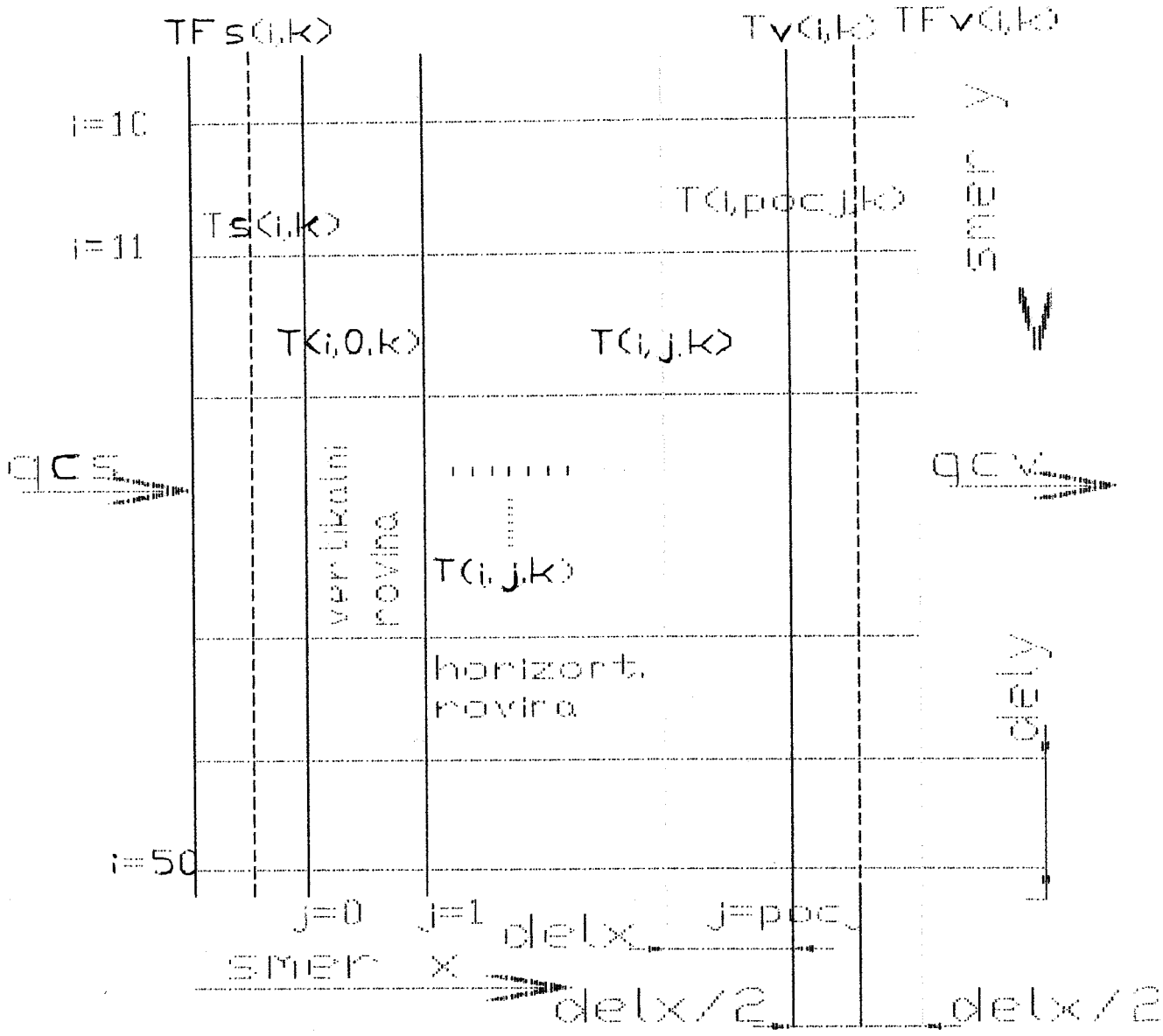
Jedním ze zásadních problémů je také i poměrně značná rychlost procházejícího vzduchu chladícími kanály, neboť bod na proudnici prochází celou délkou chladicího kanálu cca 0.005 s, což limituje časové intervaly řešení. Vzhledem k těmto zkušenostem byl pro vlastní řešení zvolen jednosměrný model metody sítí, korigovaný pro použití osově symetrických problémů s použitím kalorimetrické rovnice pro určování termofyzikáních charakteristik vzduchu a povrch kanálu. Jednorozměrný model byl použit hlavně se zřetelem na množství počítaných neznámých, velikosti CPU počítače a kapacitu hardisku.

Výpočetní model, jehož vývojový diagram v bblokové podobě je uveden v kapitole 8.2 byl testován na příkladu výpočtu axiální přední formy. Pro vlastní modelování předního tvaru byly přijaty následující předpoklady :

- vstupní teplota vzduchu = 20 °C
- vstupní rychlost vzduchu = 20 m/s
- počáteční homogenní rozložení teplot v přední formě = 400 °C
- teplota skloviny po celý cyklus = 1 200 °C
- doba trvání celého cyklu = 8 s
- doba styku skloviny s formou = 3.5 s
- přestup tepla ze skloviny do sklářské formy nahrazen
  q = alfa × (T_s - T_{sf}) při alfa = B / 2 × SQRT (tau)
  (dle Smrčka)
- průměr chladicího kanálu d = 6 mm
- uspořádání sítě v horizontálních i vertikálních směrech je na sobě závislé a omezené homogenizačními kritérii.

Směr vstupujícího vzduchu dle HEYE.

8. Postup výpočtu axialně chlazené formy.



popis rozdeleni steny formy
pro matematicky model vypoctu

Vývojový diagram pro výpočet v Pascalu.

```
zadaní počátečních podmínek
pocw...počateční rychlost vzduchu
pocTv..počáteční teplota vzduchu
Tskla..teplota skla
Tpred..teplota předehřevu formy
```

```
zadaní vstupní dat
R1..vzdal. chlad. otvoru od středu formy.
výpočet R2[i]..vzdal. jed. dutin od středu
               je funkcí tvaru dutiny.
d..pruměr clad. kanálu.
l..delka      - // -    .
alfamax...max. tepl. měr. tok skloviny.
výpočet delx..tak aby byla splněna podmínka
               stability M>2.
Tau...zadání trvání doby cyklu.
výpočet poci....pocet horiz. rovin.
        dely....šířka vert. roviny.
        deltau..čas usek.
        pock....počet čas useku.
        pocj[i]..počty vert. rovin v jednotlivých
                 hor. řezech.
tak aby byla splněna podmínka stability N<2.
```

```
For k=1 to pock  výpočet jed.čas.kroku po celé době cyklu.
```

```
pruběžný výpočet skut. času Rcas.
```

```
For i=1 to poci   .. výpočet jed. hor. rovin
```

```
pruběžný výpočet skut. vzdal od středu formy y.
výpočet alfa-v..souč. přestupu tepla forma-vzduch.
        Tv[i,k]..teplota vzduchu.
        Q[i,k]...tepl. tok v jed. elementu forma-vzduch.
        TFv[i,k]..teplota na fiktivni rovině forma-vzduch.
        TPv[i,k]..teplota povrchu chlad.kanálu nutno násobit
        koef ko z MKP...na straně chlad, kanálu.
```

```
výpočet alfa-s..souč. přestupu tepla forma-sklovina.
        Qs[i,k]...tepl. tok v jed. elementu forma-sklovina.
        TFs[i,k]..teplota na fiktivni rovině forma-sklo.
        TPs[i,k]..teplota povrchu dutiny formy.
        ................na straně dutiny formy.
```

```
for j=1 to pocj[i] výp. jed. vertikálních dílu hor.roviny
```

výpočet teplotního pole ve stěně formy T[i,j,k] v daném čas kroku a příslušných ver. rovin korig.před.válc.stěny.

uložení dat na disk a přesun na další hor. rovinu

kontrola na místo na disku a posunutí o další čas krok.

Třídění výsledku na ukládání pro grafické vystupy

tvorba grafických a jiných výstupu

[př. tiskárna ploter]

sečtení qis a qiv za celý cyklus
návrh počtu chladících otvoru
z podmínky rovnosti přivedeného a odvedeného tepla
na obou stranách stěny formy.

9. SPOJENÍ A DOPLNĚNÍ METODY KONEČNÝCH PRVKU A PASKALU

9.1 VYUŽITÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ K UPŘESNĚNÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU V JAZYCE PASCAL.

V prvotním řešení problému axiální chlazení sklářské formy jsem použil výpočtové metody jednosměrného nestacionárního sdílení tepla, které je podrobně popsáno v předešlé kapitole a je zbytečné se o něm dále podrobně rozepisovat. Musím se však zmínit o jedné nevýhodě popsané metody. Tyto nevýhoda spočívá v nemožnosti sledovat sdílení tepla radiálním směrem, a proto nemohu sledovat tepelné rozdělení v okolí chladícího kanálu. Ve výpočtu v jazyce PASCAL jsem schopen přesně určit pouze teplotu ne začátku chladícího kanálu a to na straně blíže ke středu formy. Ve skutečnosti však teplota, která je na počátku chladícího kanálu není stejná po celém obvodu daného kanálu. V prvotním výpočtu v jazyce PASCAL jsem tuto chybu neopravoval, protože jsem potřeboval získat vstupní data do metody konečných prvků.

Po zpracování prvotních dat jsem mohl získat z metody konečných prvků tepelná pole, která se rozprostírají v okolí chladícího otvoru. Toto rozložení jsem potřeboval vyjádřit opravným koeficientem Ko. Tímto opravným koeficientem jsem pak byl schopen korigovat přestup tepla ze stěny chladícího kanálu do chladícího vzduchu.

Původně jsem předpokládal závislost opravného koeficientu na dvou nezávislých veličinách a to:

a) času

b) délce podél kanálu

Ovšem při zpracování teplotních polí v okolí chladícího kanálu jsem mohl veličinu bodu b) zanedbat, protože se v tomto směru koeficient Ko měnil opravdu nepatrně. Poté jsem mohl získat funkční závislost opravného koeficientu na čase. Grafické zpracování je prezentováno v počáteční formě.

Opravný koeficient Ko je prezentován v rozsahu hodnot 0,89 až 1,0. Hodnoty 1,0 nabývá na počátku chladícího cyklu, kde po celém kanálu je homogenní teplotní rozdělení, které je shodné s teplotou předehřevu. Dále v prvním intervalu nabývá opravný koeficient Ko hodnoty 1,0. Teplota v okolí chladícího kanálu je stále homogenní, ale s rostoucím časovým koeficientem nabývá již

výše uvedených hodnot. V některých časových intervalech dochází k přítomnosti i čtyř teplotních polí v okolí kanálu současně. Vyhodnocení a zpracování těchto jevů bude podrobně popsáno níže.

V této kapitole by bylo dobré si připomenout, že jsem schopen sledovat změnu všech zainteresovaných veličin pouze ve směru kolmém na chladící kanály. Toto omezení je způsobeno volbou metody jednosměrného nestacionárního šíření tepla, kterou jsem použil.

Nejsem schopen sledovat vývoj a ani vzájemné ovlivnění myšlených horizontálních fiktivních řezů, v kterých jednotlivě řeším prostup tepla, Nezávisle ovšem na předcházejících rovinách a ani právě spočítaná horizontální rovina neovlivní další sousedící roviny.

Nedovolím si tvrdit, jak by zanedbaný vertikální tepelný tok ovlivnil teplotní rozdělení v celé formě a tím i další veličiny, které jsou s teplotou formy úzce spjati.

9.2 URČENÍ OPRAVNÉHO KOEFICIENTU Ko

V prvním kroku jsem musel určit počet izoterm, které ovlivňovaly okolí chladícího otvoru. Dále jsem z metody konečných prvků získal konkrétní hodnoty těchto tepelných polí. Dále dle grafického výstupu, který je přiložen v příloze, jsem určil procentuální rozšíření jednotlivých teplotních polí na obvodu chladícího kanálu. Průměrnou teplotu ne obvodu kanálu jsem určil sečtením členů procentuálního rozsahu daného tepelného pole, které jsem násobil tepelnou hodnotou příslušného tepelného pole. Počet součtů závisel na počtu zastoupení tepelných polí po obvodu chladícího kanálu.

V posledním kroku jsem vypočítal opravný součinitel ze vztahu

$$Ko = \frac{T_{prum}}{T_z}$$

kde T_{prum} je průměrná teplota okolí kanálu, která se určí dle výše uvedeného popisu.

T_z je teplota na počátku chladícího kanálu a to na straně blíže ke středu formy. Tato teplota byla v prvotním výpočtu brána jako směrodatná. Takže výpočet teploty na povrchu chladícího kanálu je korigován následovně:

$$T_{pv}/i,k/ = Ko \cdot T_{pv}/i,k/$$

kde $T_{pv}/i,k/$ je počítaná teplota povrchu chladícího kanálu v jednotlivých horizontálních řezech. Tato hodnota je snižována výše popsaným koeficientem Ko. Takže dostávám jakousi průměrnou teplotu okolí kanálu, který jsem schopen dosti přesně popsat a přiblížit se ke skutečnému stavu rozložení tepelných polí v okolí chladícího kanálu. Toto rozložení tepelných polí jsem získal z metody konečných prvků a s dosti velkou přesností. Tímto doplňuji a odstraňuji nedostatky ve výpočtu v jazyku PASCAL, který není schopen určit teplotu v kolmém směru na směr šíření tepla.

9.3 NÁVRH POČTU A UMÍSTĚNÍ CHLADÍCÍCH OTVORU.

Z matematického modelu, který jsem zpracoval v jazyku Pascal, výsledky upřesnil metodou konečných prvků / software ADAM / a opět přepočítal s upřesněním a opravami v jazyku Pascal, jsem obdržel přivedené a odvedené teplo v elementu, jehož velikost závisí na průměru chladícího kanálu. Toto přivedené a odvedené teplo v elementu je myšleno za celý cyklus asi 8 sekund.

Element je vysoký stejně jako forma a na konci široký stejně jako průměr chladícího otvoru. Pro upřesnění po celou dobu chladícího taktu bylo odvedeno jedním kanálem množství tepla rovné 1364 J a na druhé straně přivedeno teplo ze skloviny o hodnotě 1119 J, což je pochopitelné, protože ploch kanálu je mnohem větší než plocha, přes kterou přestupuje teplo ze skloviny do formy. Ovšem součinitel přestupu tepla je na straně sklo - forma několikanásobně větší než na straně forma vzduch, ale s přibývajícím časem klesá až je přibližně na konci cyklu stejný.

Výše uvedená nerovnoměrnost přivedeného a odvedeného tepla se vyrovná, když zvětším úhel, který svírá element, jež má šířku v nejširším konci pouze o velikosti průměru chladícího otvoru.

To znamená, že odvedené teplo chladícím kanálem zůstane stejné, ale přívod tepla na straně sklo - forma se zvětší úměrně s velikostí mezery, která bude oddělovat chladící otvory.

Dále budu popisovat pouze postup podle kterého jsem získané hodnoty v Pascalu zpracoval.

Konkrétní výsledky jsou přehledně zpracovány pomocí grafů a textových souborů, které jsem uložil na disketu.

Pro vyhodnocení množství tepla, které proteče mezi kanály, jsem nejprve určil úhel, který svírají obě strany elementu a to podle vztahu:

$$alfa = 2 \cdot \arctan (d/ 2.R_1)$$

kde d je průměr chladícího kanálu, tedy průměr, ze kterého byly výsledky získány.

R_1 je poloměr, na kterém budou chladící otvory umístěny (je také znám u předcházejícího výpočtu).

V tuto chvíli znám množství tepla, které odvede chladící kanál o daném průměru za celý cyklus a teplo přivedené na vnitřní stranu formy.

A nyní potřebuji získat teplo přivedené po dobu celého cyklu na 1 stupeň.

$$q_{cvist} = q_{cv} / alfa$$

nyní jsem schopen určit funkční závislost mezi tloušťkou mezery jednotlivých chladících otvorů a teplem, které projde touto mezerou, Nejprve musím ale získat funkční závislost tloušťky mezery na úhlu alfa

$$Mezera\ (alfa) = 2 \cdot 3{,}14 \cdot R_1 \cdot alfa / 360$$

a funkční závislost přivedeného tepla na úhlu alfa

$$q_{cs}(alfa) = q_{csist} \cdot alfa$$

kde alfa bude začínat na hodnotě, která byla zpočítána z rozměru elementu. Nyní jsem schopen určit procentuální závislost tepla, které projde mezi chladícími otvory.

$$q_{c\ protekle}(alfa) = (1 - (q_{cv} / q_{cs}(alfa)))$$

Na přiložené disketě je vyjádřen průběh $q_{cprotekle}$ na tloušťce mezery mezi chladícími otvory, obě jsou funkcí alfa.

Úhel alfa bude nabývat hodnot z intervalu alfa počáteční až alfa konečné, kde alfa počáteční se rovná úhlu, který svírá výše popsaný element, ohraničený pouze průměrem chladícího otvoru.

Alfa konečné se rovná úhlu, který svírá element s otvorem plus mezerou o stejné velikosti jako je průměr chladícího otvoru (tuto hodnotu volíme libovolně).

Z počátku chladící otvor odvede více tepla než přitéká ze skloviny, což je pochopitelné a zdůvodněné níže.

Se vzrůstající hodnotou alfa vzrůstá hodnota přiteklého tepla ze skloviny, ale hodnota odvedeného tepla do vzduchu v chladícím otvoru je stále stejná. Proto je hodnota množství proteklého tepla zprvu záporná a má vzrůstající tendenci. V pomocném výpočtu zjistí takový úhel, při kterém je absolutní hodnota proteklého tepla co nejmenší.

Tento úhel je představován takovou tloušťkou mezery mezi chladícími otvory, při kterém je přivedené a odvedené teplo v rovnováze.

Dále ze znalosti úhlu při rovnováze tepelných toků určím počet a umístění chladících otvorů ze vztahu:

počet otvorů = 360 div alfa rovnost

alfa rovnost je úhel odpovídající tloušťce mezery při které je rovnost tepelných toků a proteklé teplo mezi otvory rovno nule.

Hodnoty uvedené výše (teplo odvedené jedním chladícím kanálem a teplo přivedené do elementu, který je určen průměrem chladícího otvoru) za celý cyklus a to i při úvaze že při posledních 4,5 s je na vnitřní straně formy odvod tepla vyjádřený součinitelem přestupu tepla alfa.

$$alfa = 17\ W / m^2\ K$$

Tento odvod tepla je způsoben otevřením formy, kdy dutiny je vystavena nepohyblivému vzduchu okolí, který bude mít ovšem mnohem větší hodnotu než např. okolní vzduch na vnějším obvodu, který odvádí teplo.

Teplotu vzduchu jsem volil 150 stupňů, protože jsem v literatuře žádný údaj nenašel, o který bych se mohl opřít. Teplo jež jsem odvedl při otevření formy v době chlazení jsem vyjádřil rovnicí:

$$Q = alfa\ .\ SS\ .\ (\ t_{vz} - t_{ps}\ ),$$

kde samozřejmě teplota vzduchu je menší než teplota povrchu formy. Z toho vyplývá, že hodnota Q vyšla záporná a celkově snížila celkovou hodnotu přivedeného tepla do skloviny, i když dá se říci, že nepatrně. V jednotlivých horizontálních řezech vycházela hodnota odvedeného tepla v době otevření formy řádově i menší oproti stavu, kdy je forma ve styku se sklovinou a přivedené teplo je kladné.

10. ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ CELÉ PRÁCE.

V dnešní době, kdy ve všech odvětvích průmyslu zasahuje čím dál tím větší měrou výpočetní technika a to samozřejmě i v průmyslu skla a keramiky, je i tento program dalším krokem komplexního zkoumání a navrhování výroby axial.chlazených forem pomocí výpočetní techniky.

V mé diplomové práci jsem dokázal znázornit a zpracovat jevy a veličiny, které vznikají při výrobě obalového skla v přední formě. Zabýval jsem se především pozorováním průběhu okrajových veličin např. tepla stěny kanálu, tepla stěny dutiny, průběhu rychlosti vzduchu v chladícím kanálu a dále parametrů samotného chladícího vzduchu (hustoty, hmotnosti, hmotnostního a objemového průtoku, viskozity atd.) . Dále se má pozornost zaměřila na průběh tepla stěnou formy. Tuto veličinu jsem nezpracoval graficky v dvou a třírozměrných grafech jako předešlé veličiny, ale zpracoval jsem ji ve formě pokusu o animaci prostupu tepla na počítači.Veškeré graf. výstupy jsou uvedeny v příloze.

Všechny veličiny jsou v závislosti na délce chlad.kanálu a času. Všechny okrajové podmínky jsou znázorněny pro první cyklus.
Na obr.2 je možno vidět průběh přivedeného tepla ze skloviny do formy a přivedené teplo do vzduchu ve 30 cyklech.
Na obr. 3 je možno sledovat závislost součinitele přestupu tepla do vzduchu, který má maximum na vstupu a minimum na 0.15 m délky chladícího kanálu. Na výstupu je možno sledovat nárůst.
Na obr. 6 je zachycen vývoj teploty povrchu kanálu. Ve srovnání s předchozími doplomovými pracemi má správný průběh.
Na obr 8. je zaznamenán průběh odvedeného tepla jedním kanálem. Charakteristika odpovídá všem veličinám, na kterých je závislá.
Návrh počtu chladících otvorů byl proveden po 30 cyklech, kdy se dá předpokládat ustálený průběh odvedeného tepla. Při zadaných vstupních datech vyšel počet otvorů 47.

V části, ve které jsem sledoval přivedené teplo ze skloviny do formy a odvedené teplo do chladícího vzduchu, který proudí chladícími otvory, jsem počítal v jazyce Turbo Pascal celý cyklus a to v délce osmi vteřin (3,5 vteřiny setrvání skloviny v přední formě a 4,5 vteřiny chlazení prázdné formy). Jsem si vědom, že ustálený stav nenastane po jednom nebo dvou cyklech, ale po několika (výpočet ukázal asi 30 cyklu).

Počáteční podmínky jsem získal z teploty předehřevu. Neznalost rozložení teplot v rad. směru jsem se pokusil odstranit v metodě konečných prvků, kde jsem mohl poměrně rychle a snadno spočítat několik cyklů po sobě jdoucích, avšak pouze v několika horizontálních řezech a několika časových okamžicích. Tyto hodnoty jsem využil formou opravných koeficientů v jazyce Pascal.

Pro zpracování výsledků z metody konečných prvků, jsem musel zvládnout, pro moderního konstruktéra nezbytný, software AUTOCAD, abych mohl výsledky obdržet v provedení tiskárny nebo plotru.

Na závěr bych chtěl říci, že pro vytvoření uplného modelu na návrh sklářské formy, ve kterém bych mohl předpovědět teplotu na povrchu dutiny, bych musel použít modernější techniky s větší kapacitou, spolupracovat s více lidmi a zároveň výsledky porovnat se skutečnými naměřenými hodnotami.

Některé naměřené hodnoty byly prezentovány v reklamních materiálech firem EMHART a HEYE, ale pouze pro konečné formy.

Veškeré znaky řecké abecedy jsou psány latinkou, protože vestavěný editor neumožňuje použít řecké symboly.

Na úplný závěr bych chtěl poděkovat za rady a připomínky ing. Matouškovi a ing. Cibulkovi Csc.

Seznam použité literatury

1. Smrček A. : Strojní tvarování skla SNTL, Praha, 1981

2. Nagy J. : Axiálně chlazená přední forma DP 176/89

3. Mayer S. : Návrh forem pro axiální chlazení DP 042/88

4. Belda J. : Sklářské a keramické stroje II
tepelné výpočty
skriptum VŠST Liberec 1986

5. Klebsa V. : Technologie skla a keramiky I
skriptum VŠST Liberec

6. Firemní literatura fy EMHART a HEYE

7. Smrček A. : Skloviny pro výrobu obalového skla
Sklář a keramik 35/1985/ č.6, str. 161 - 172

8. Steidl a kol. : Úvod do proudění tekutin a sdílení tepla
Academia 1961

OBRAZOVÁ DOKUMENTACE

obr.1.....sítové dělení stěny formy.

obr.2.....přivedené a odvedené teplo.

obr.3.....součinitel přestupu tepla forma-vzduch.

obr.4.....teplota stěny dutiny dutiny.

obr.5.....součinitel přestupu tepla forma-sklo.

obr.6.....teplota stěny chladícího kanálu.

obr.7.....hustota vzduchu.

obr.8.....přivedené teplo z formy do vzduchu.

obr.9.....přivedené teplo z skla do formy.

obr.10.....Reynoldsovo číslo.

obr.11.....Nusseltovo číslo.

obr.12.....Prandtlovo číslo.

obr.13-19..skleněný element v časovém rozmezí 0..3.5.

obr.20-26..element formy v časovém rozmezí 0..3.5.

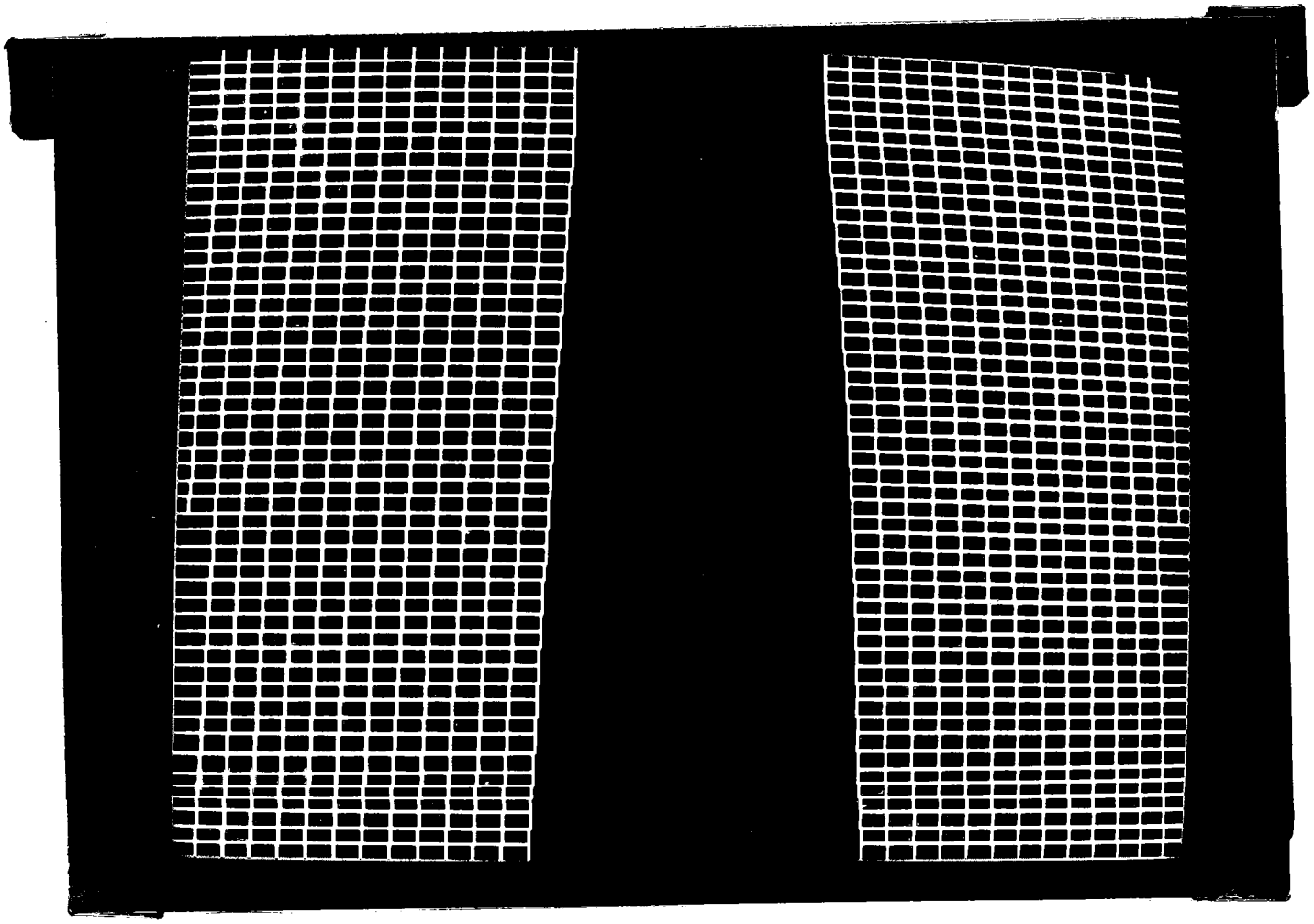
obr.27-36.. - // - 3.5..8.0

obr.37-42.. - // - 0..3.5

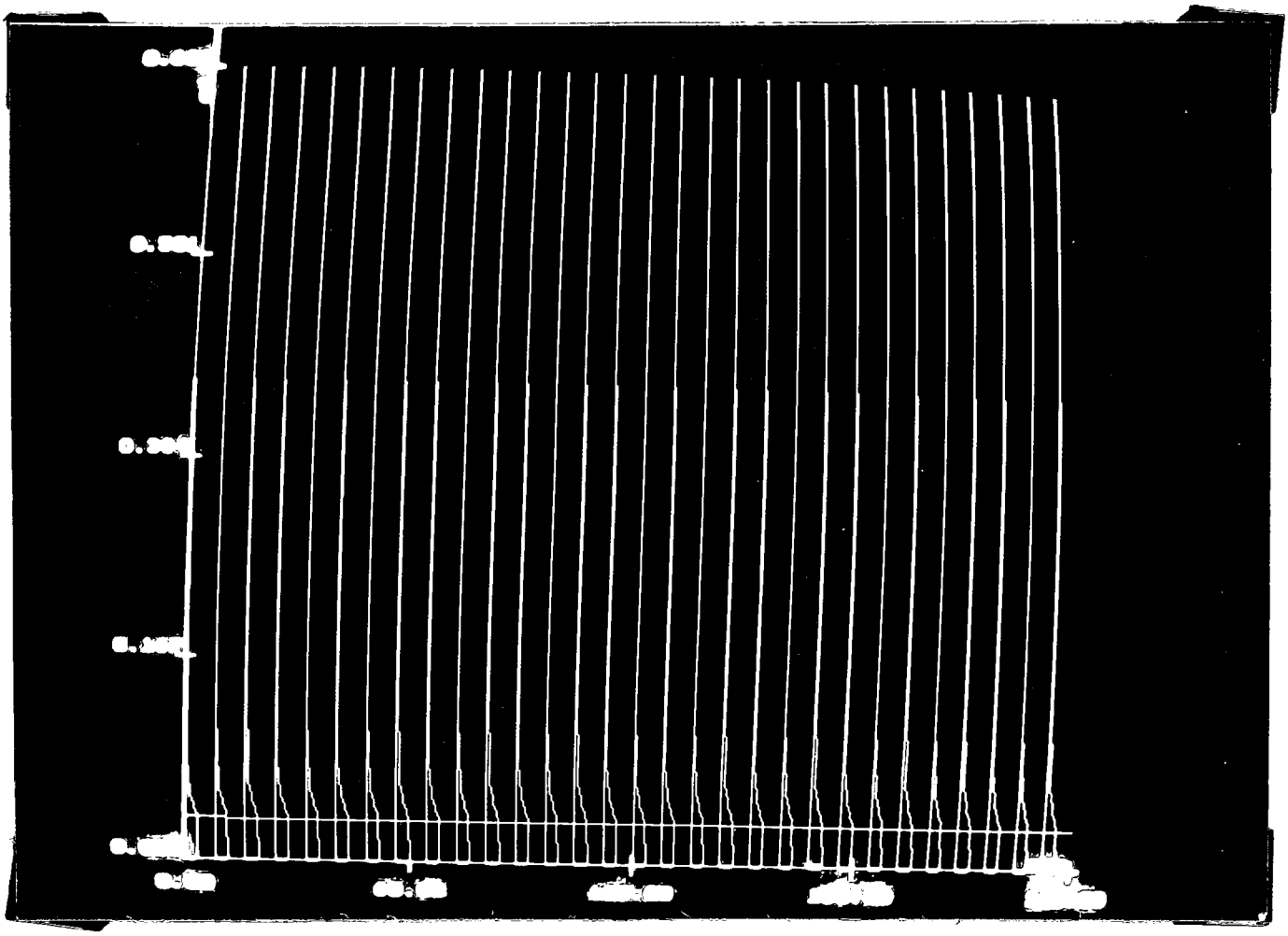
při zaizolovaném obvodu formy.

obr.43-51...element formy v časovém rozmezí 3.5..8.0

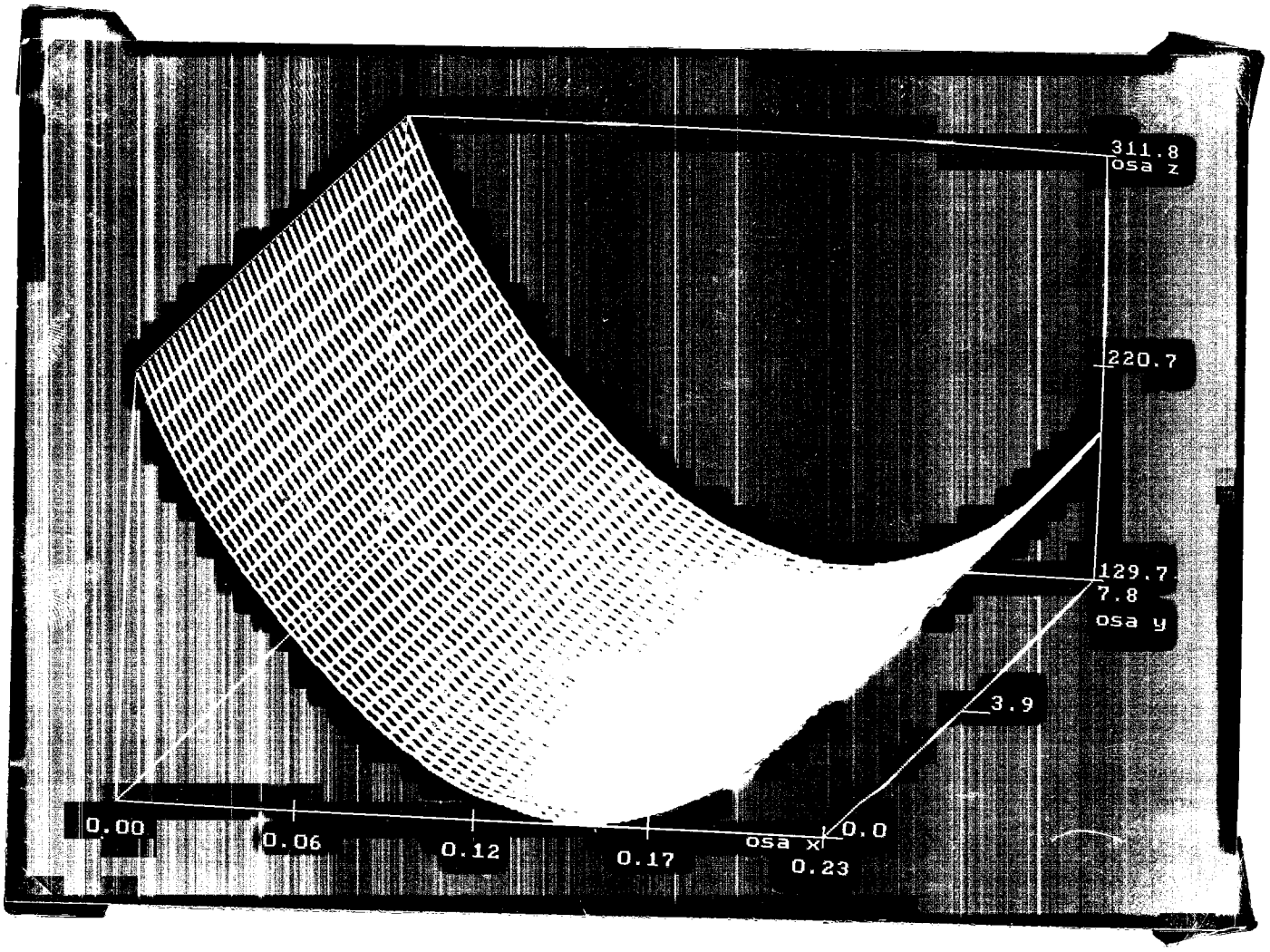
při zaizolovaném obvodu formy.



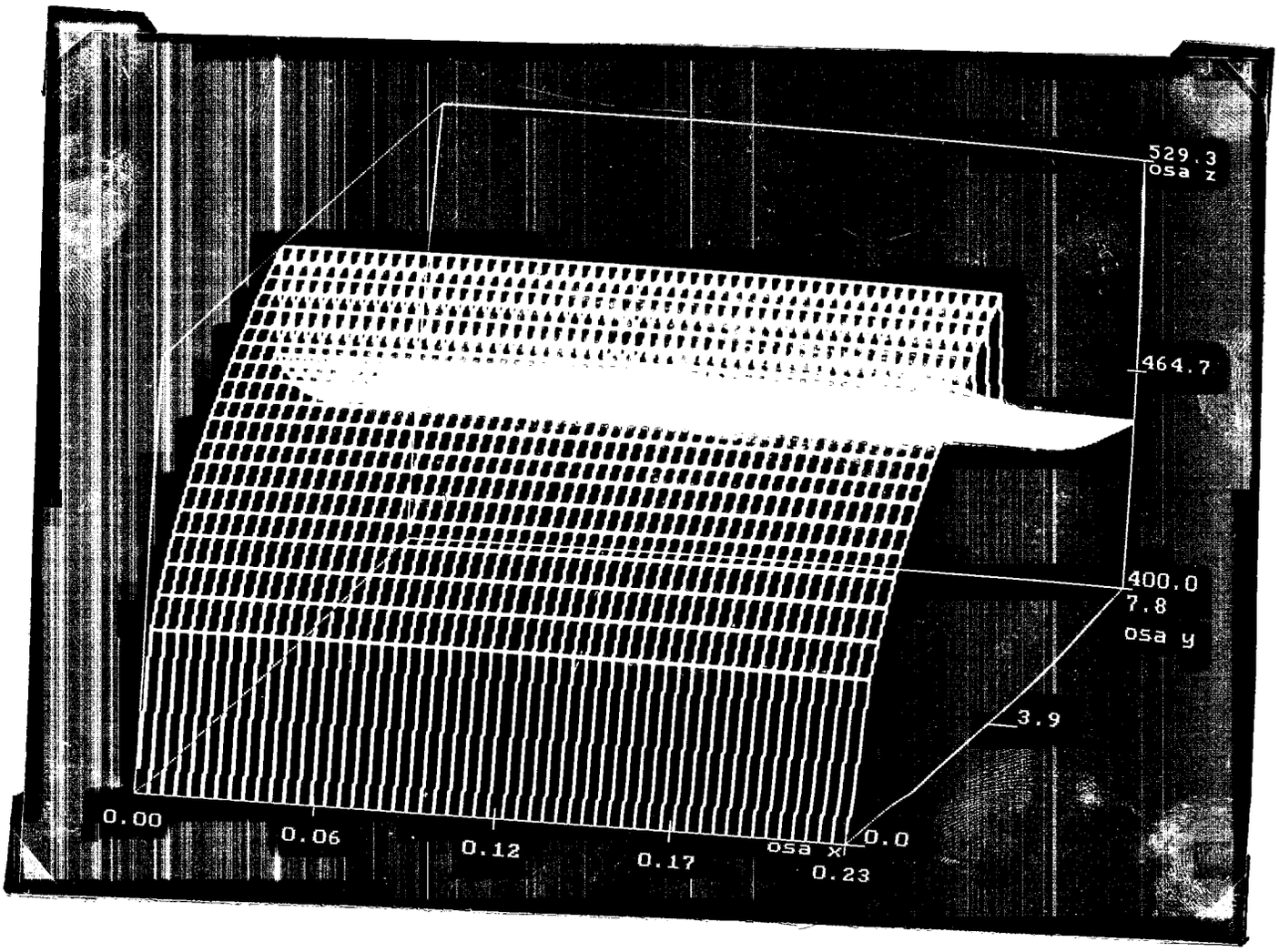
obr. 1



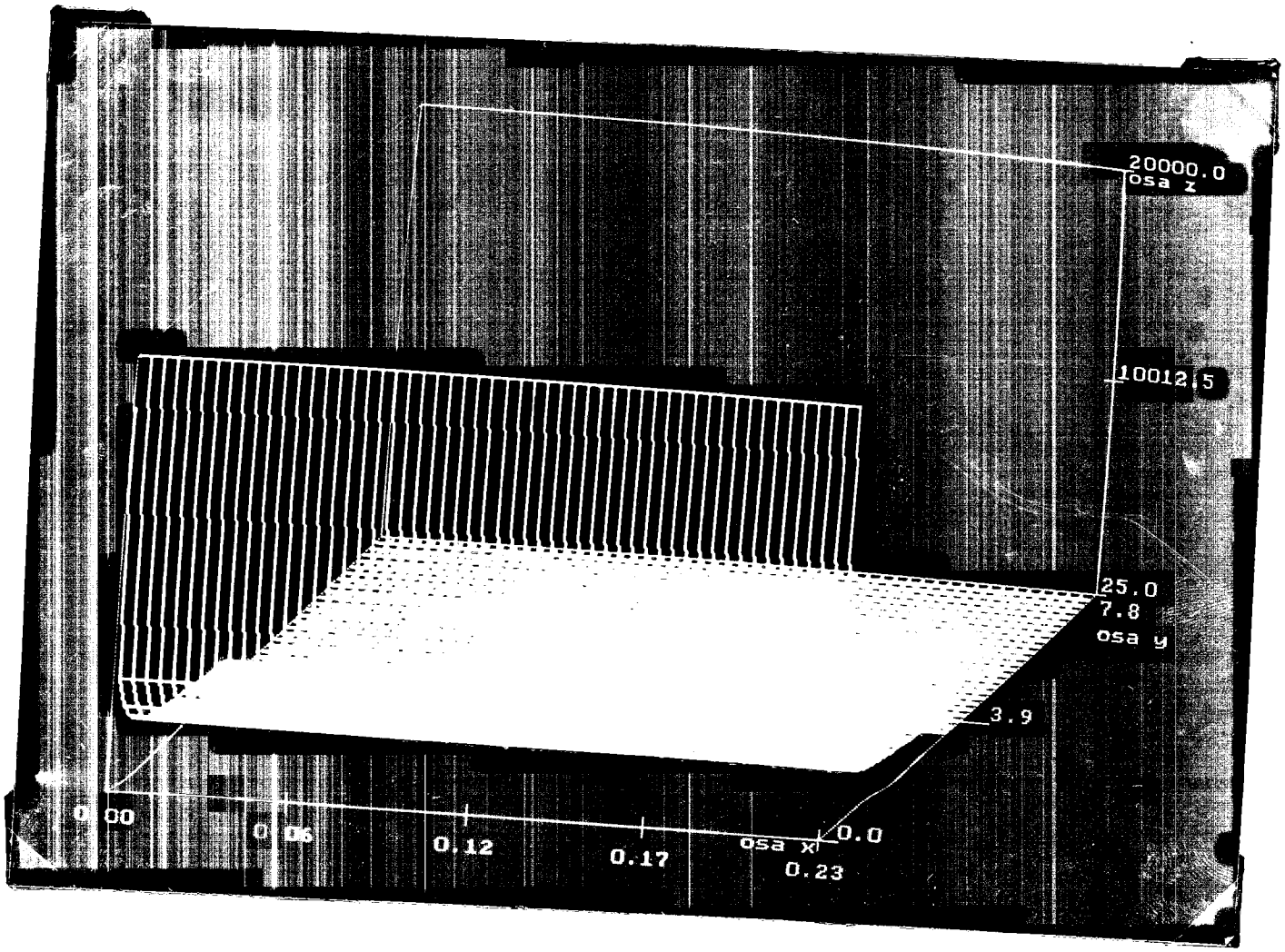
obr. 2



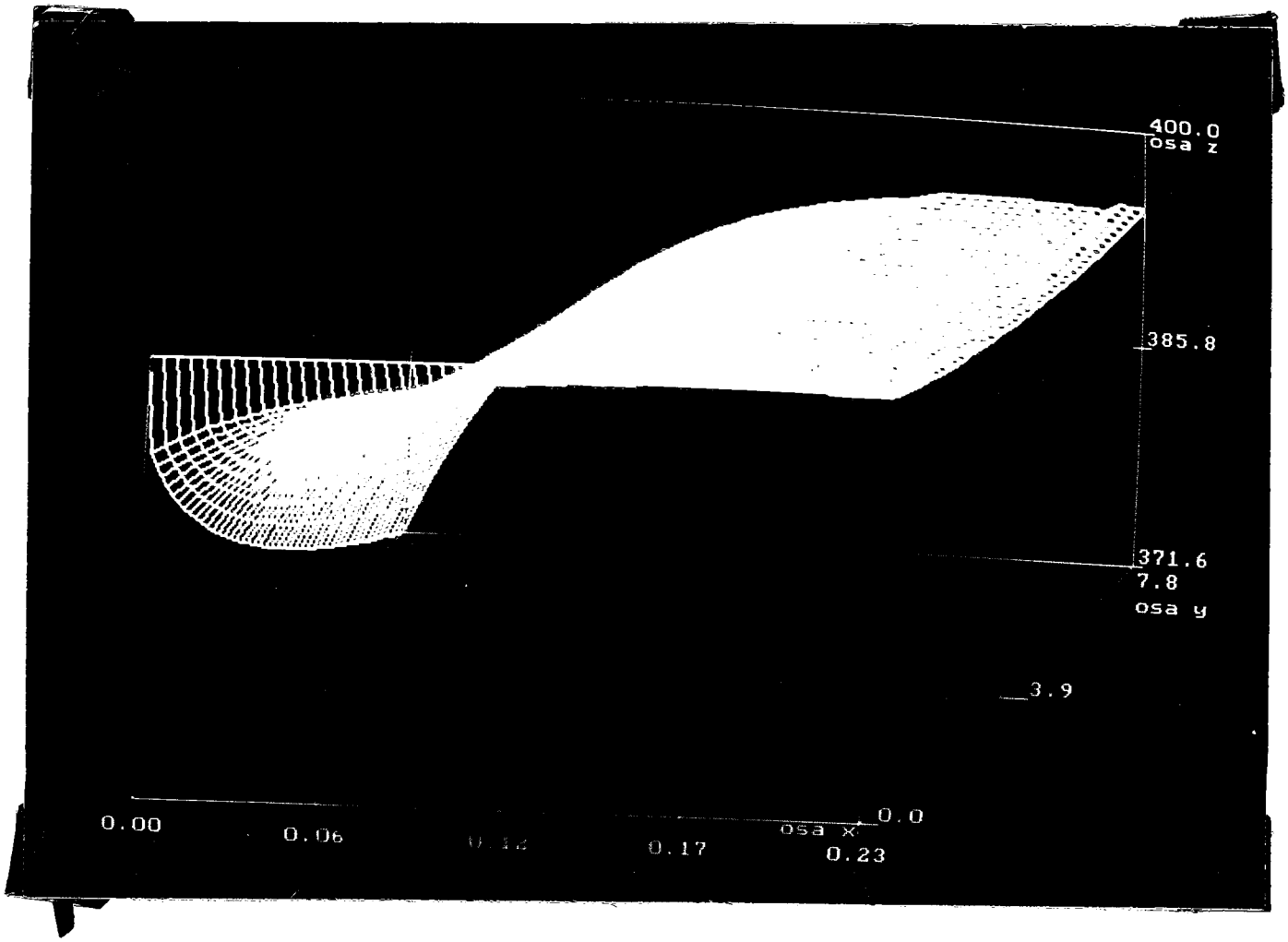
obr. 3



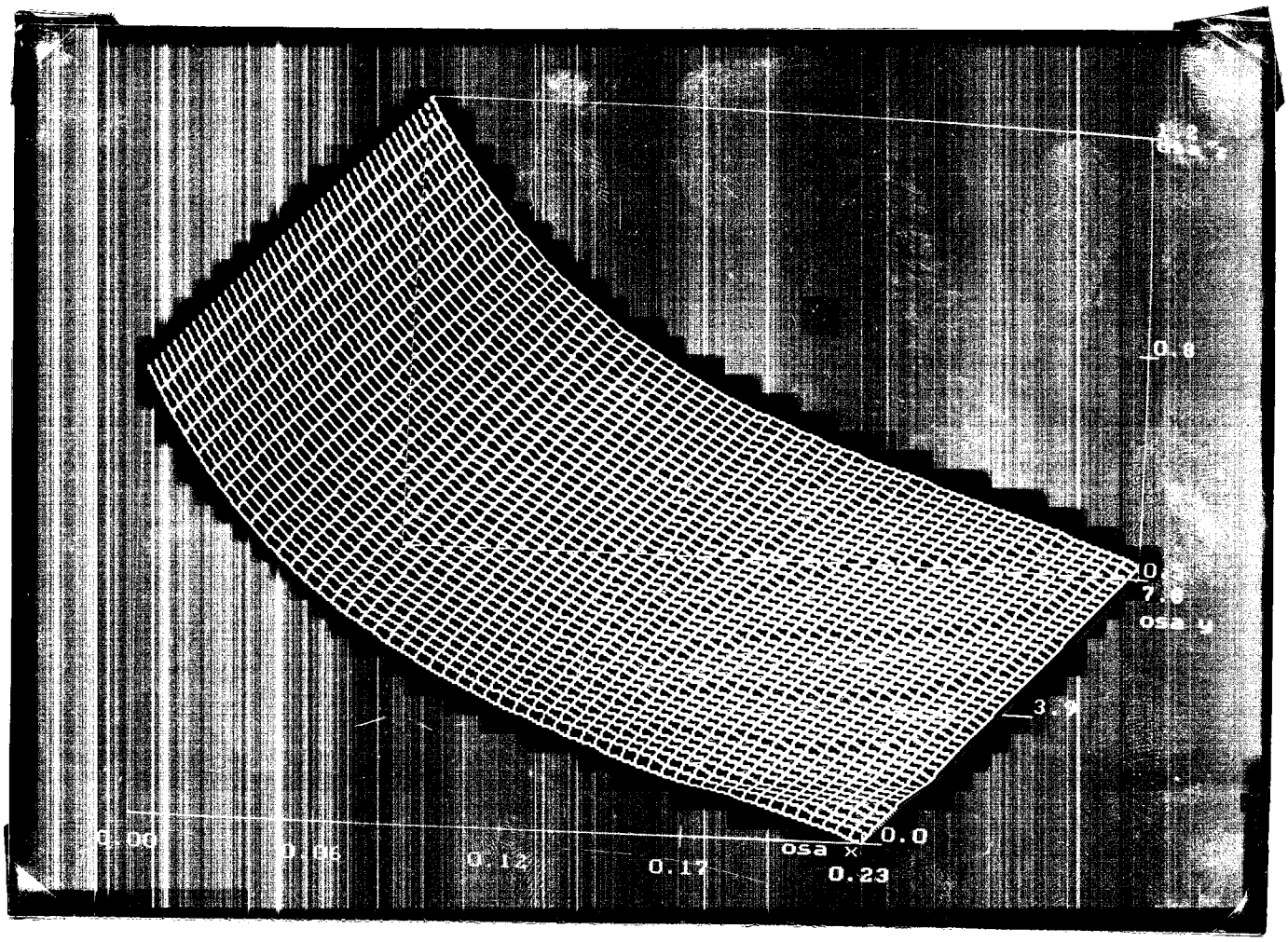
obr. 4



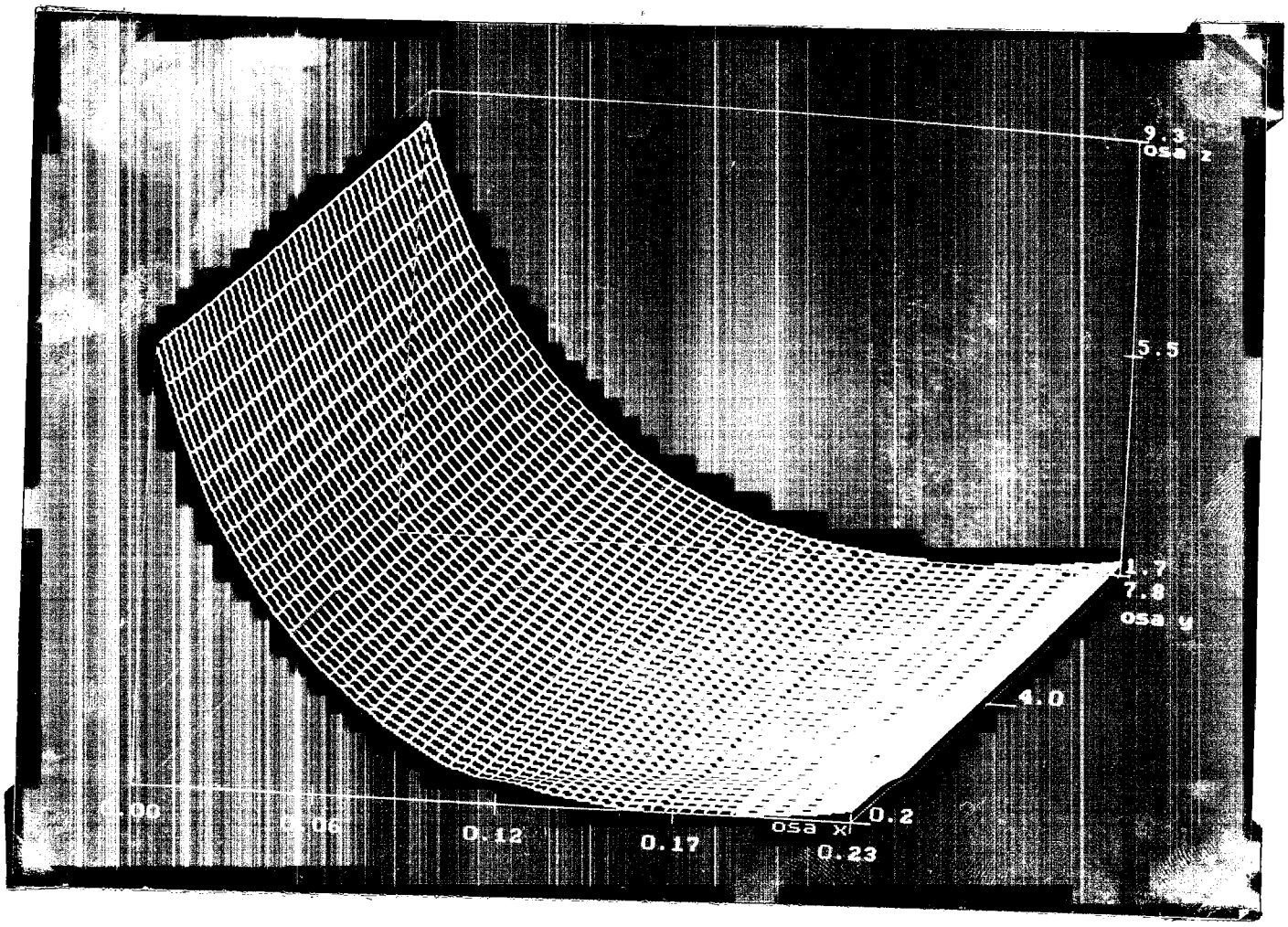
obr.5



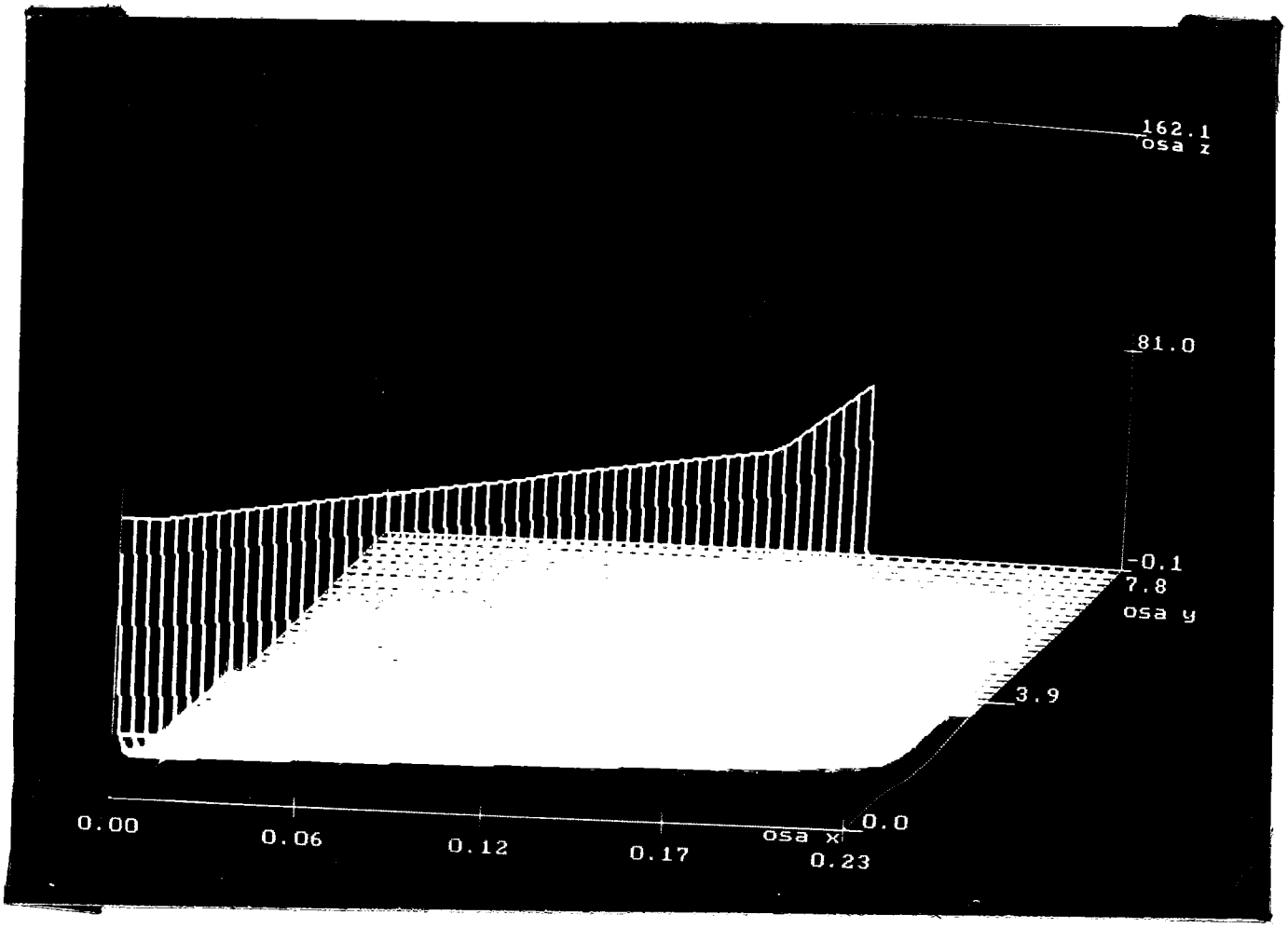
obr. 6



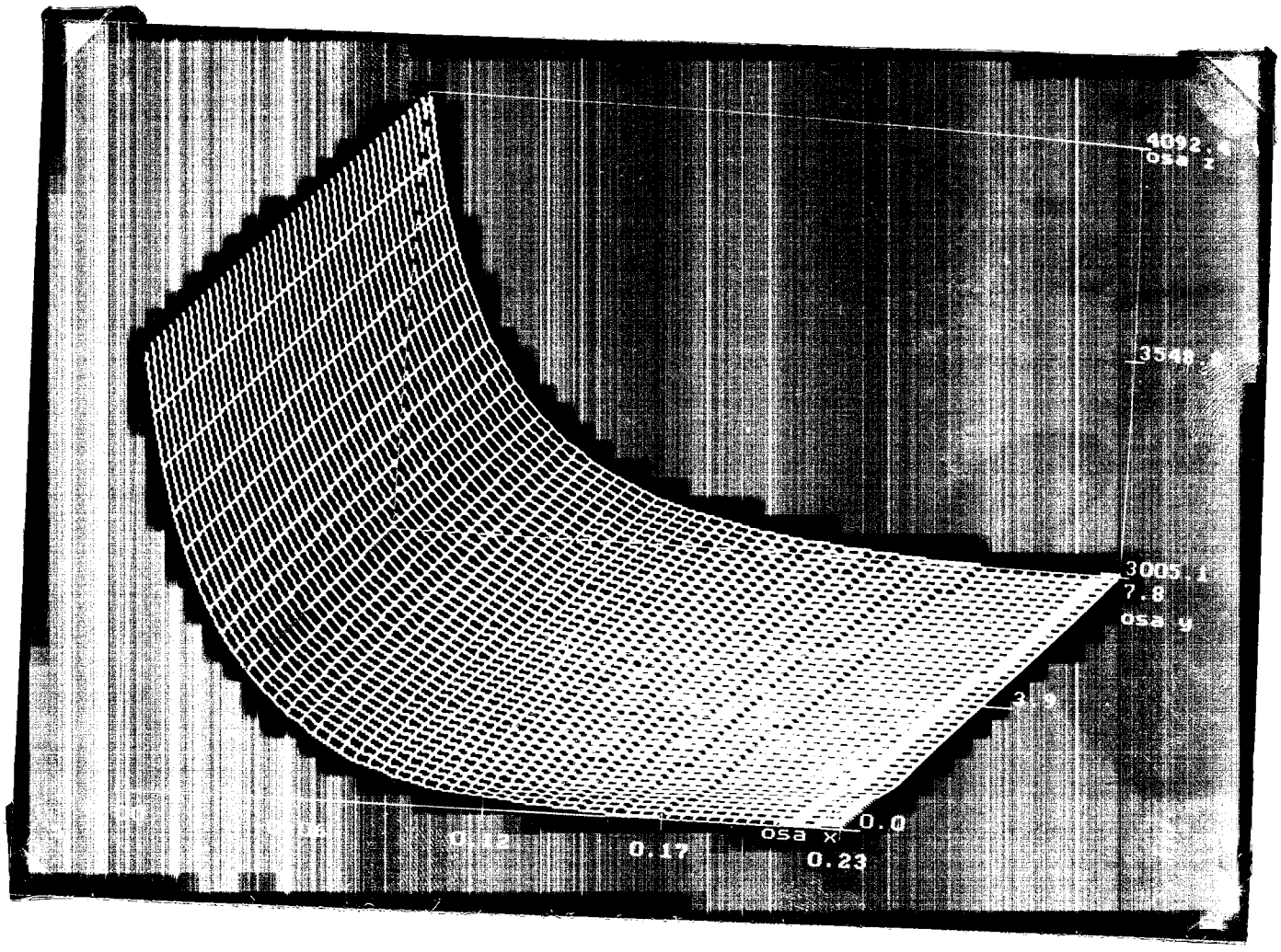
obr.7



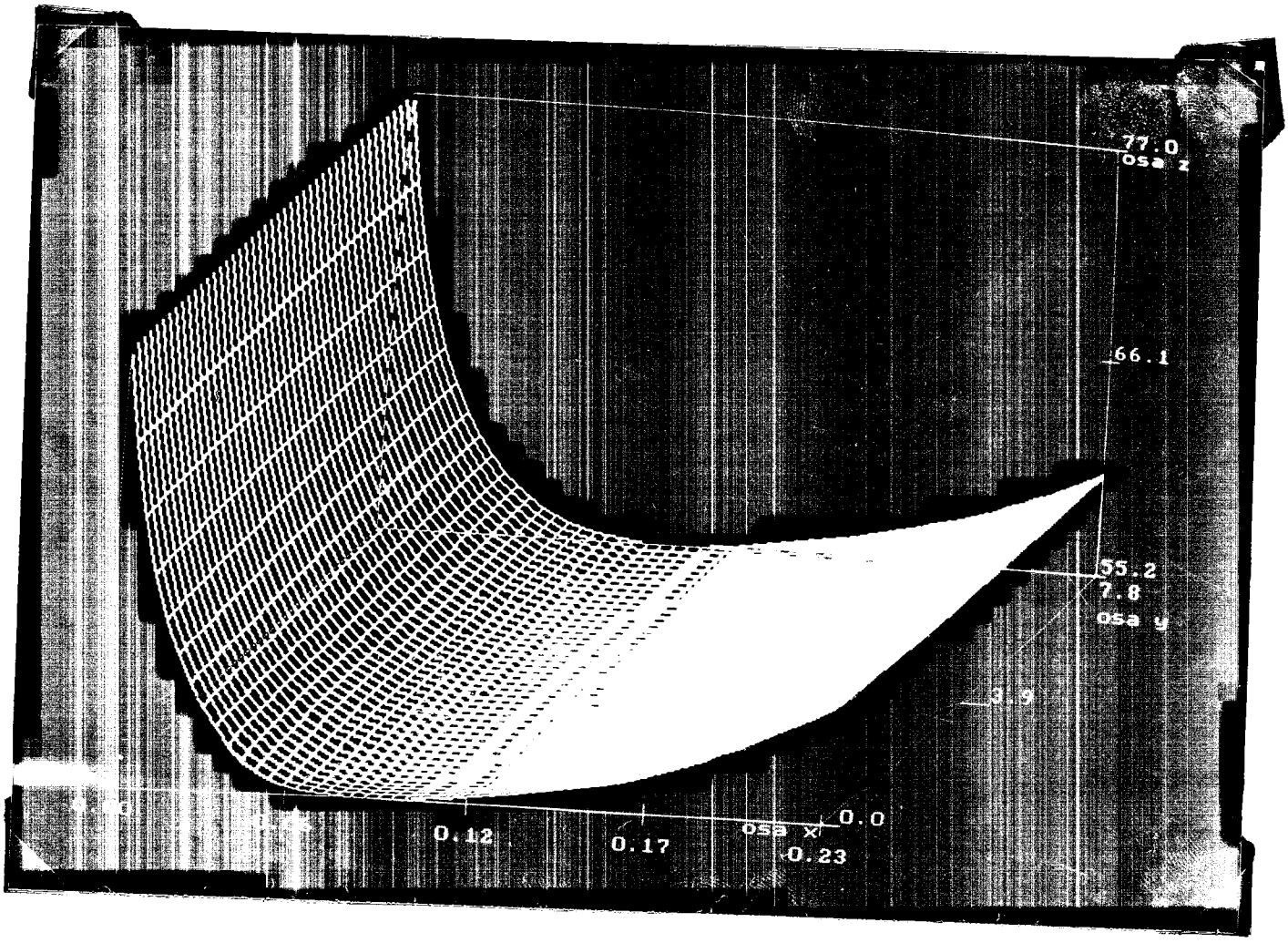
obr.8



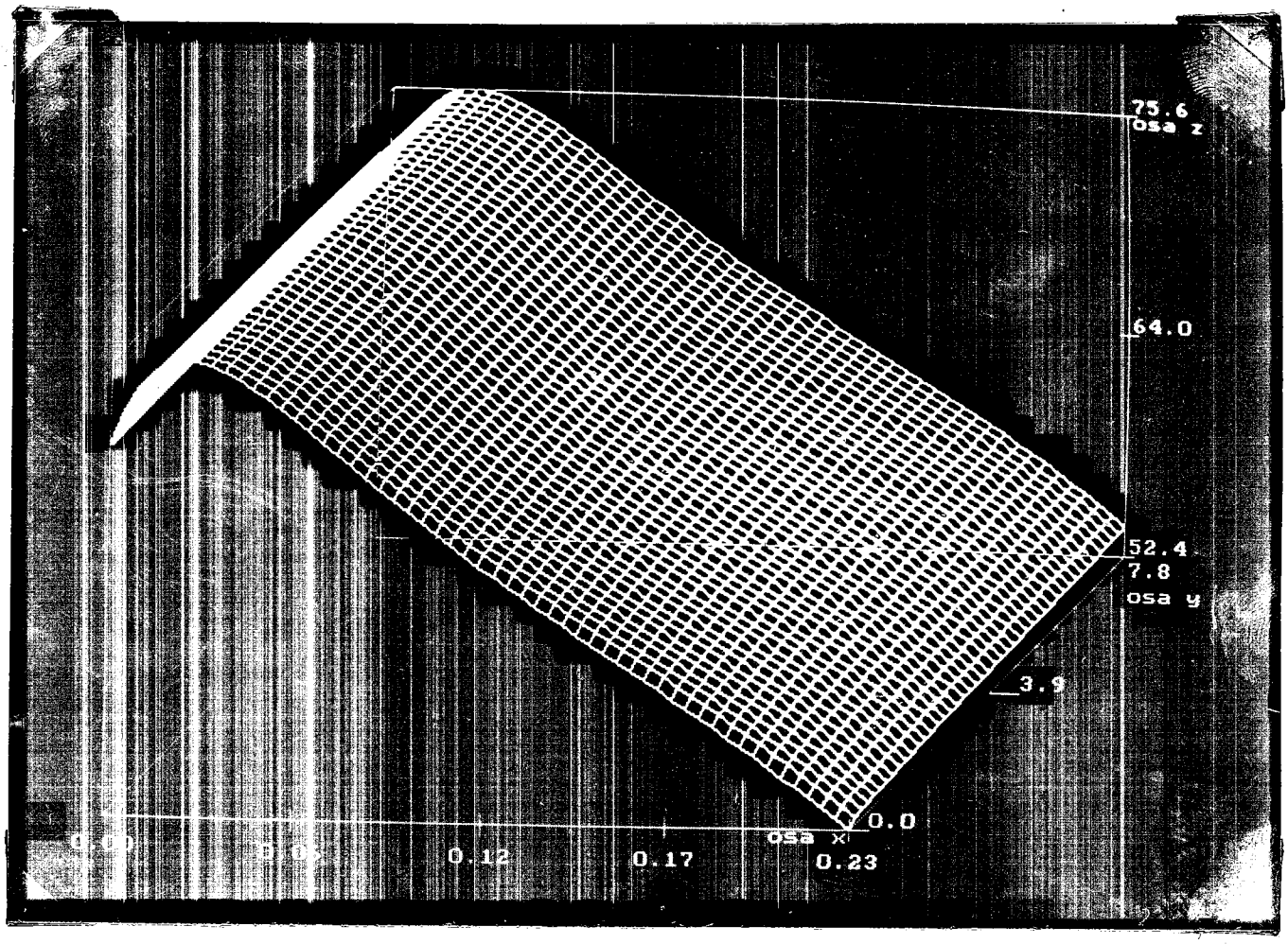
obr.9



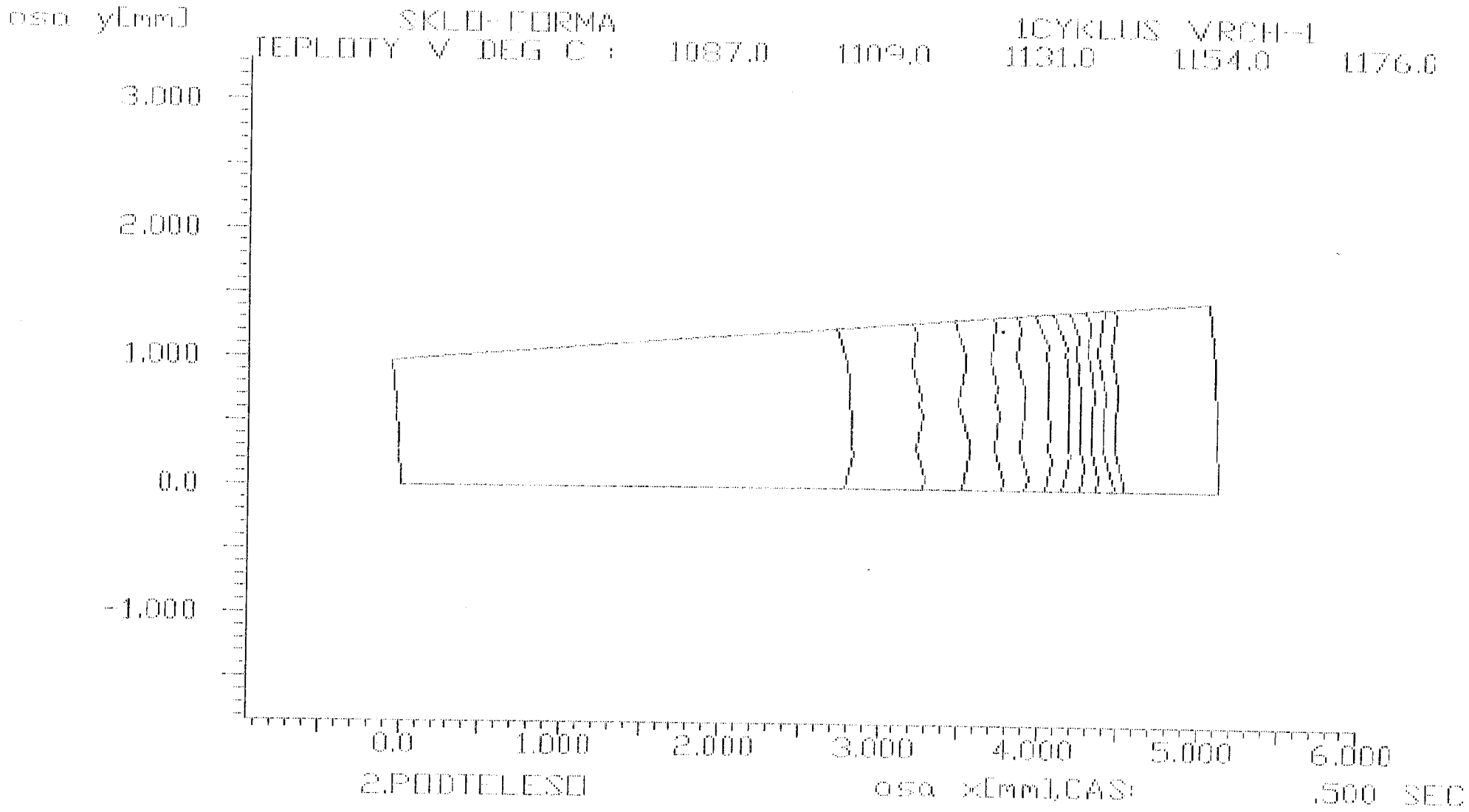
obr. 10

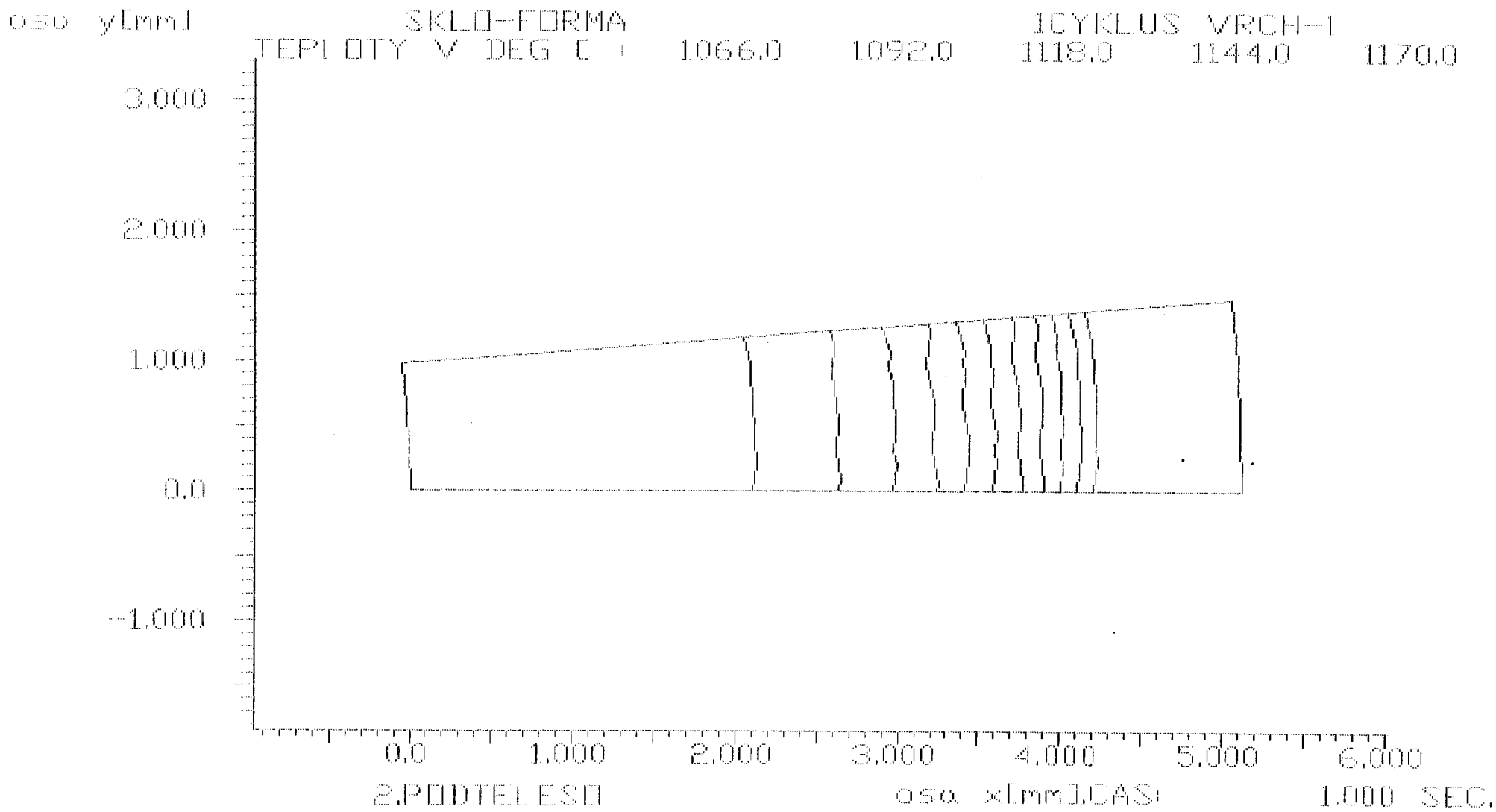


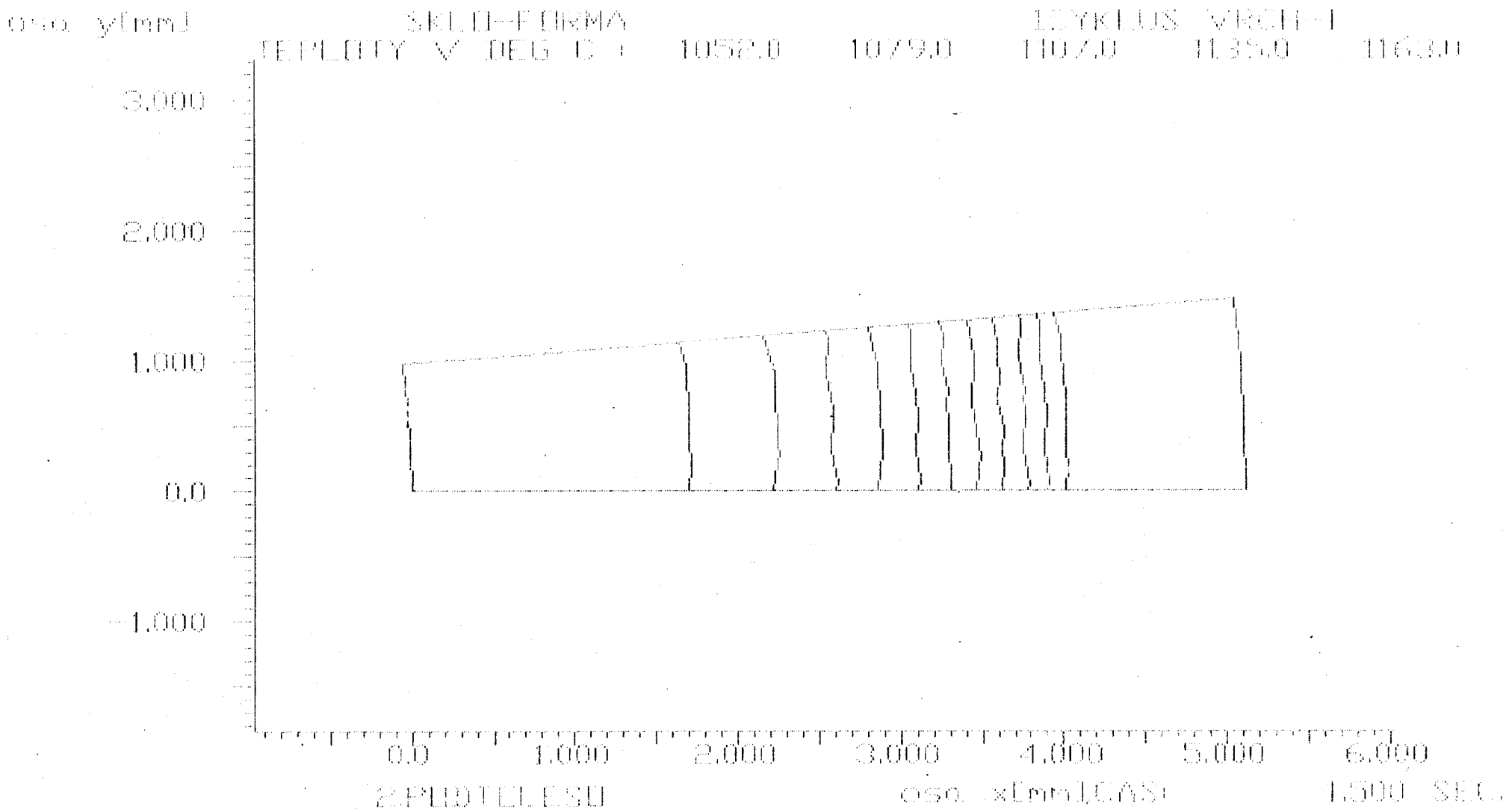
obr. 11

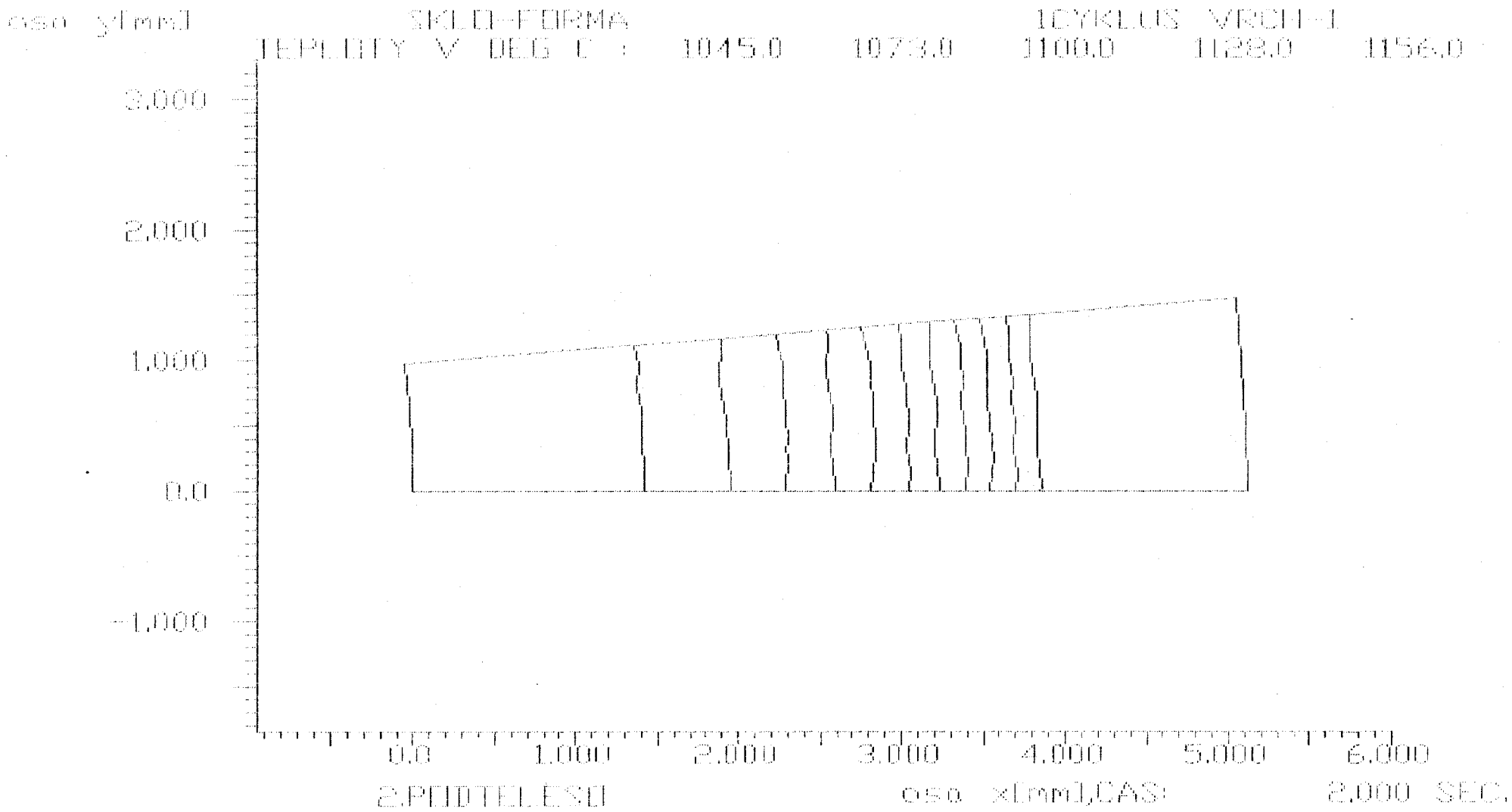


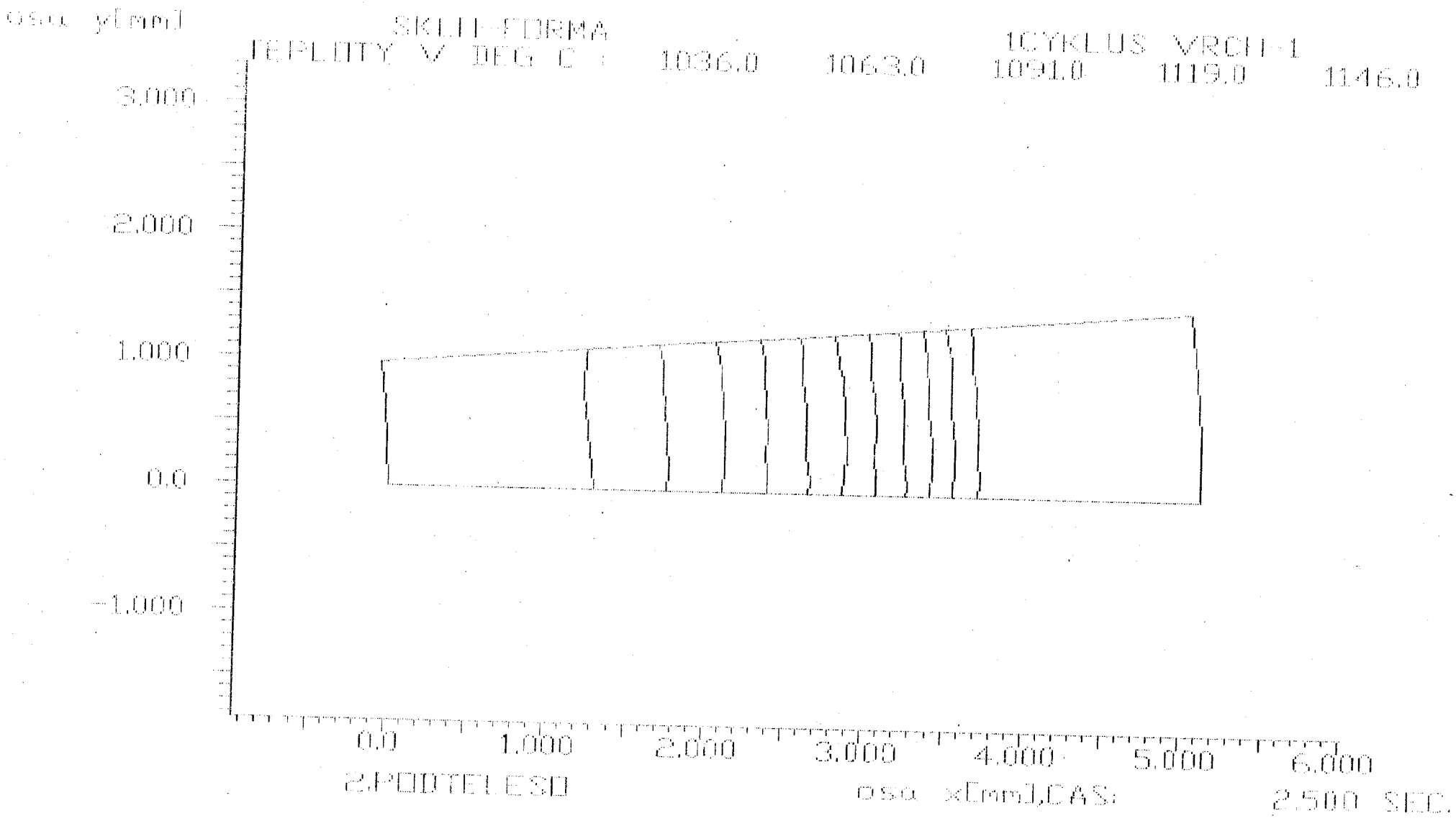
obr. 12


osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 1087.0 1109.0 1131.0 1154.0 1176.0
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
2.PODTELESO
osa x[mm],CAS: .500 SEC


osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C
1066.0
1092.0
1118.0
1144.0
1170.0
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
2.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
1.000 SEC.


SELD-FIRMA
CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C
1052.0
1079.0
1107.0
1135.0
1163.0
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
2.PLUDTELESU
1.500 SEC


osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 1045.0 1073.0 1100.0 1128.0 1156.0
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0 1.000 2.000 3.000 4.000 5.000 6.000
2.PEIDTELESO
osa x[mm],CAS: 2.000 SEC.

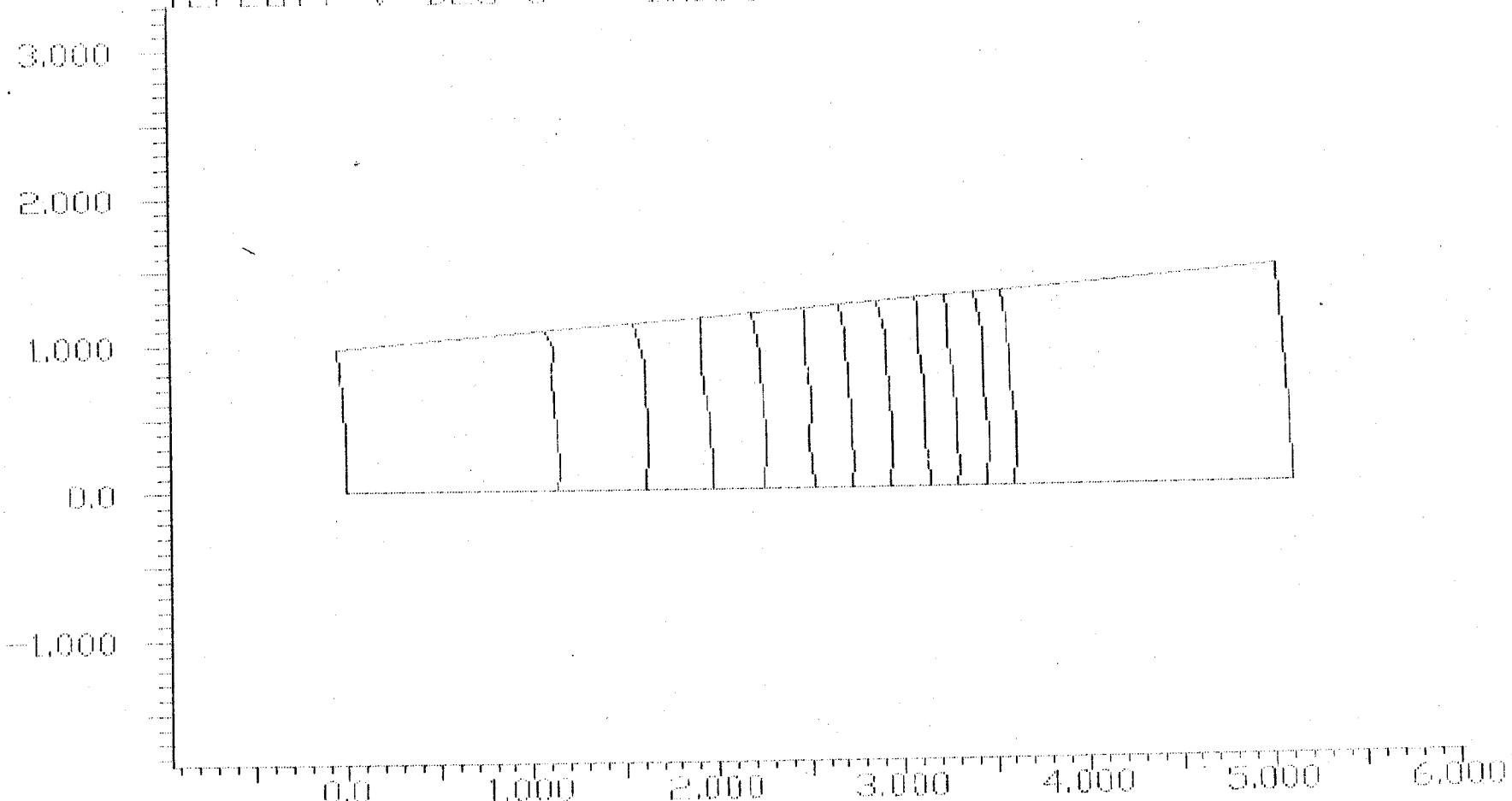

osa y[mm]
SKLIT-FORMA
TEPLOTY V DEG C : 1036.0 1063.0 1091.0 1119.0 1146.0
1CYKLUS VRCH-1
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0 1.000 2.000 3.000 4.000 5.000 6.000
2.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 2.500 SEC.

osa y[mm]

SKLO-FORMA

1CYKLUS VRCH-1

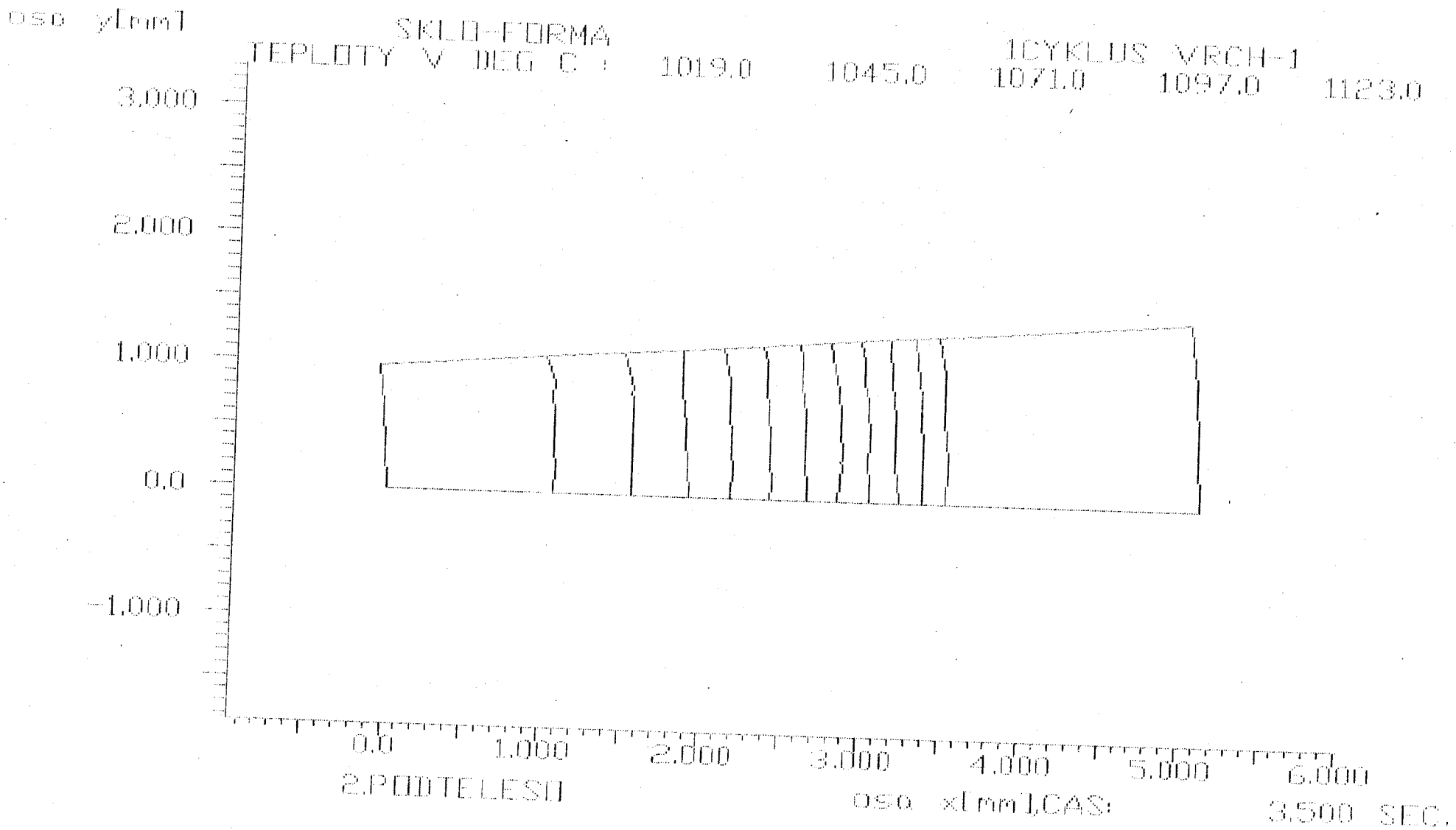
TEPLOTY V DEG C : 1026.0 1053.0 1081.0 1108.0 1135.0

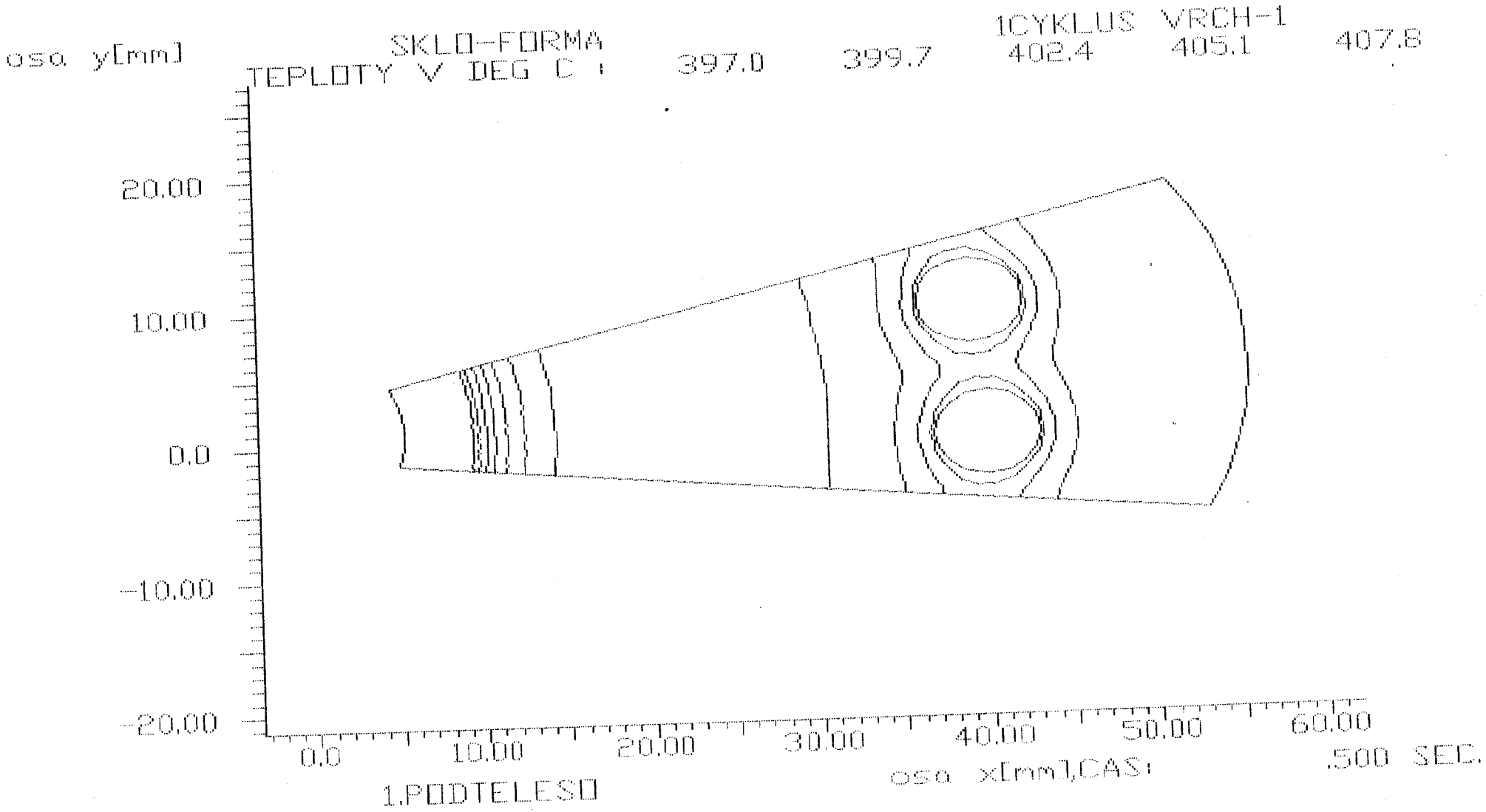


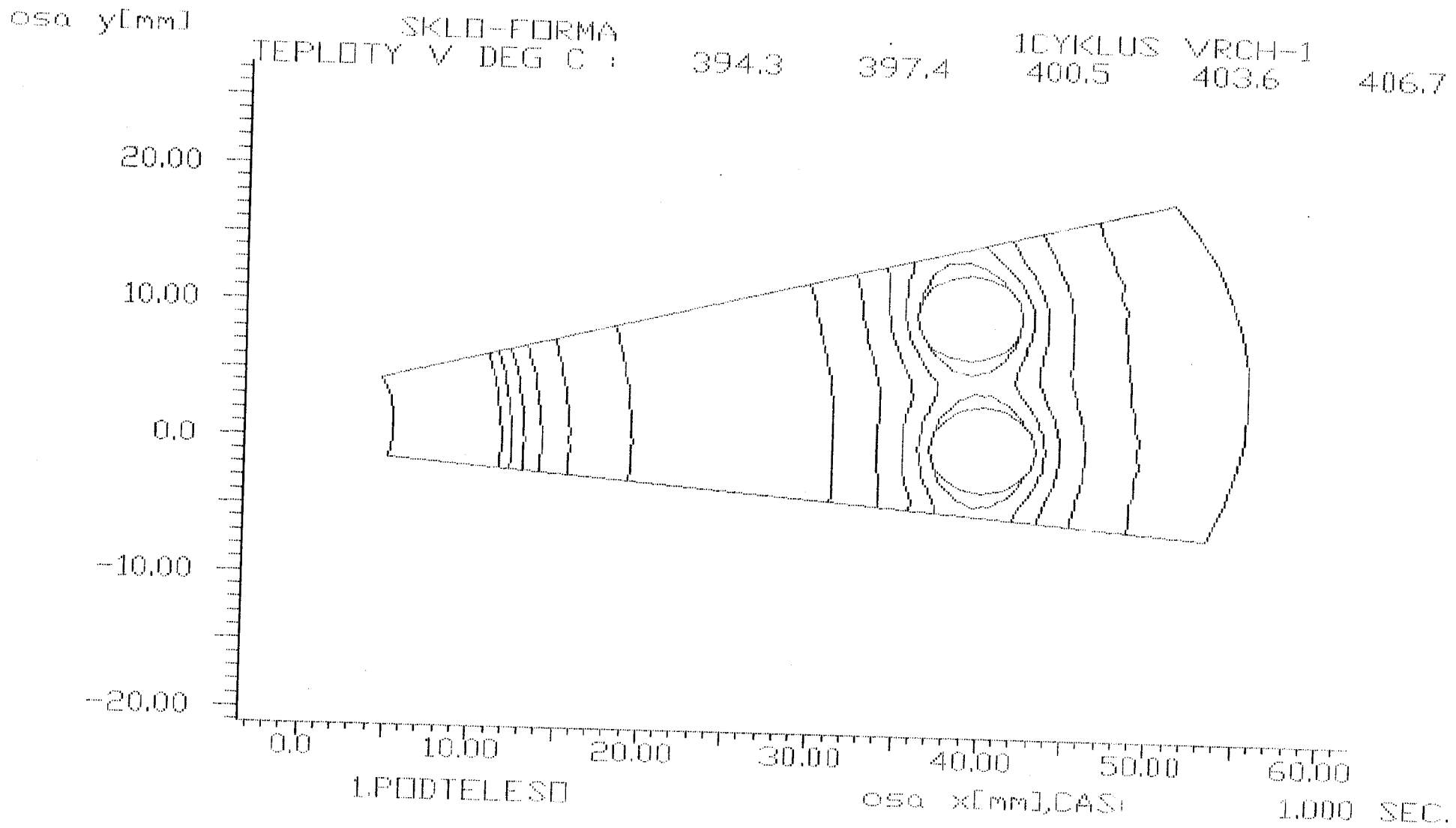
2PLIDTELESO

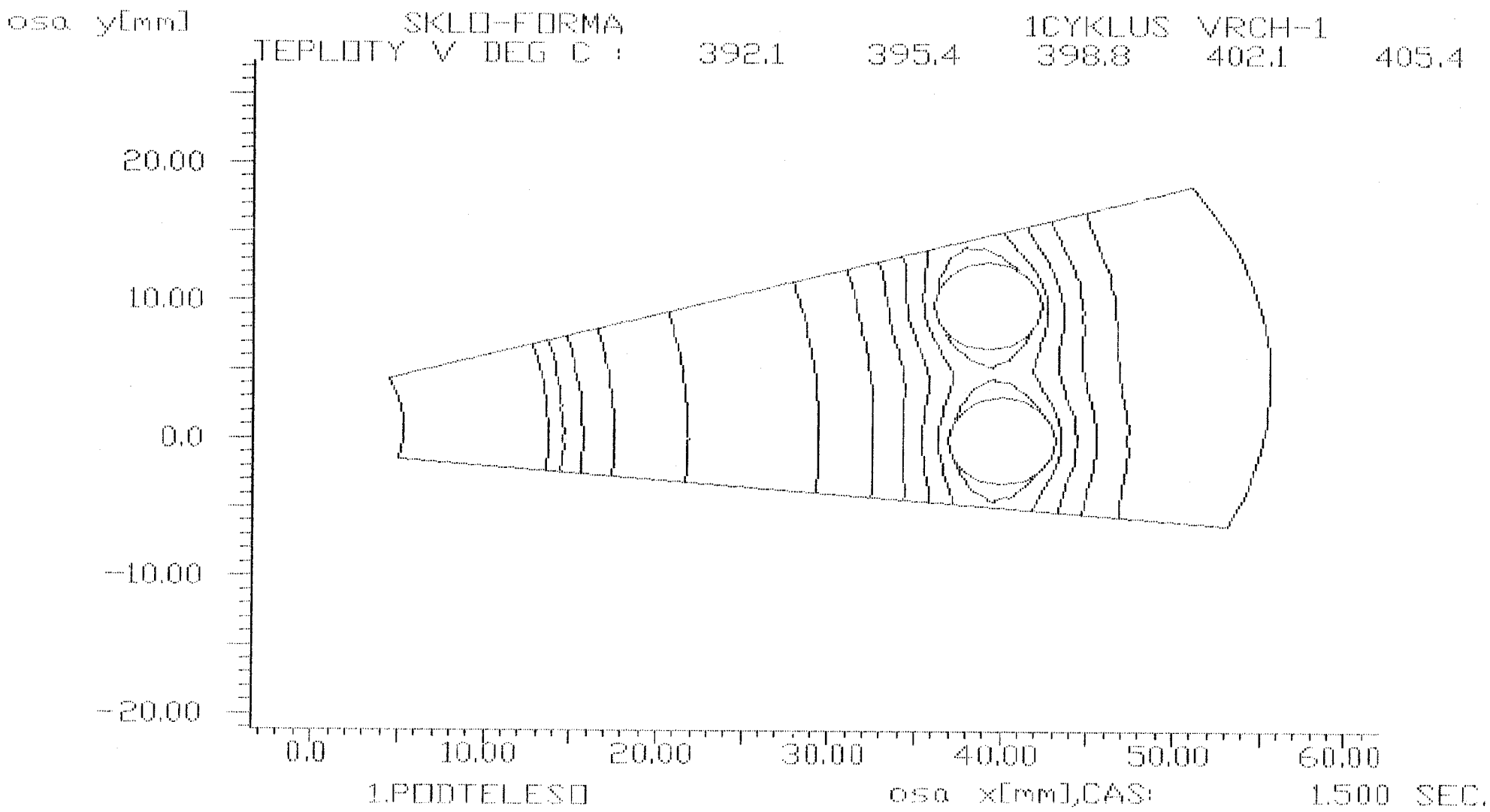
osa x[mm],CAS

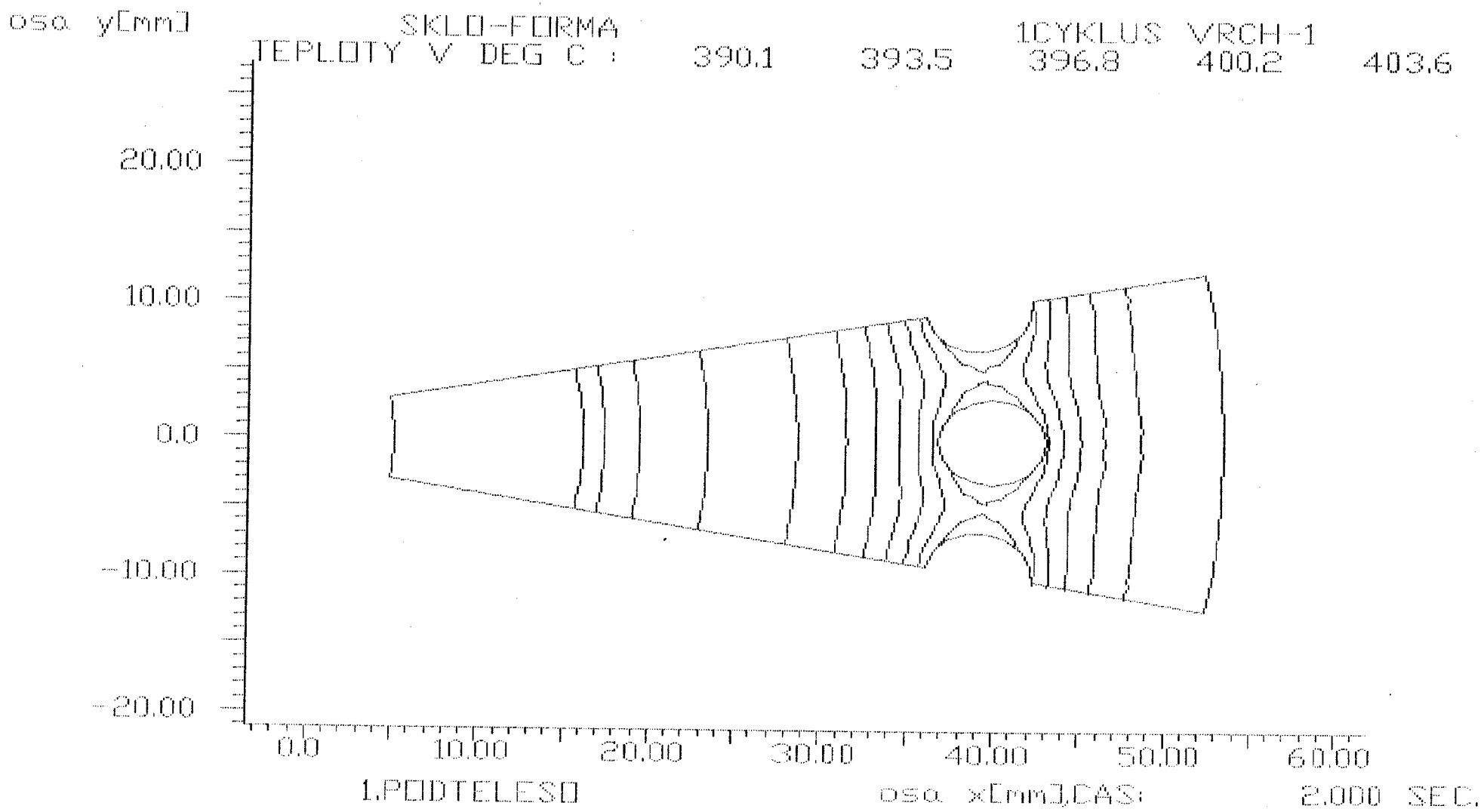
3.000 SEC.

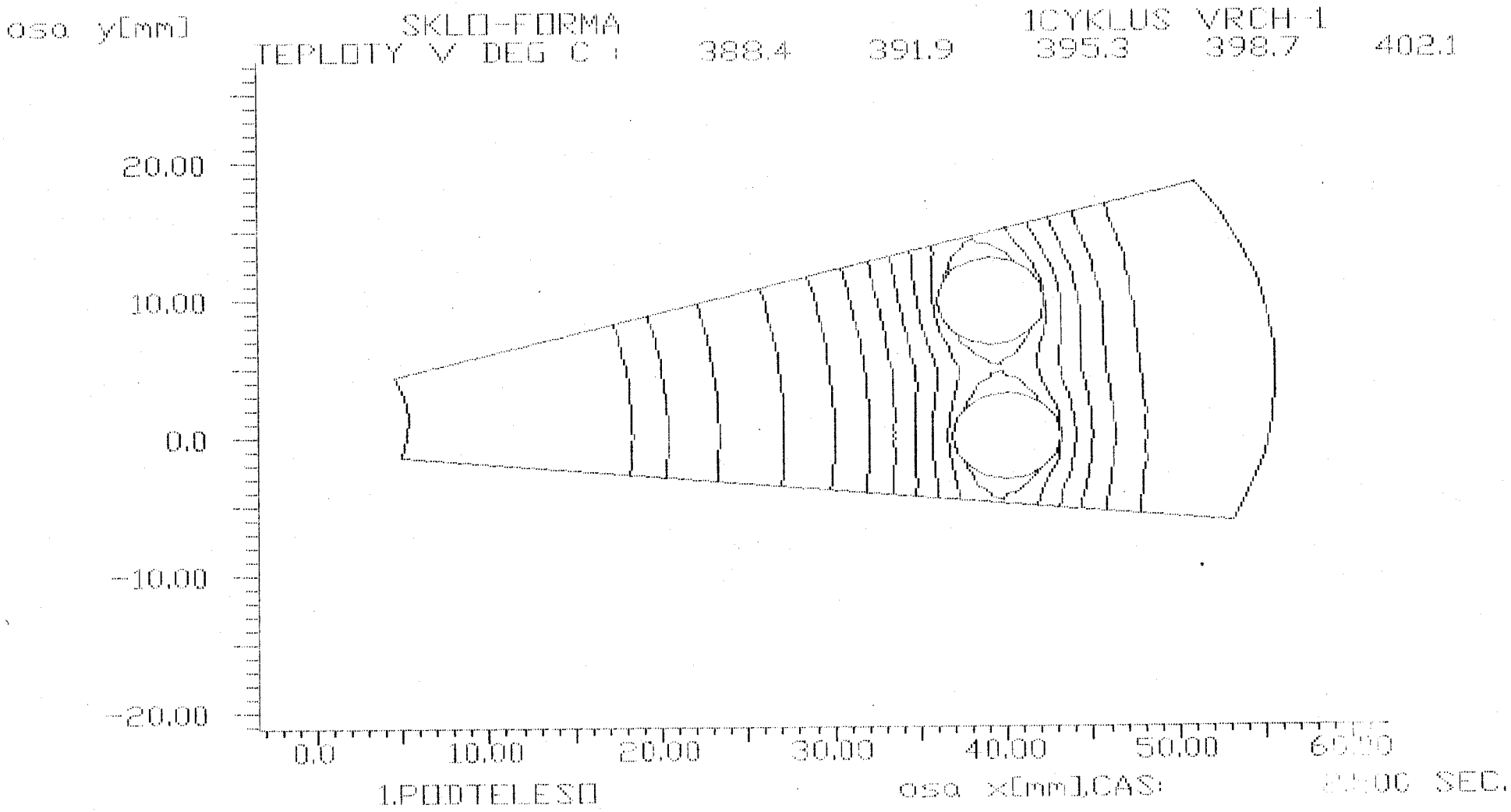

osa y[mm]
SKLO-FORMA
TEPLOTY V DEG C : 1019.0 1045.0 1071.0 1097.0 1123.0
1CYKLUS VRCH-1
3.000
2.000
1.000
0.0
-1.000
0.0
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
2.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 3.500 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
TEPLOTY V DEG C :
397.0
399.7
402.4
405.1
407.8
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
osa x[mm],CAS:
.500 SEC.
1.PODTELESO


osa y[mm]
SKLO-FORMA
TEPLOTY V DEG C :
394.3
397.4
400.5
403.6
406.7
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
1.000 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 392.1 395.4 398.8 402.1 405.4
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 1.500 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 390.1 393.5 396.8 400.2 403.6
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 2.000 SEC.

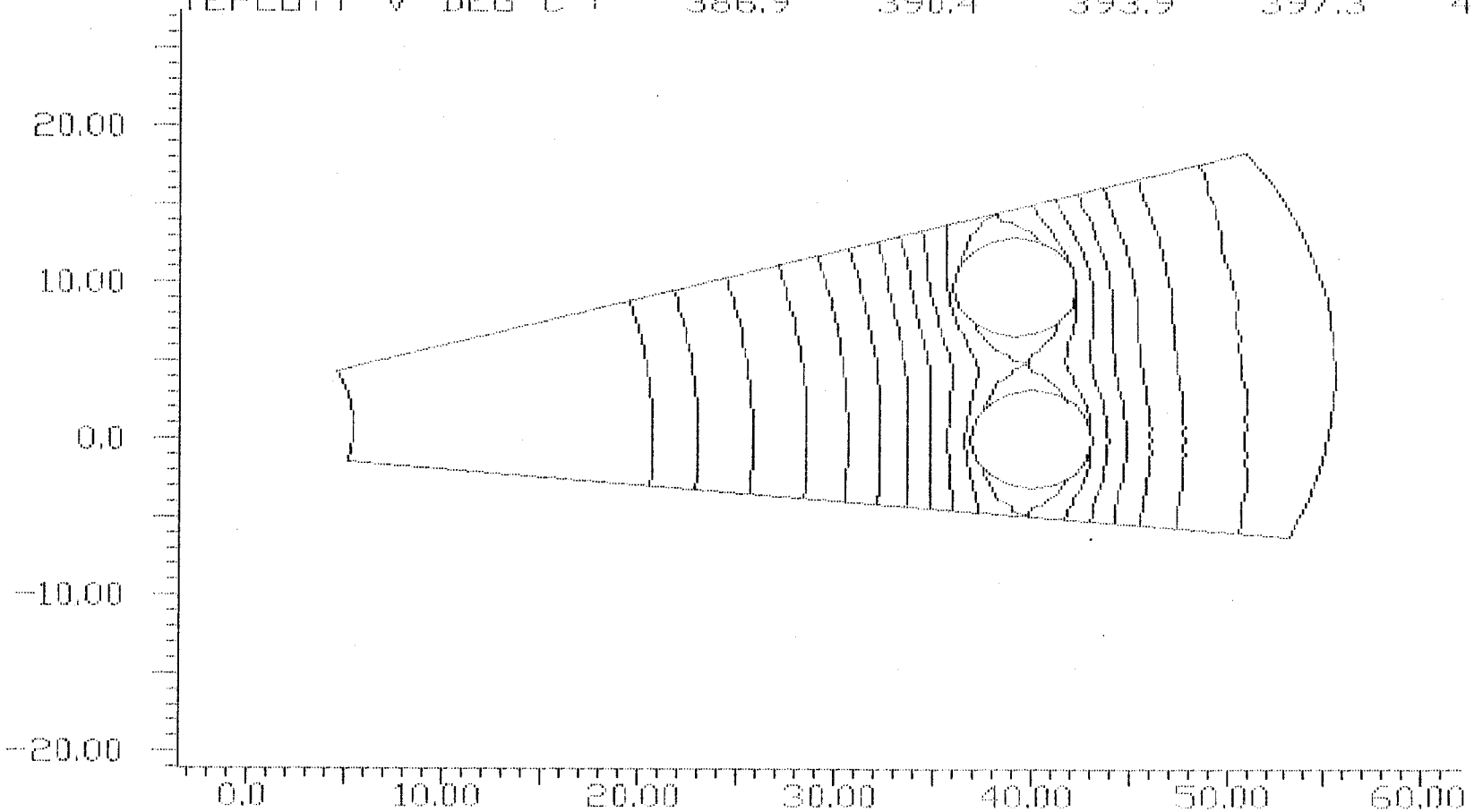

osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 388.4 391.9 395.3 398.7 402.1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
SEC.

osa y[mm]

SKLO-FORMA

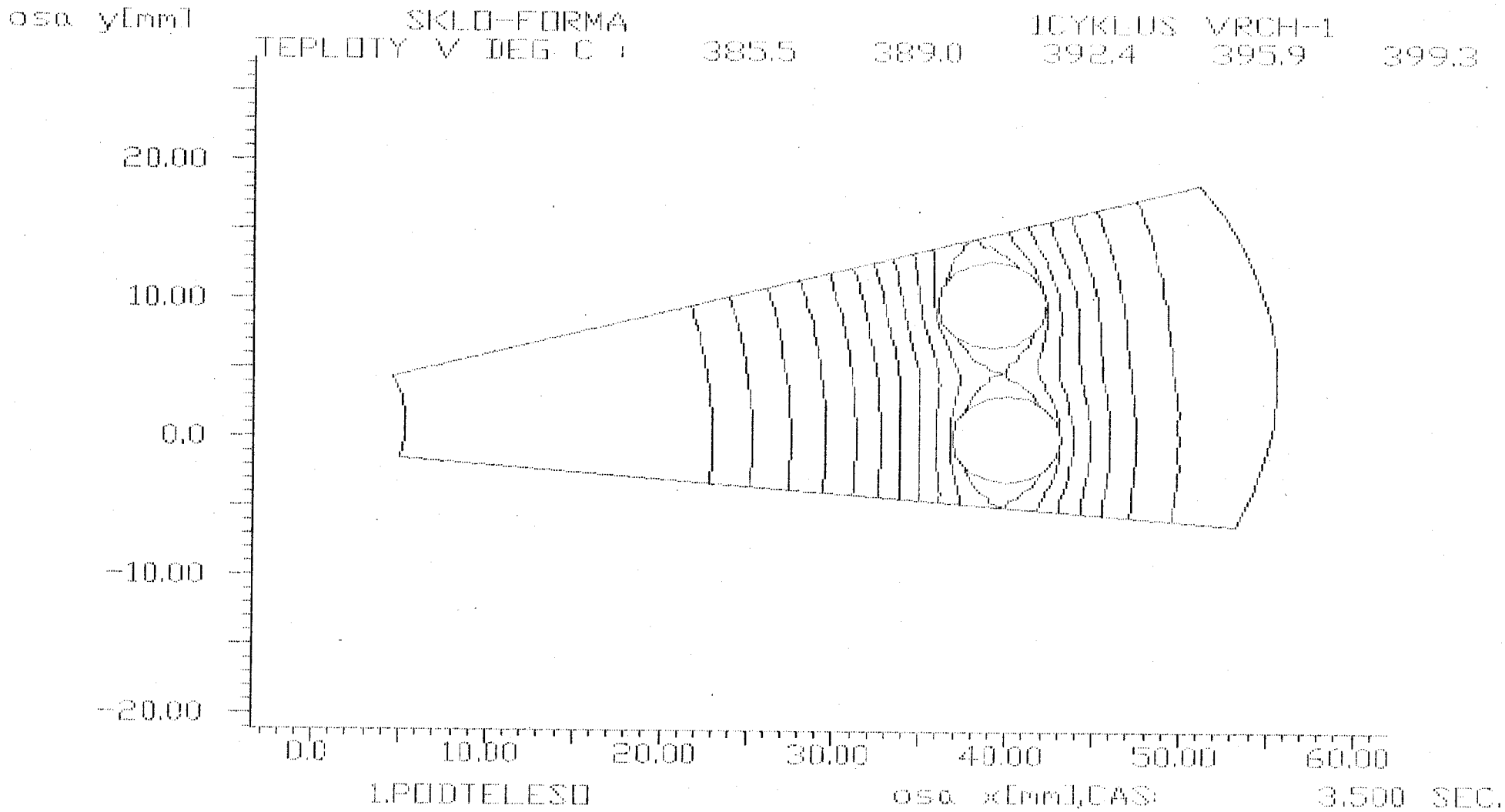
[CYKLUS VRCH-1

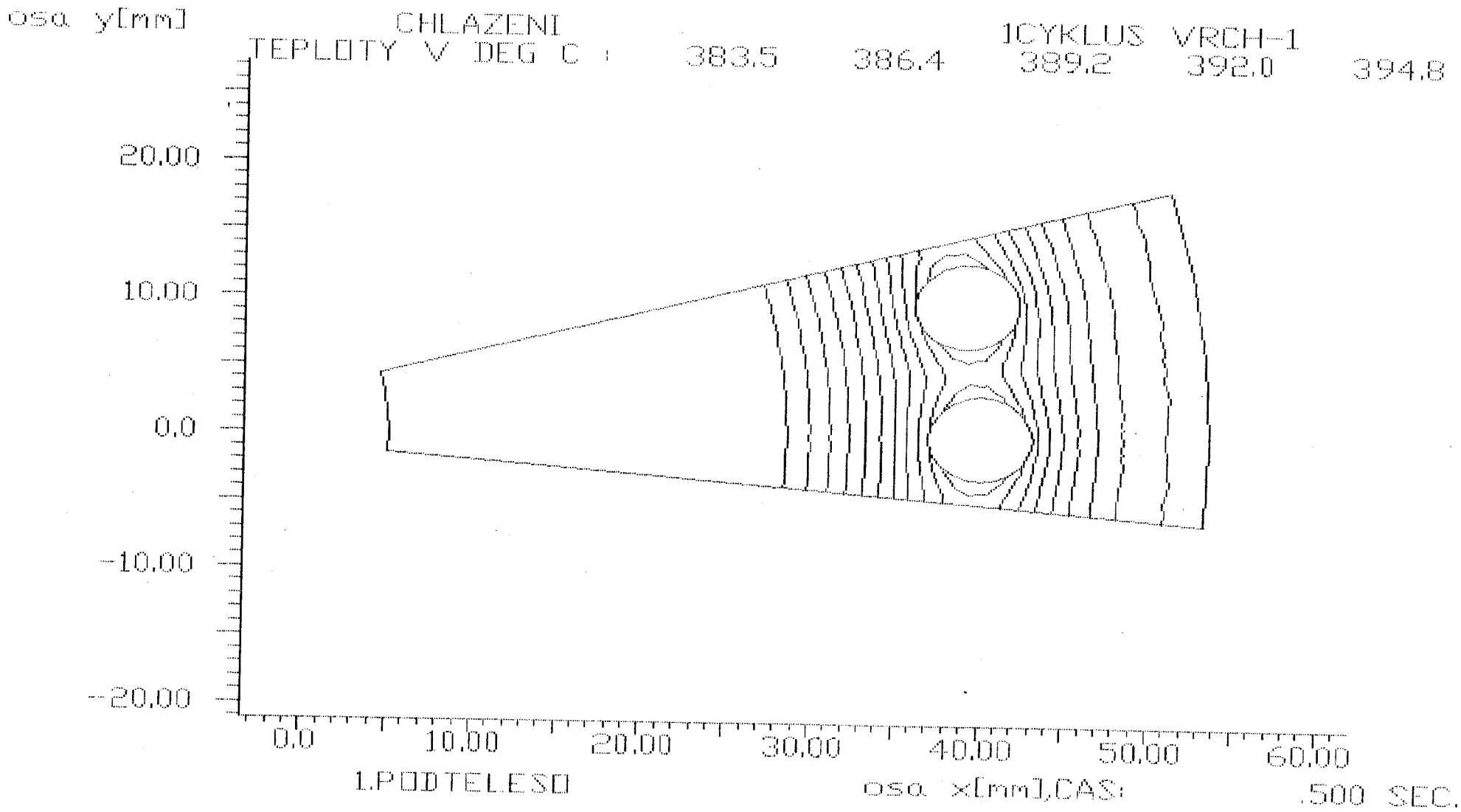
TEPLOTY V DEG C : 386.9 390.4 393.9 397.3 400.8

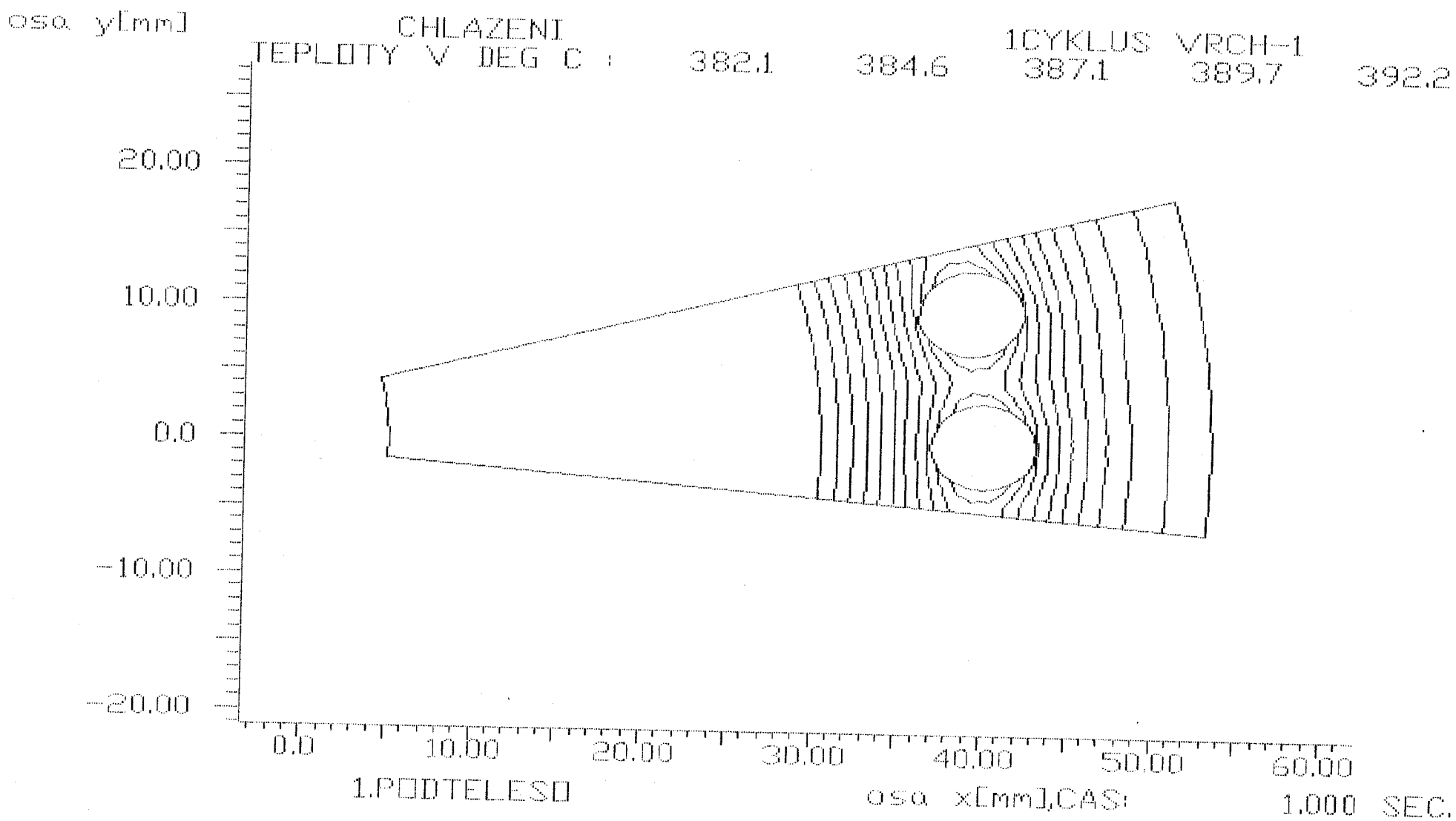


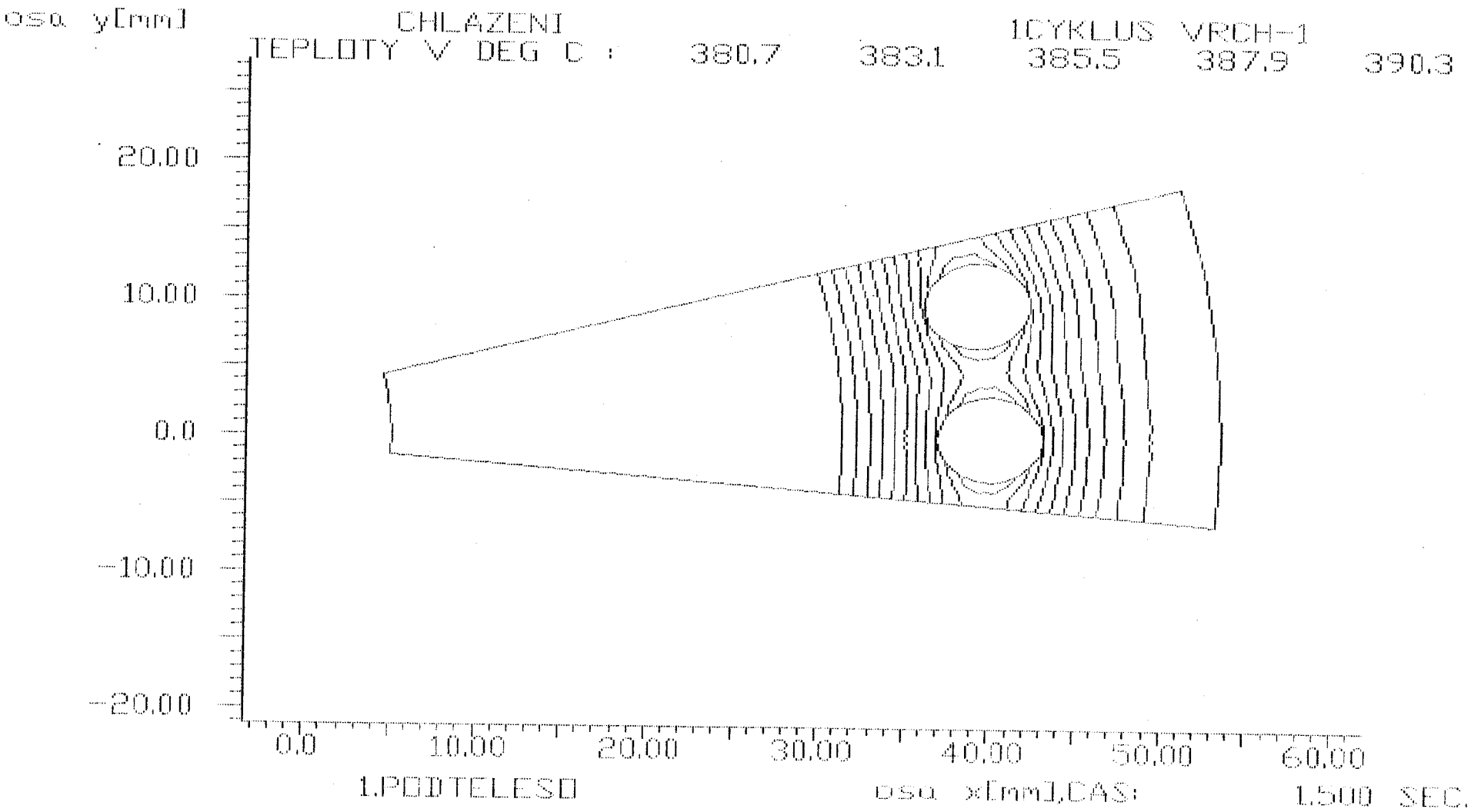
1.PODTELESO

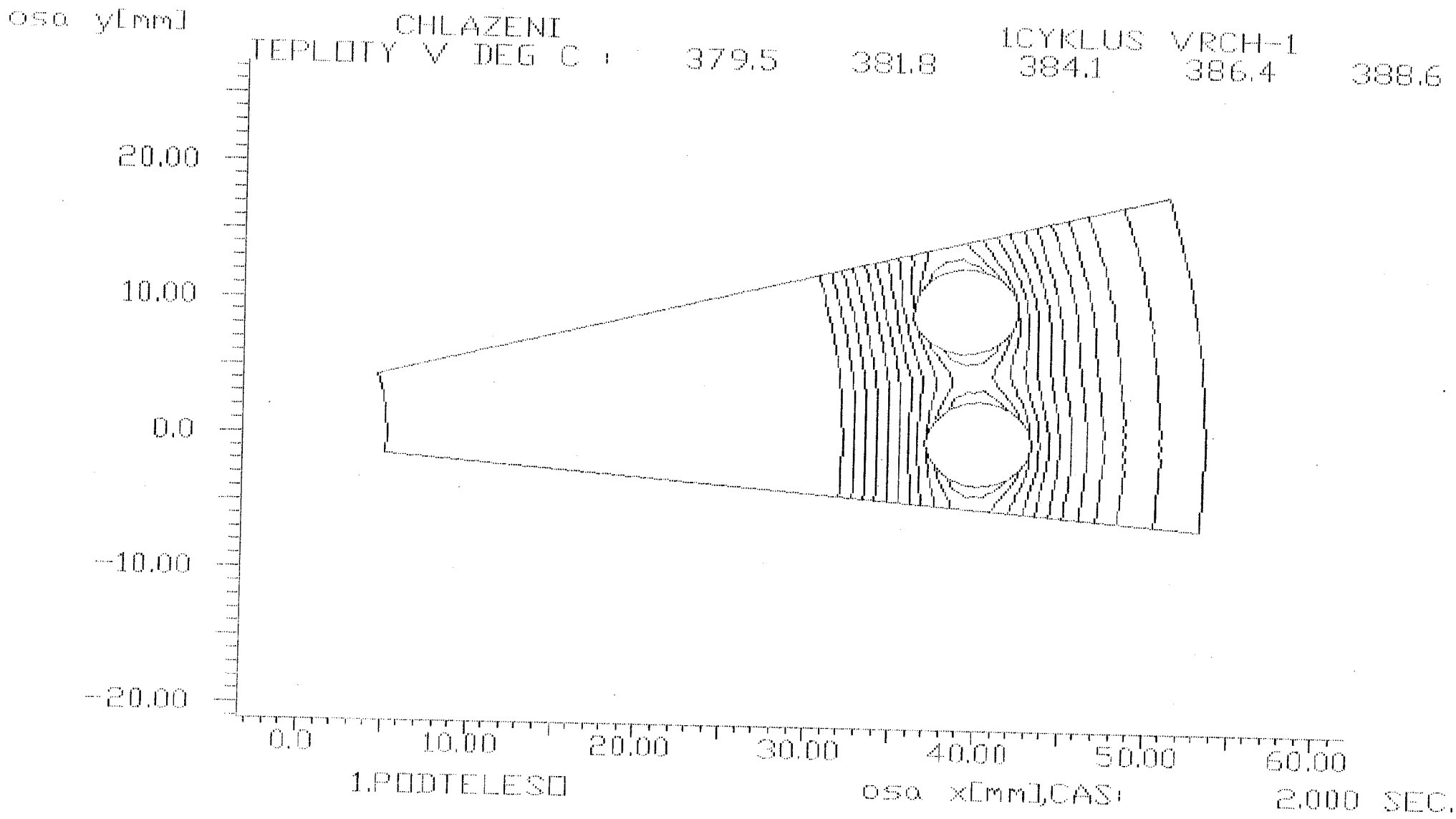
osa x[mm],CAS: 3.000 SEC.

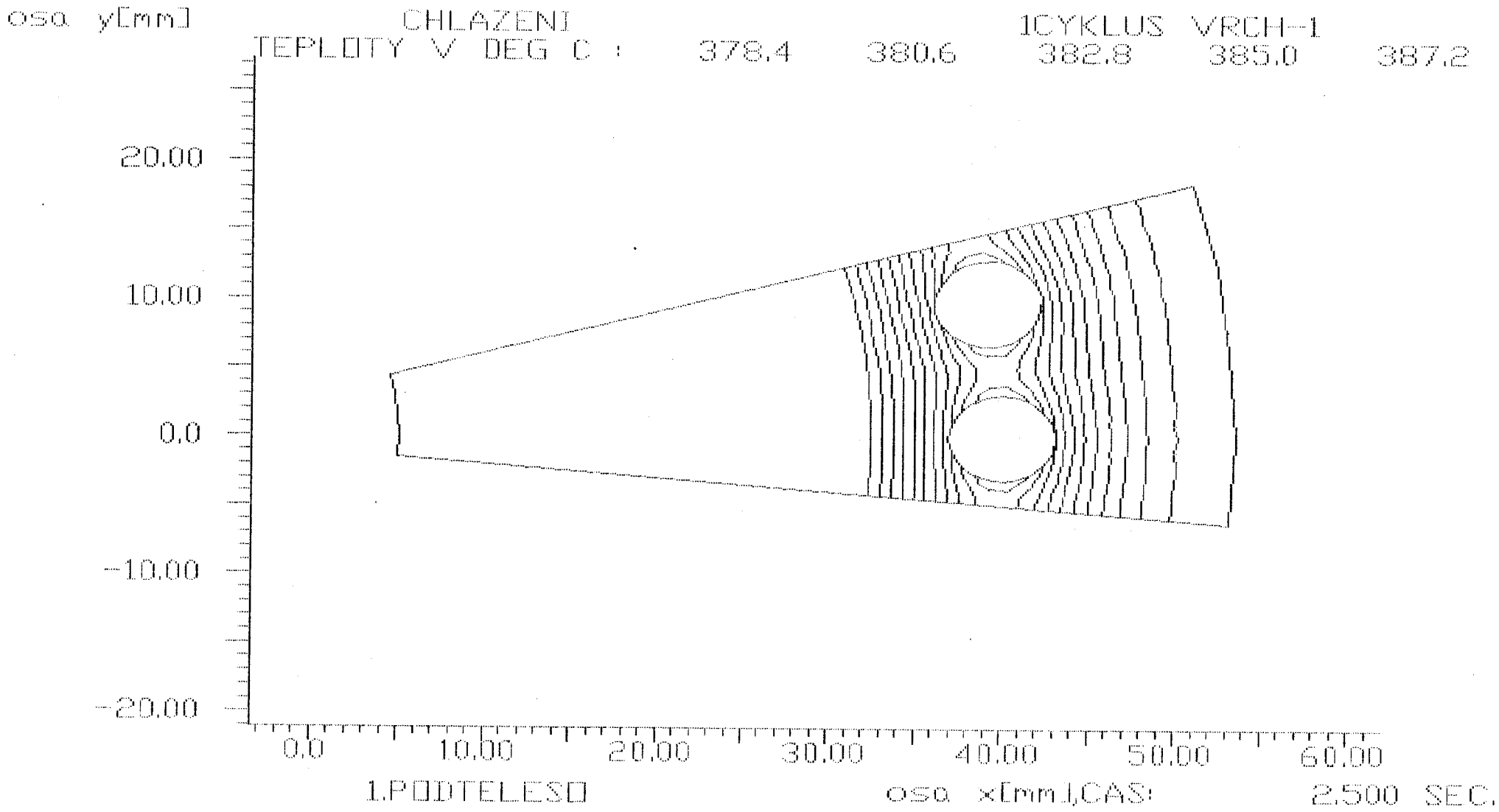

osa y[mm]
SKLO-FORMA
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 385.5 389.0 392.4 395.9 399.3
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 3.500 SEC.

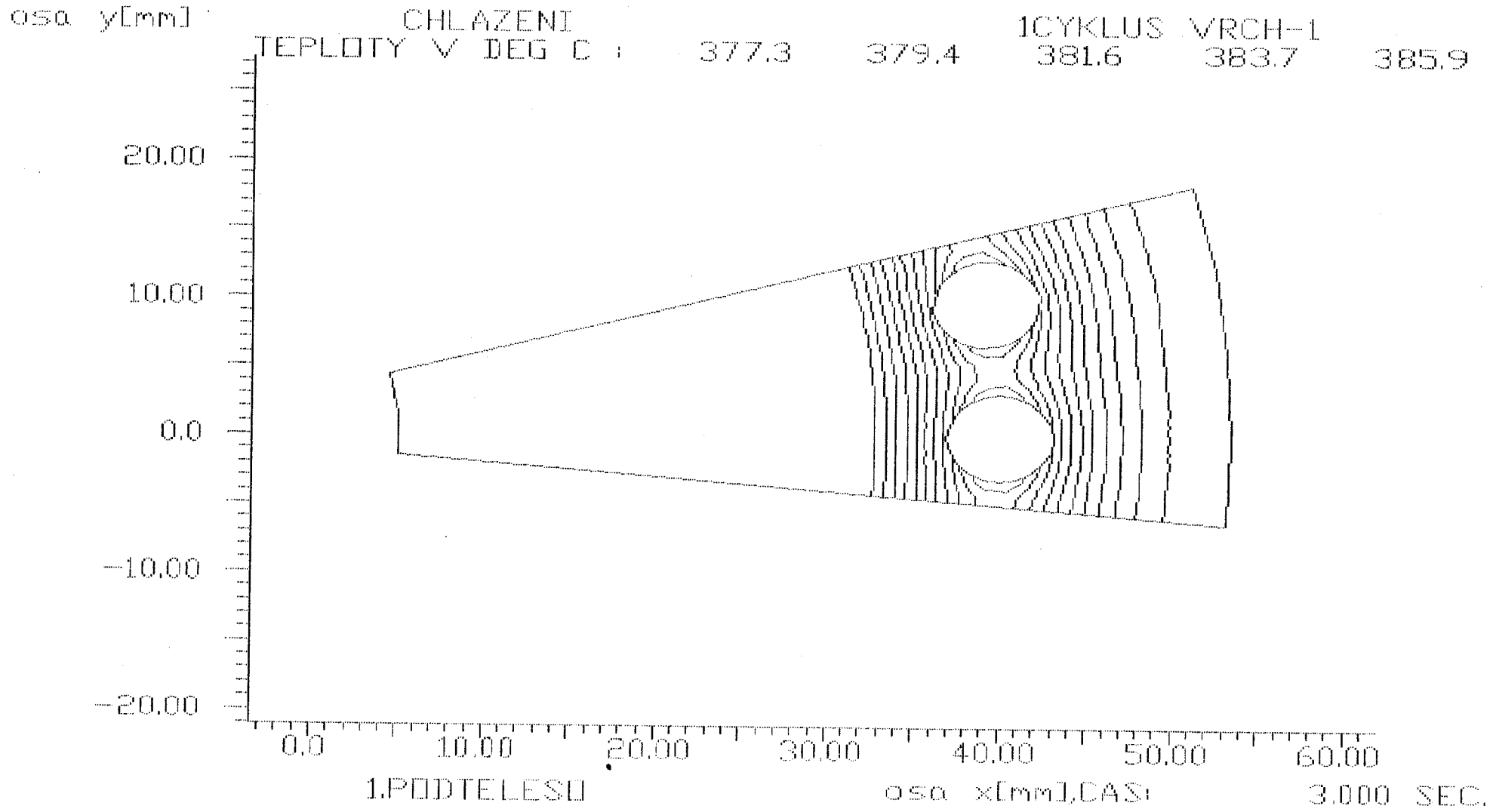

osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C : 383.5 386.4 389.2 392.0 394.8
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: .500 SEC.

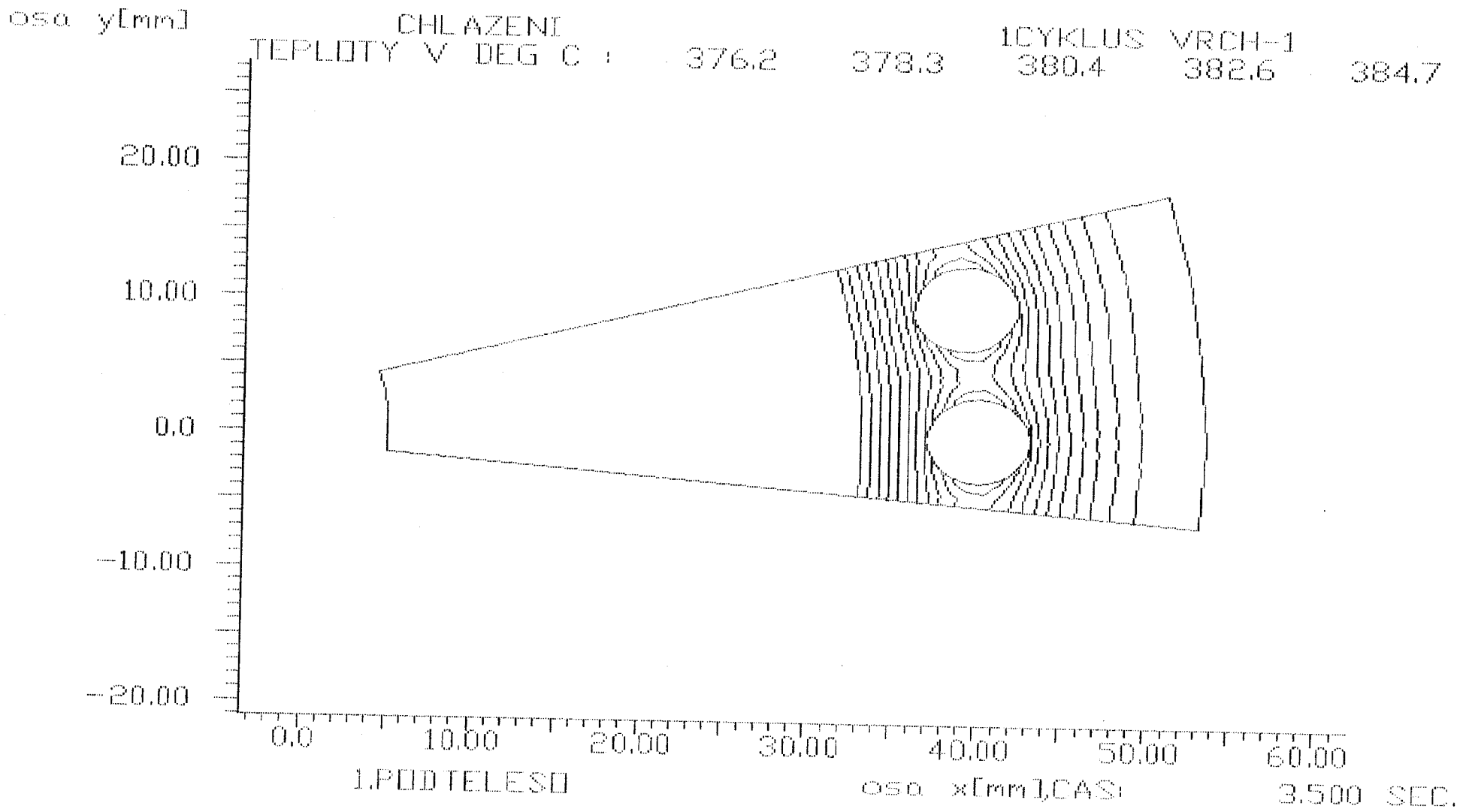

osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C : 382.1 384.6 387.1 389.7 392.2
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 1.000 SEC.

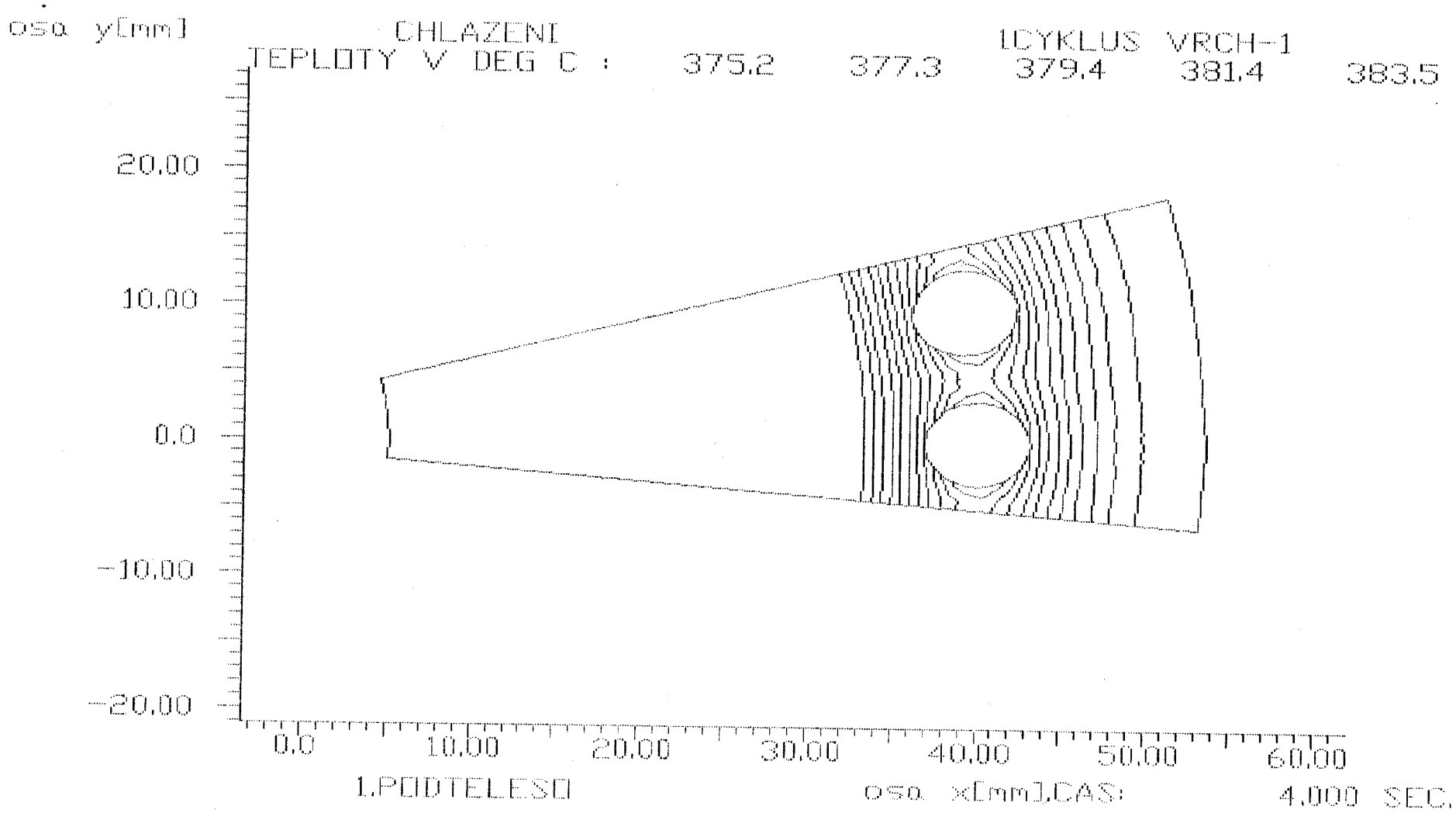

osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C :
380.7
383.1
385.5
387.9
390.3
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
1.500 SEC.

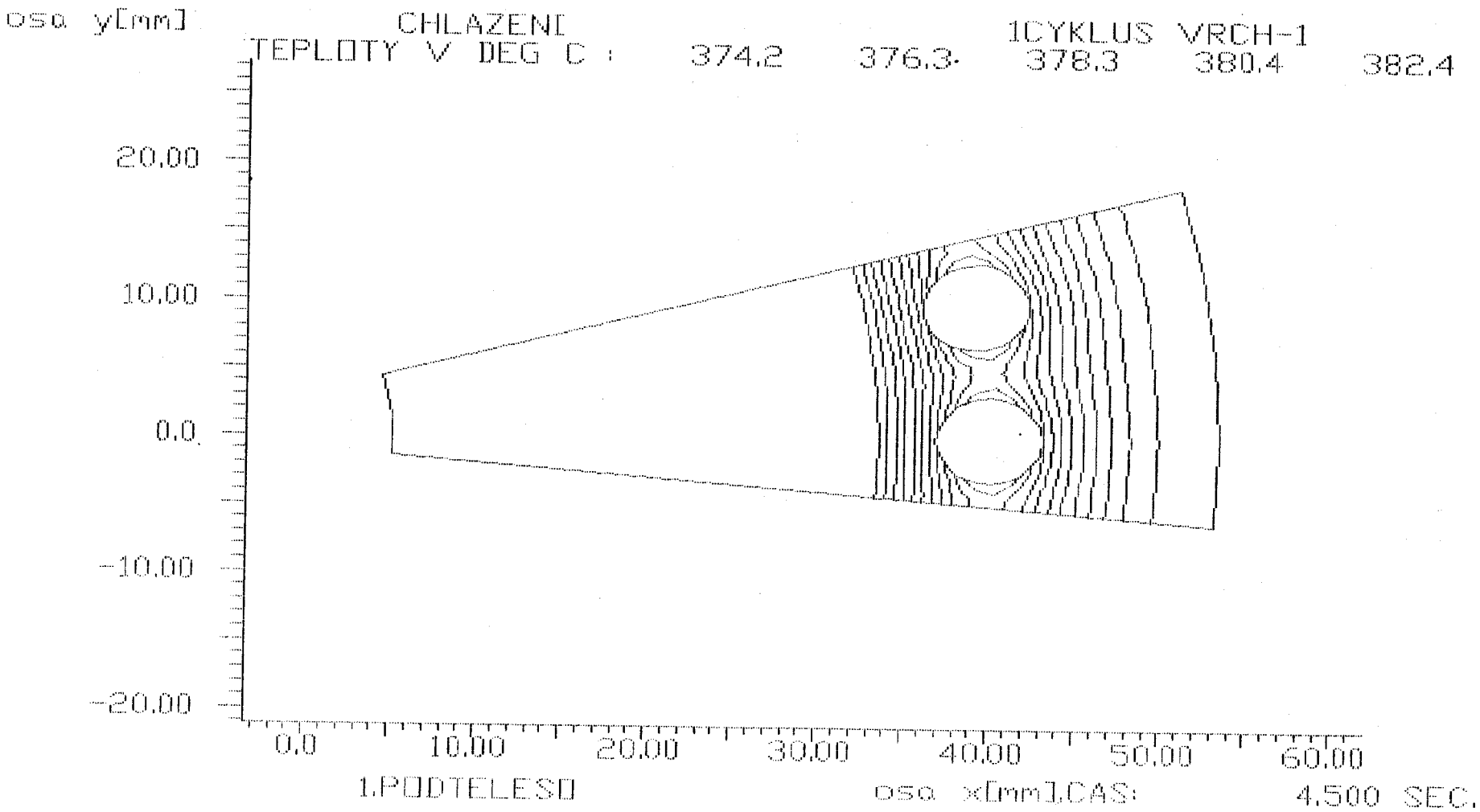

osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C :
379.5
381.8
384.1
386.4
388.6
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
2.000 SEC.


osa y[mm]
CHLAZENI
1CYKLUS VRCH-1
TEPLOTY V DEG C : 378.4 380.6 382.8 385.0 387.2
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 2.500 SEC.


osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C :
377.3
379.4
381.6
383.7
385.9
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESU
osa x[mm],CAS:
3.000 SEC.


osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C : 376.2 378.3 380.4 382.6 384.7
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 3.500 SEC.


osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C : 375.2 377.3 379.4 381.4 383.5
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 4.000 SEC.

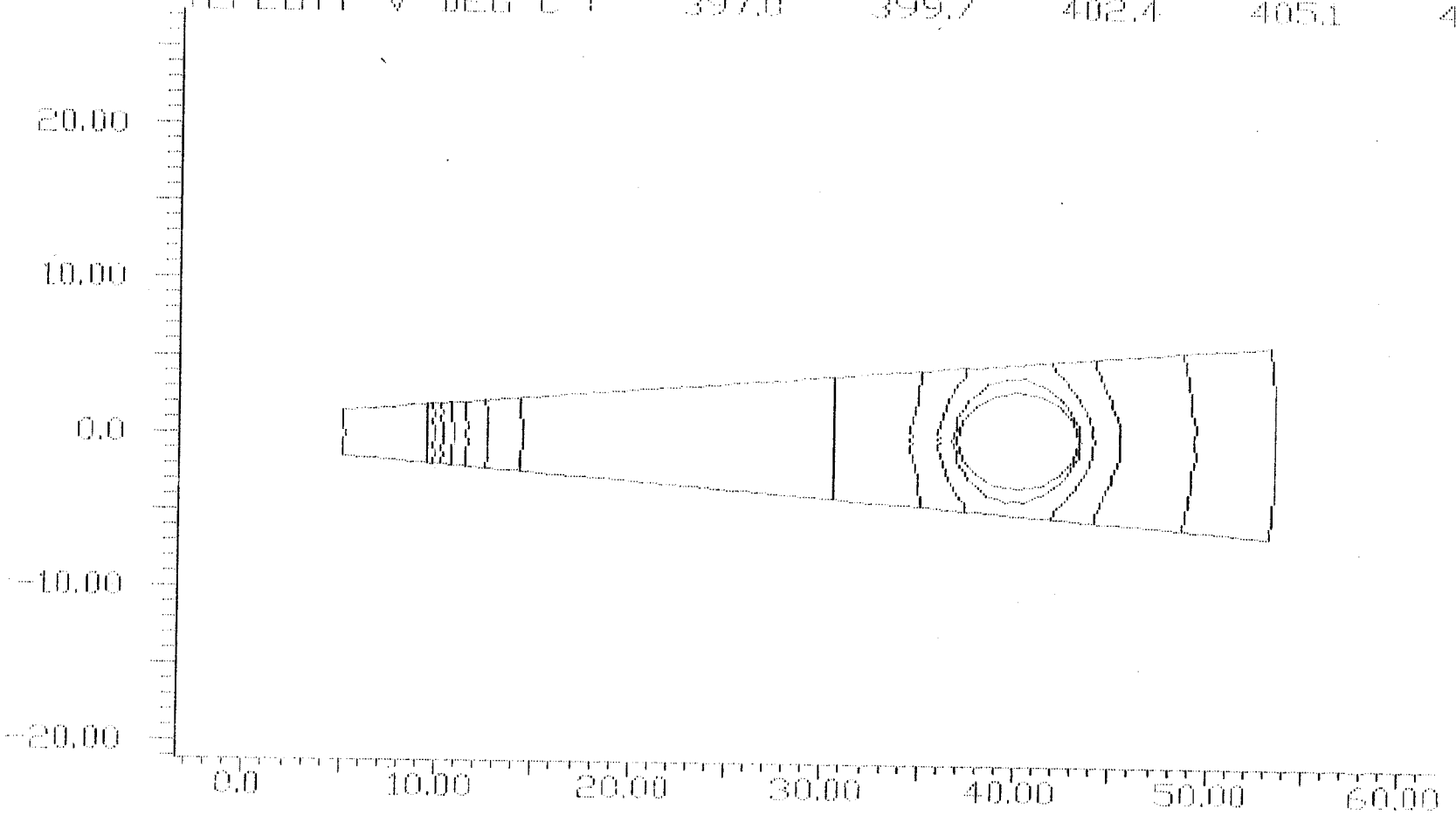

osa y[mm]
CHLAZENI
TEPLOTY V DEG C : 374.2 376.3 378.3 380.4 382.4
1CYKLUS VRCH-1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm].CAS: 4.500 SEC.

osa y[mm]

SKLO-FORMA

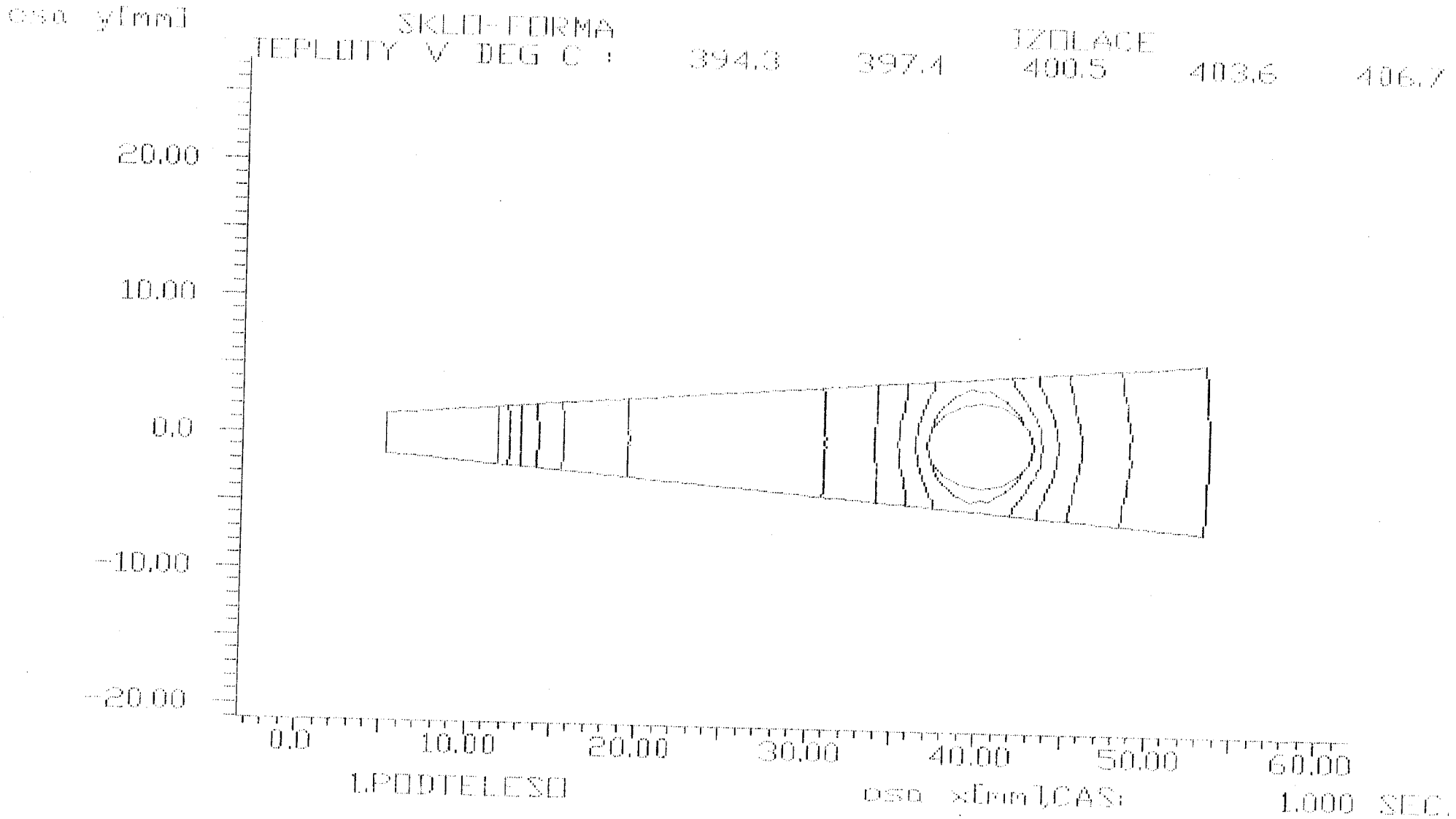
IZOLACE

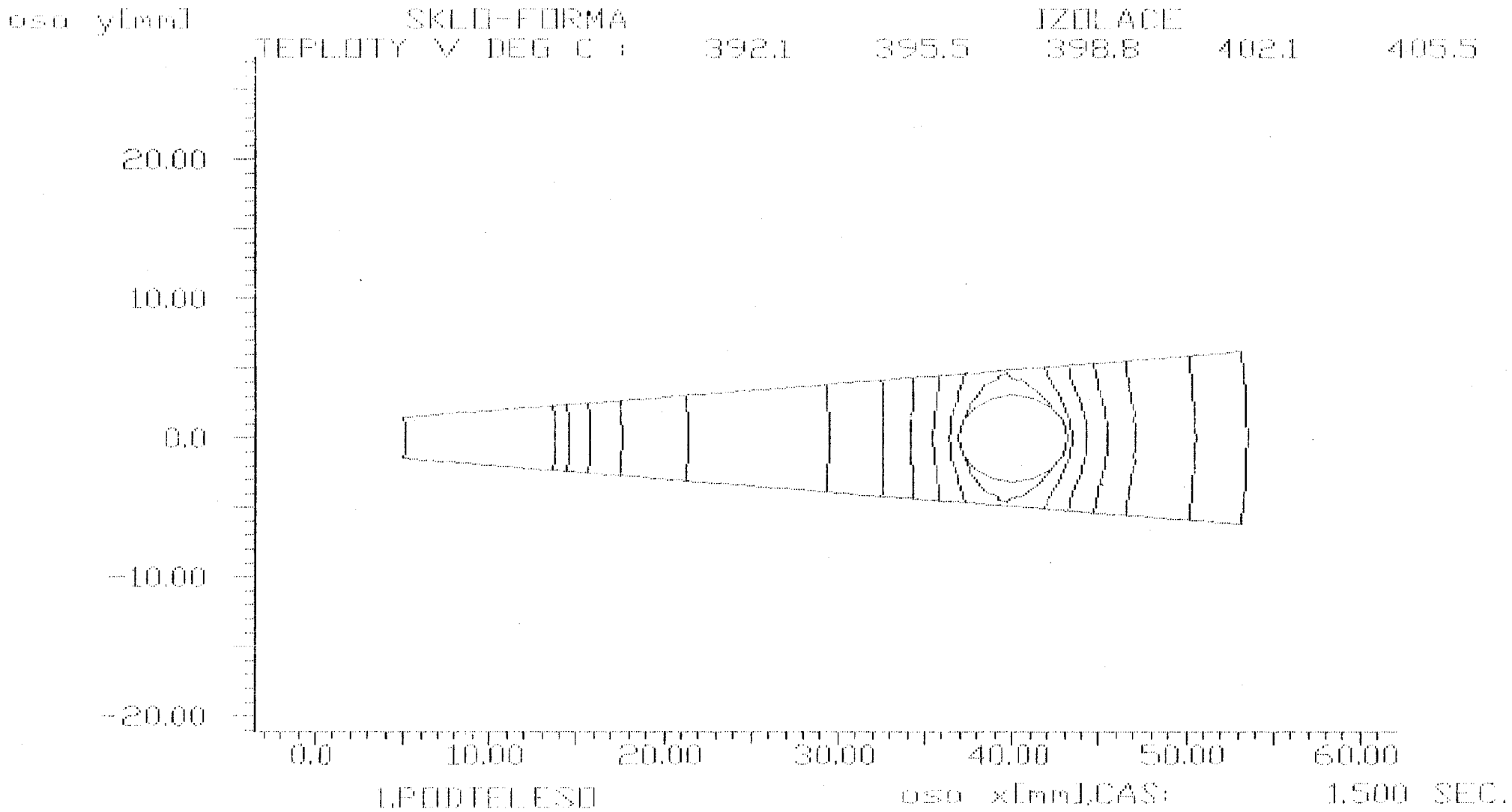
TEPLOTY V DEG C : 397.0 399.7 402.4 405.1 407.8

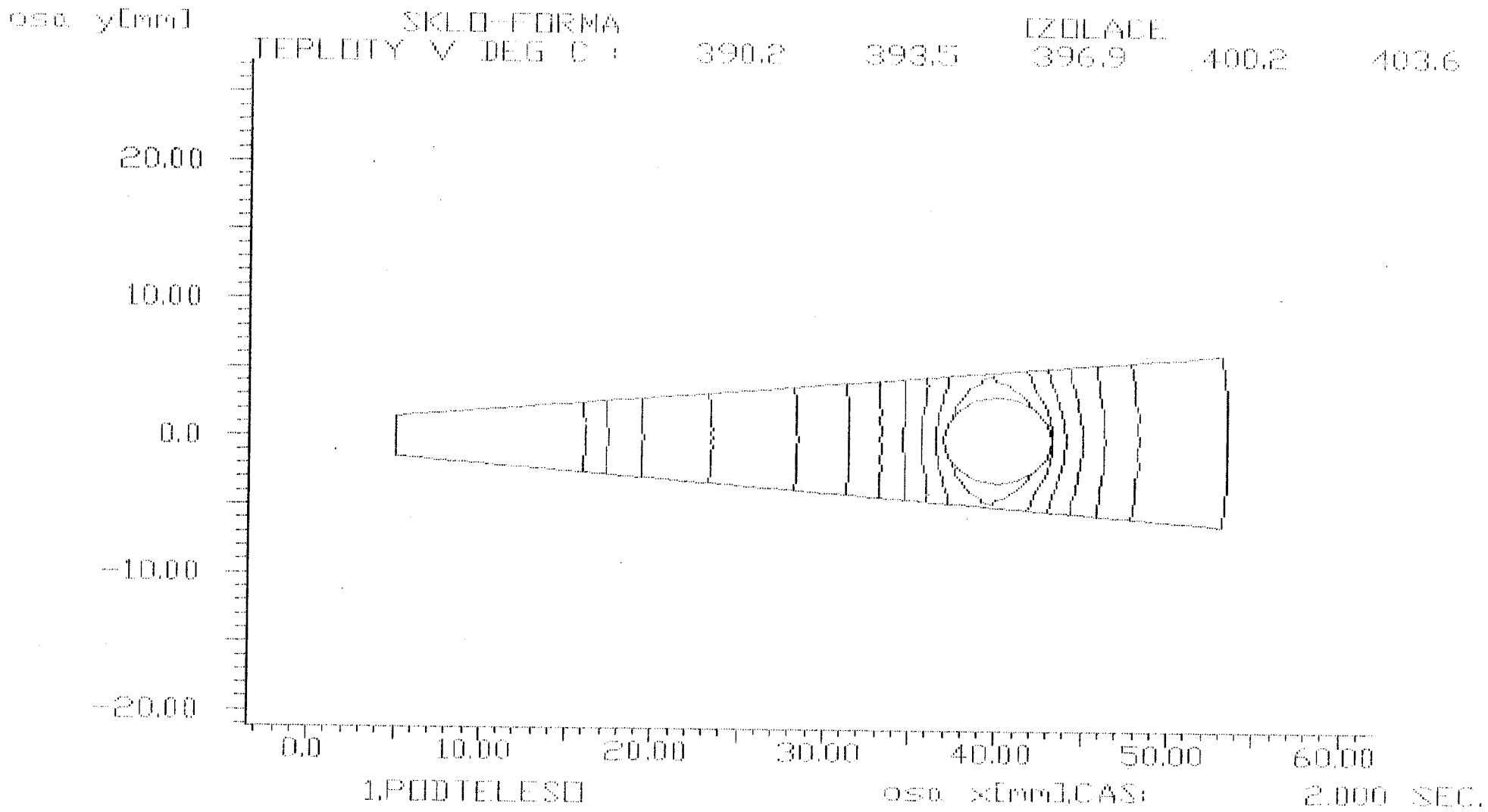


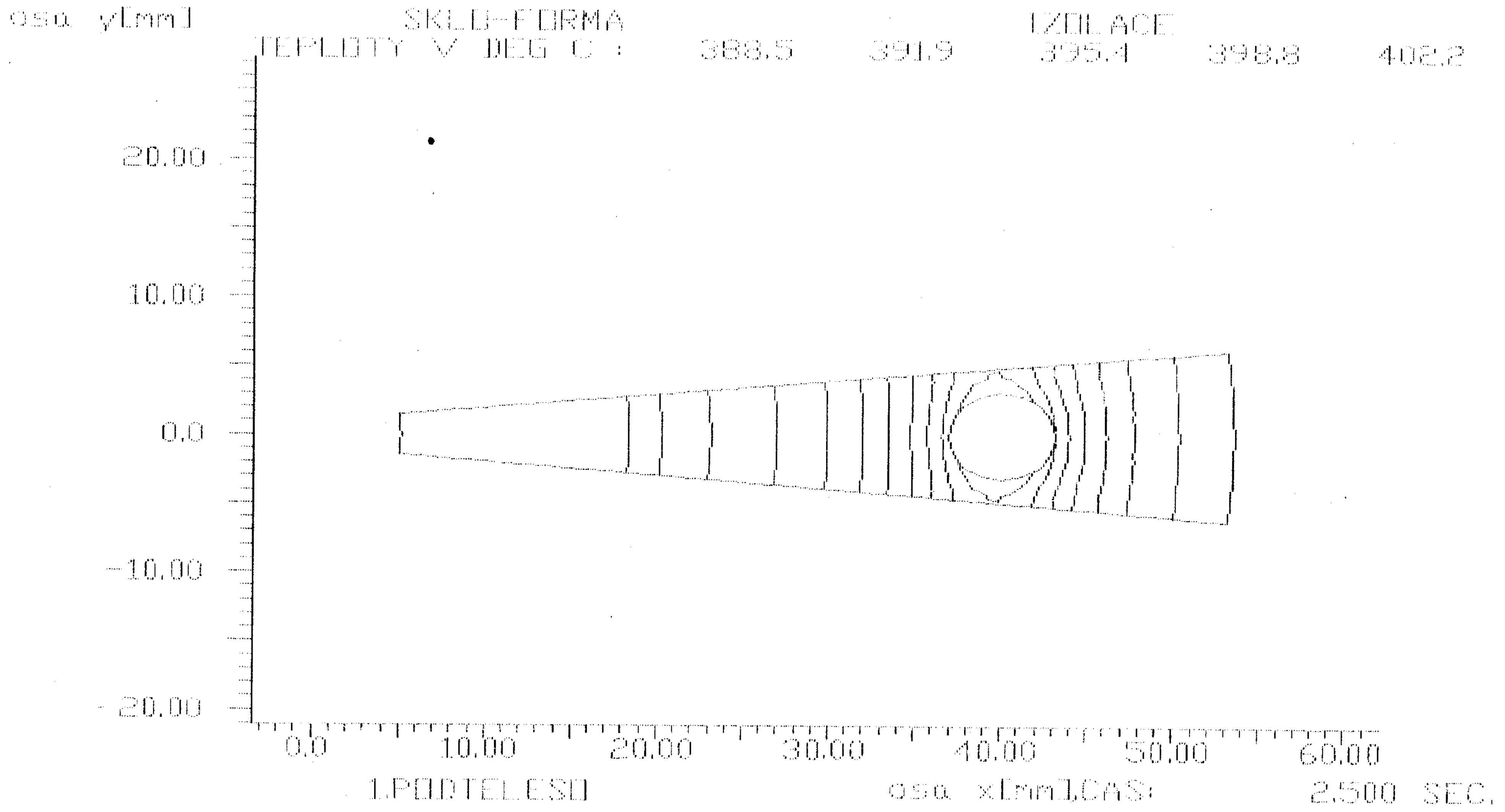
1.PLODTELESO

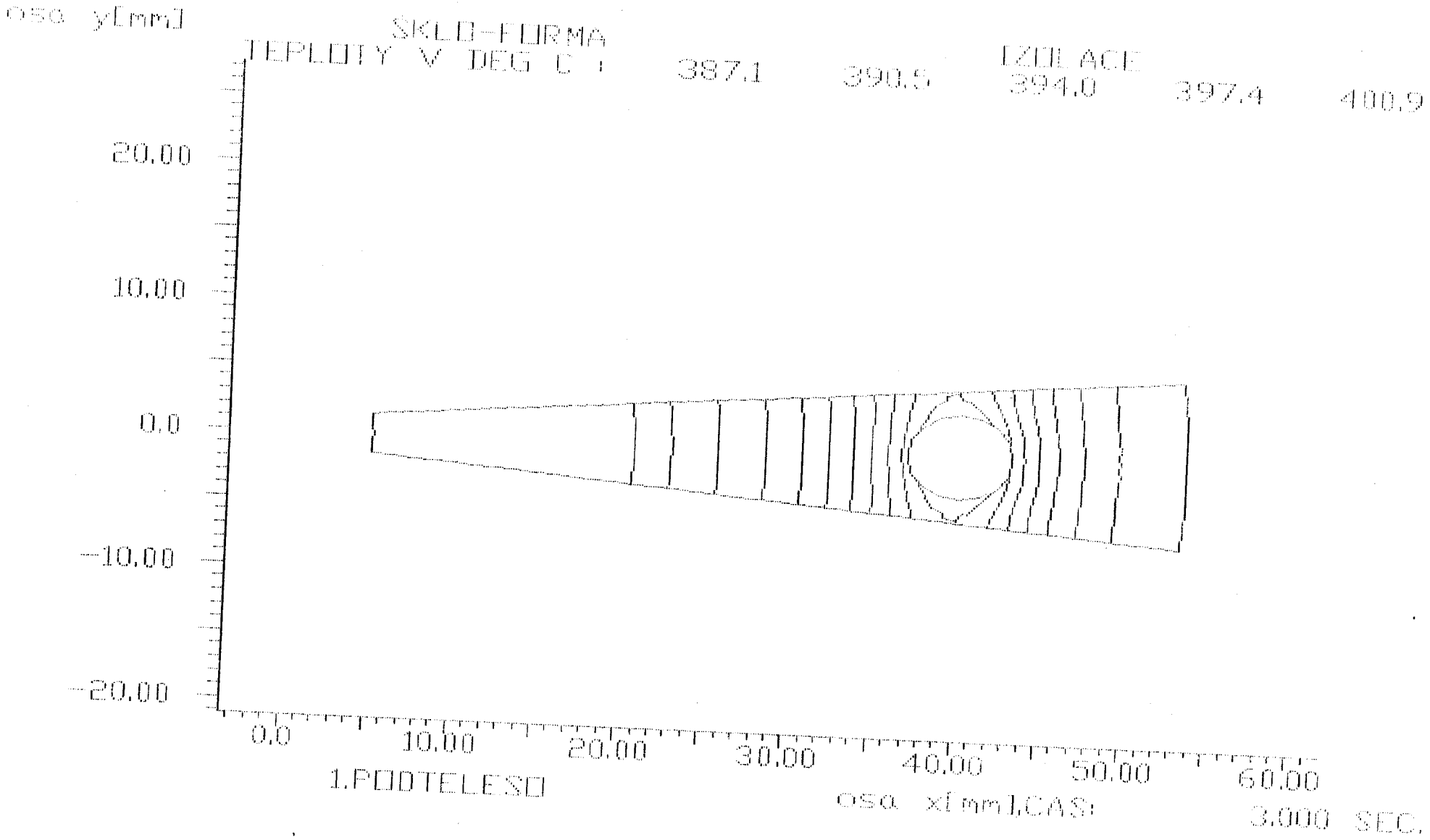
osa x[mm]CAS: .500 SEC.


osa y[mm]
SKLEP-FORMA
TEPLOTY V DEG C :
394.3
397.4
400.5
403.6
406.7
IZOLACE
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
1.000 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 392.1 395.5 398.8 402.1 405.5
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
LPODTELESO
osa x[mm],CAS: 1.500 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 390.2 393.5 396.9 400.2 403.6
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 2.000 SEC.


osa y[mm]
SKLO-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C :
388.5
391.9
395.4
398.8
402.2
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm]CAS:
2.500 SEC.

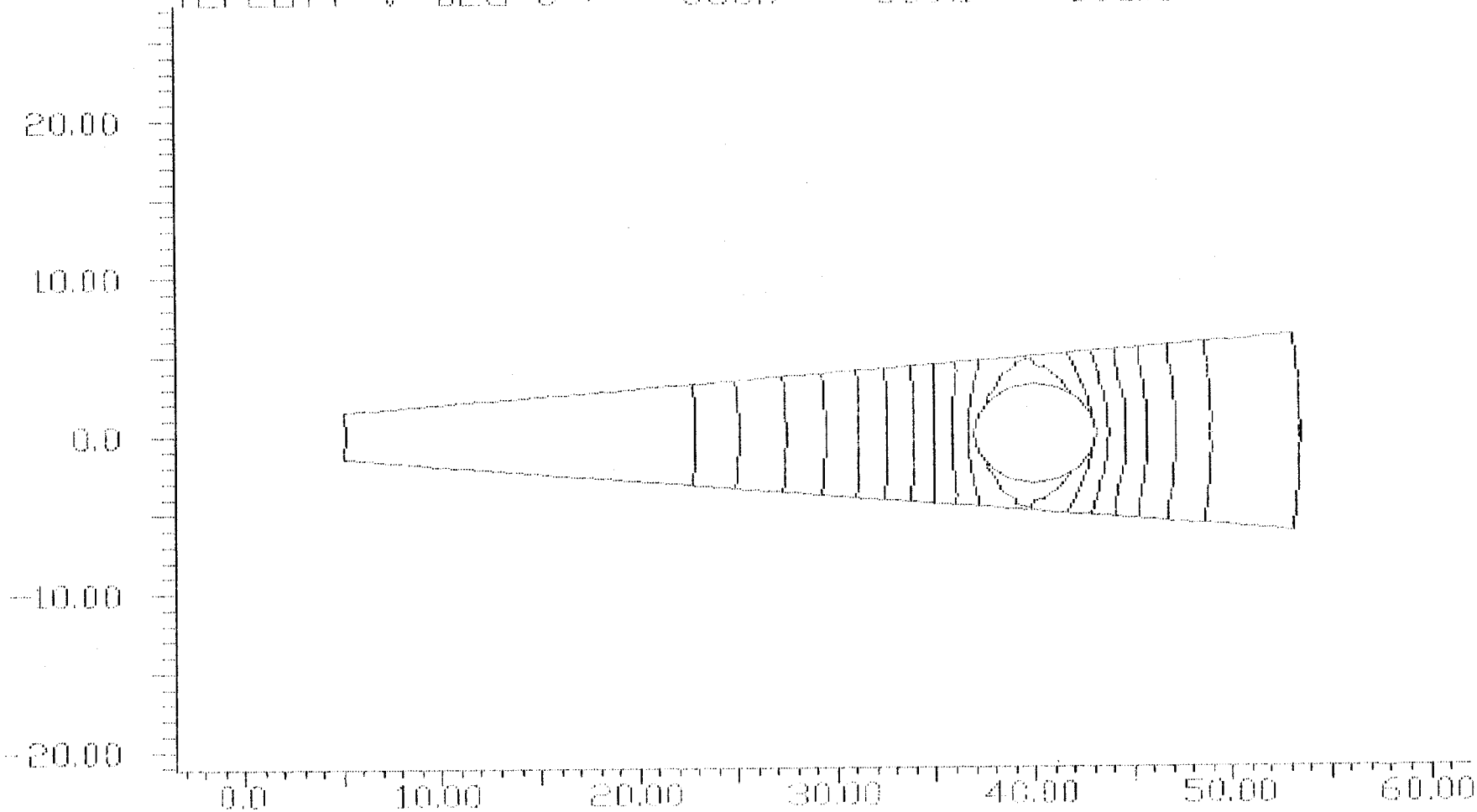

osa y[mm]
SKLO-FORMA
TEPLOTY V DEG C :
387.1
390.5
394.0
397.4
400.9
IZOLACE
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS:
3.000 SEC.

osa y[mm]

SKLO-FORMA

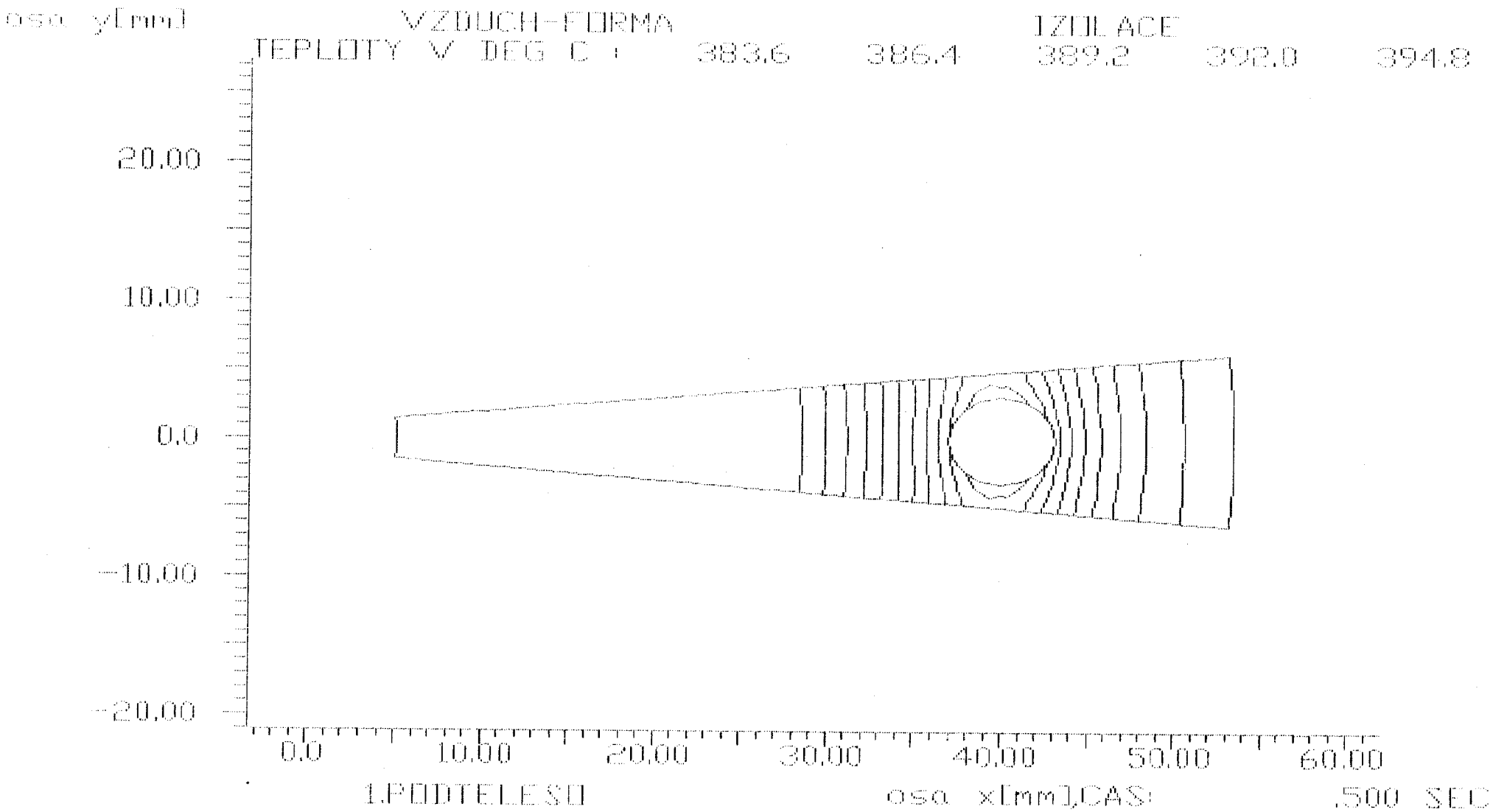
IZOLACE

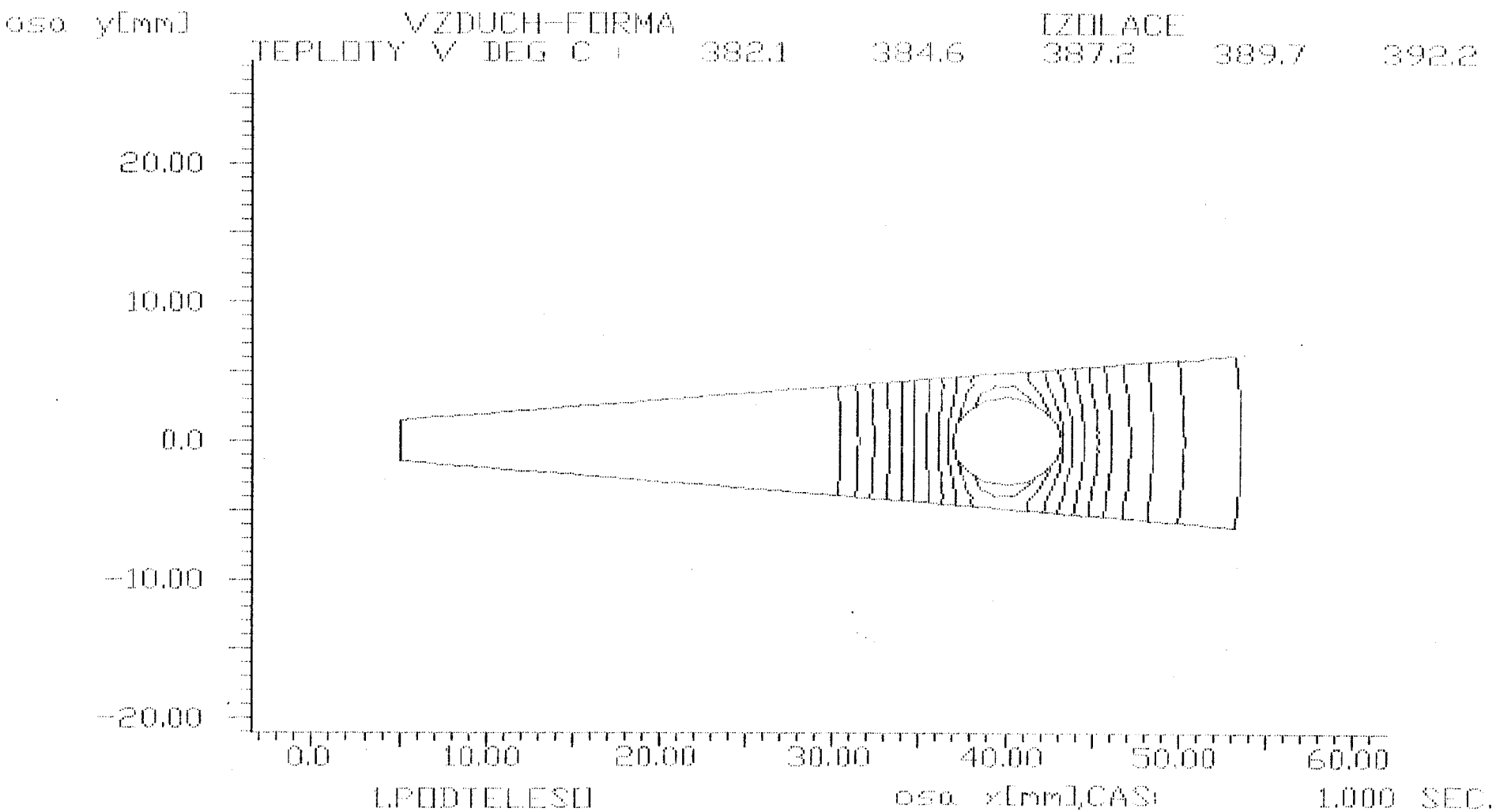
TEPLOTY V DEG C : 385.7 389.1 392.6 396.0 399.5

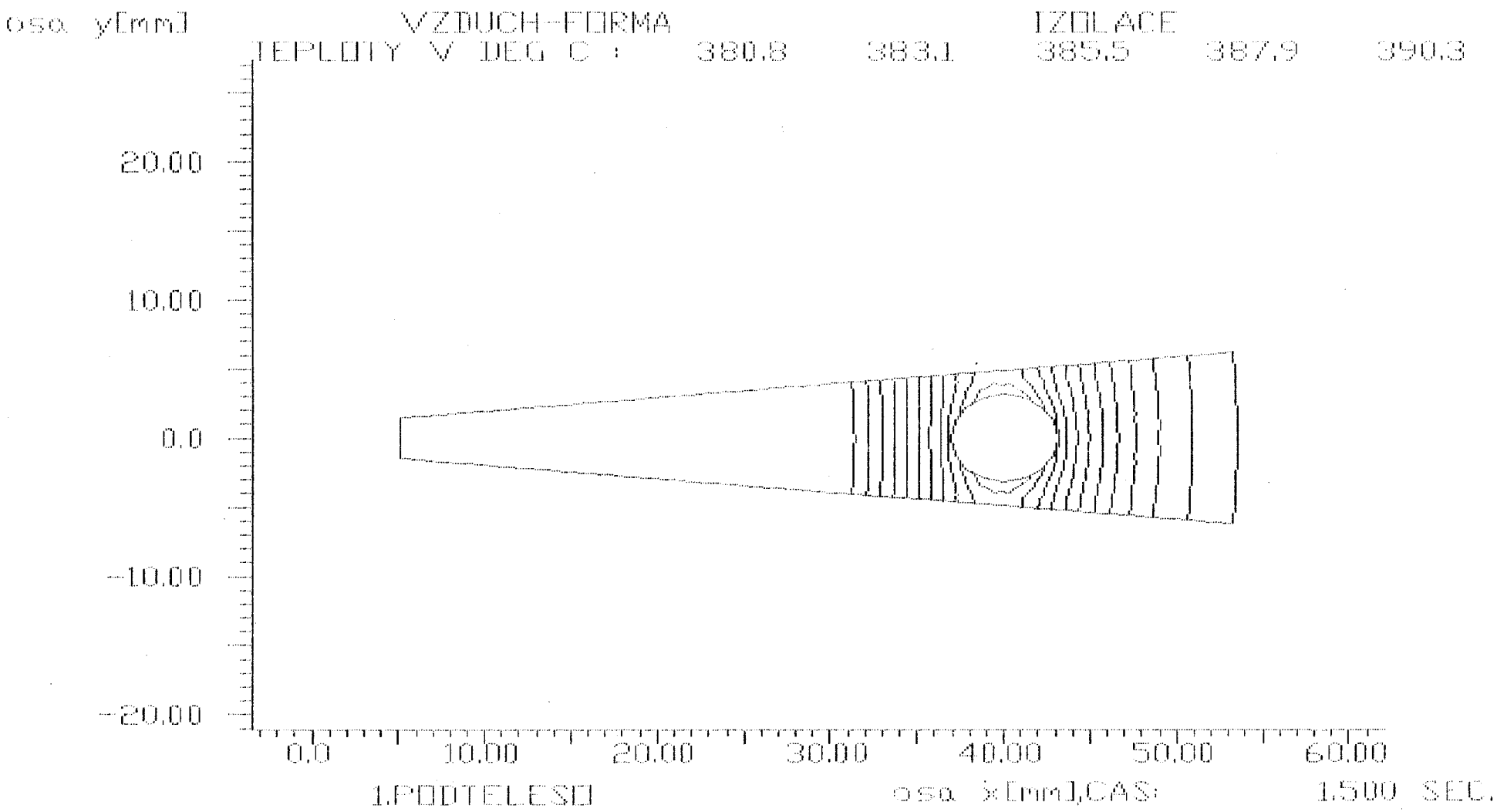


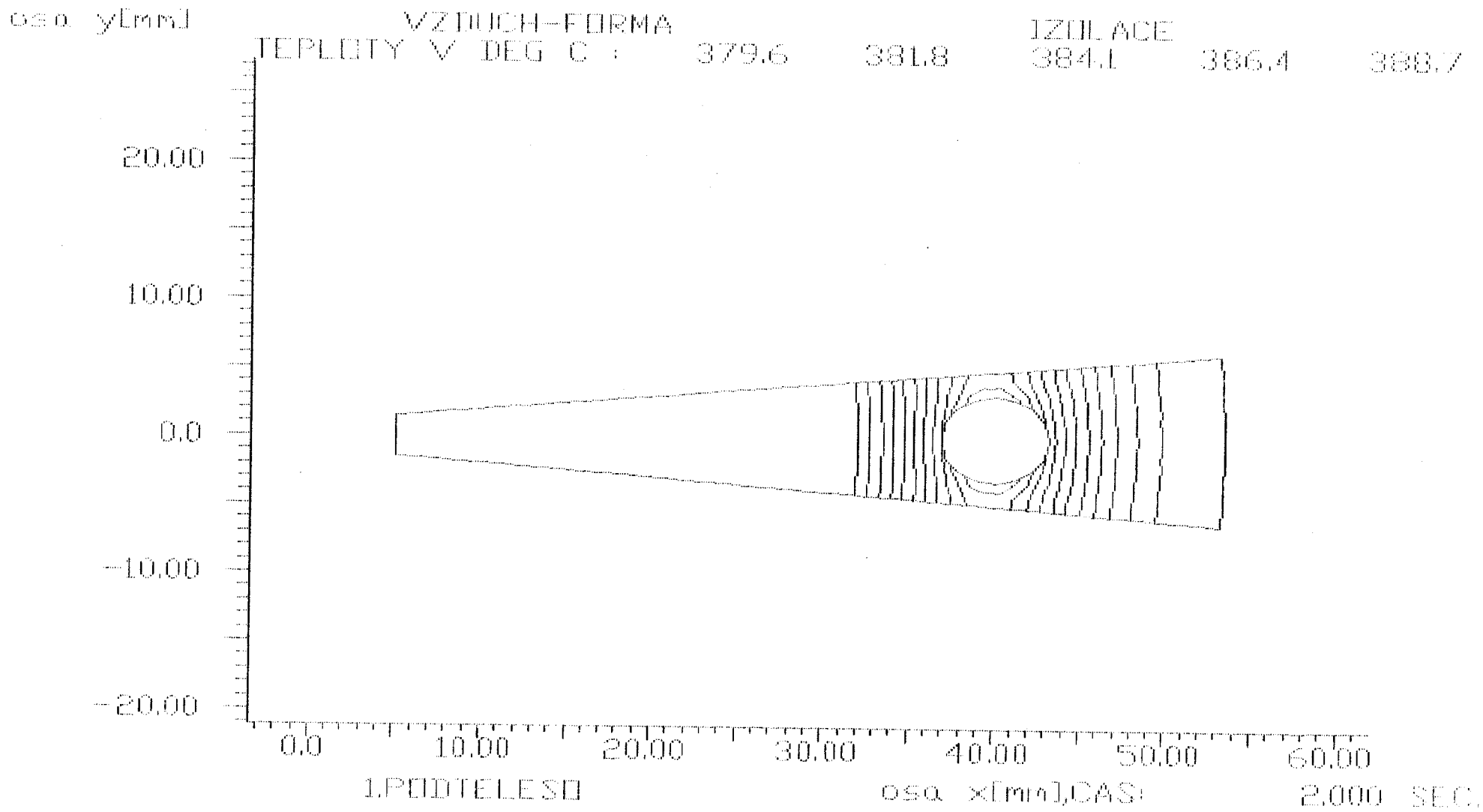
1.PODTELESO

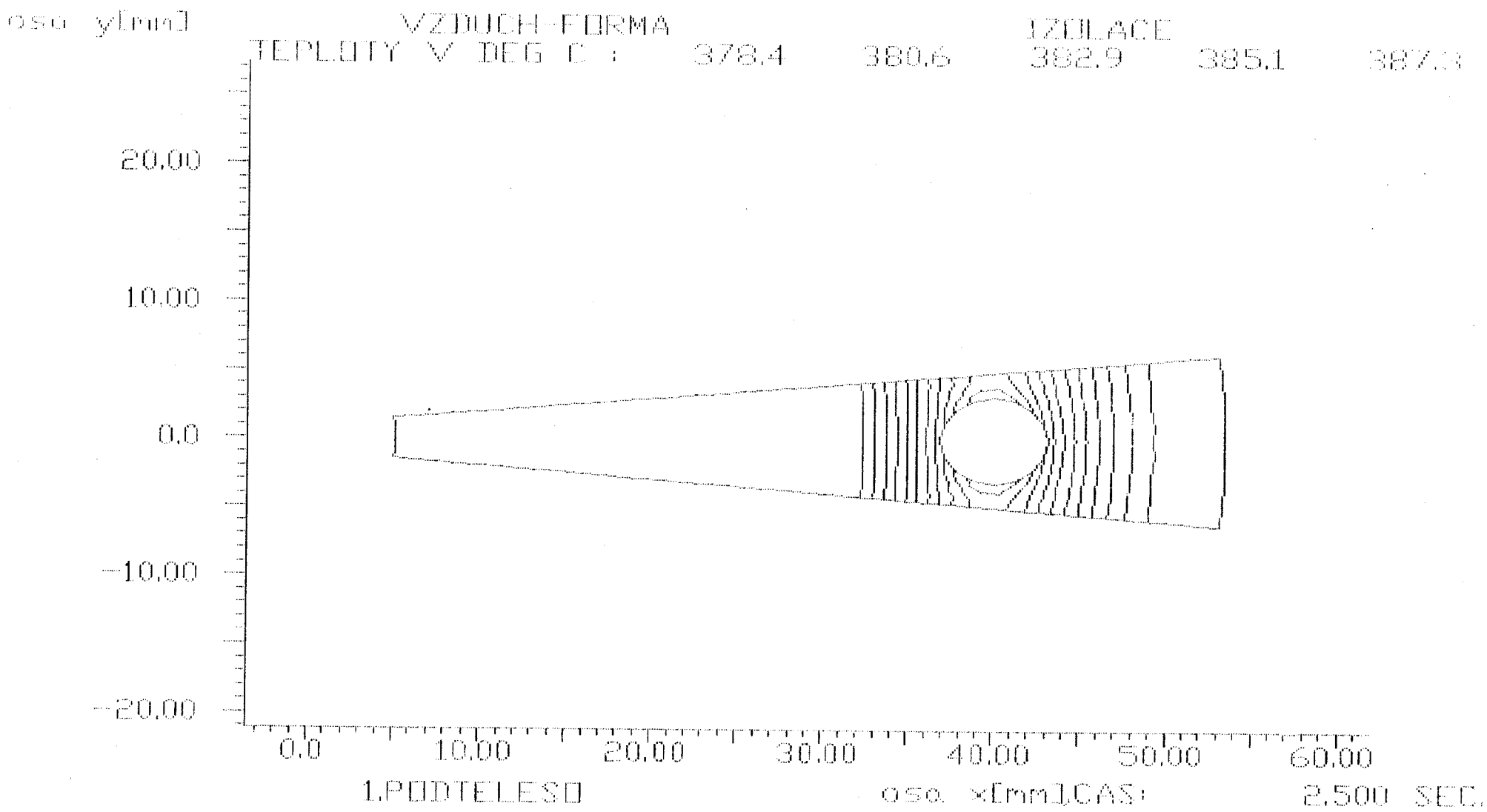
osa x[mm]CAS: 3.500 SEC.

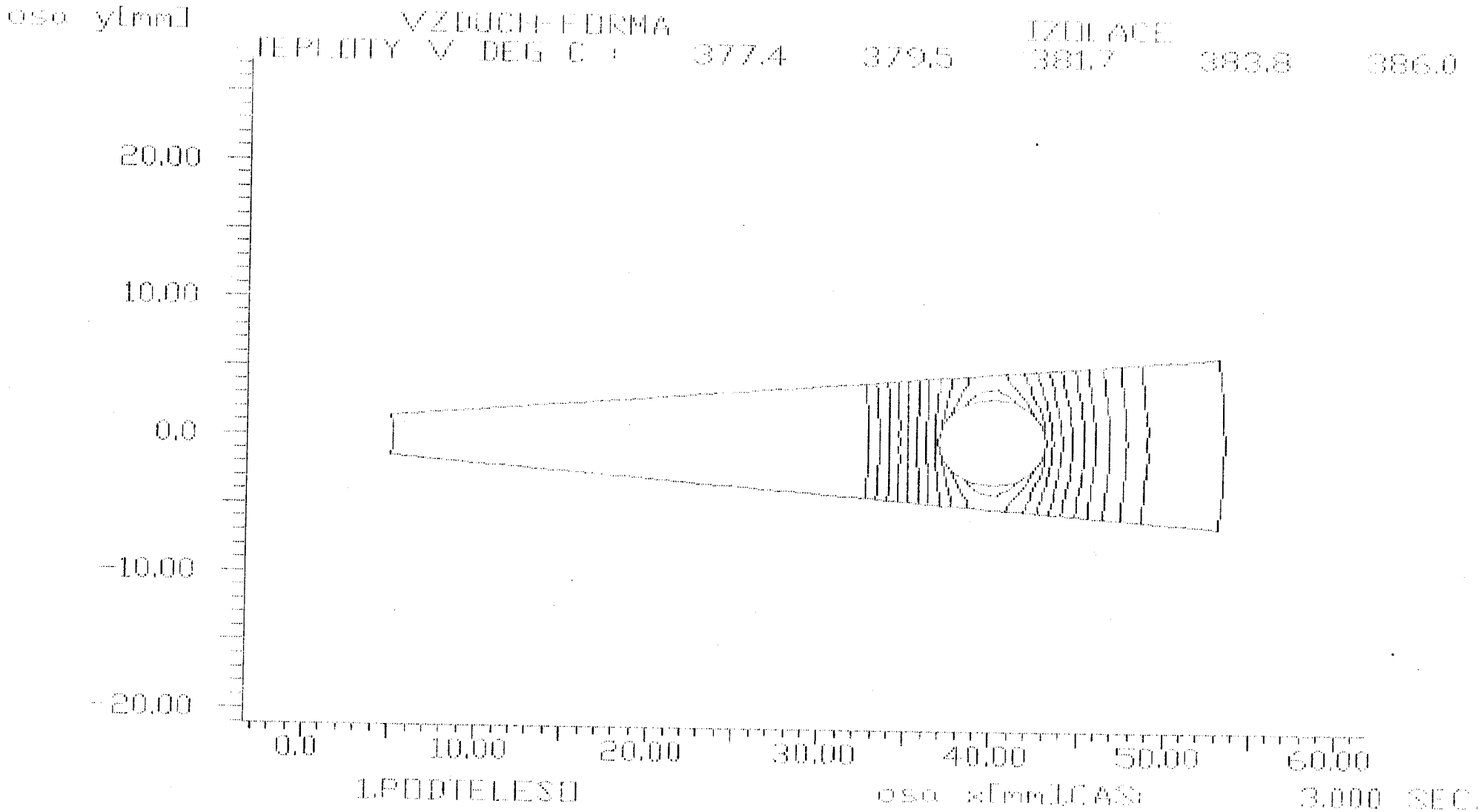

osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 383.6 386.4 389.2 392.0 394.8
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: .500 SEC

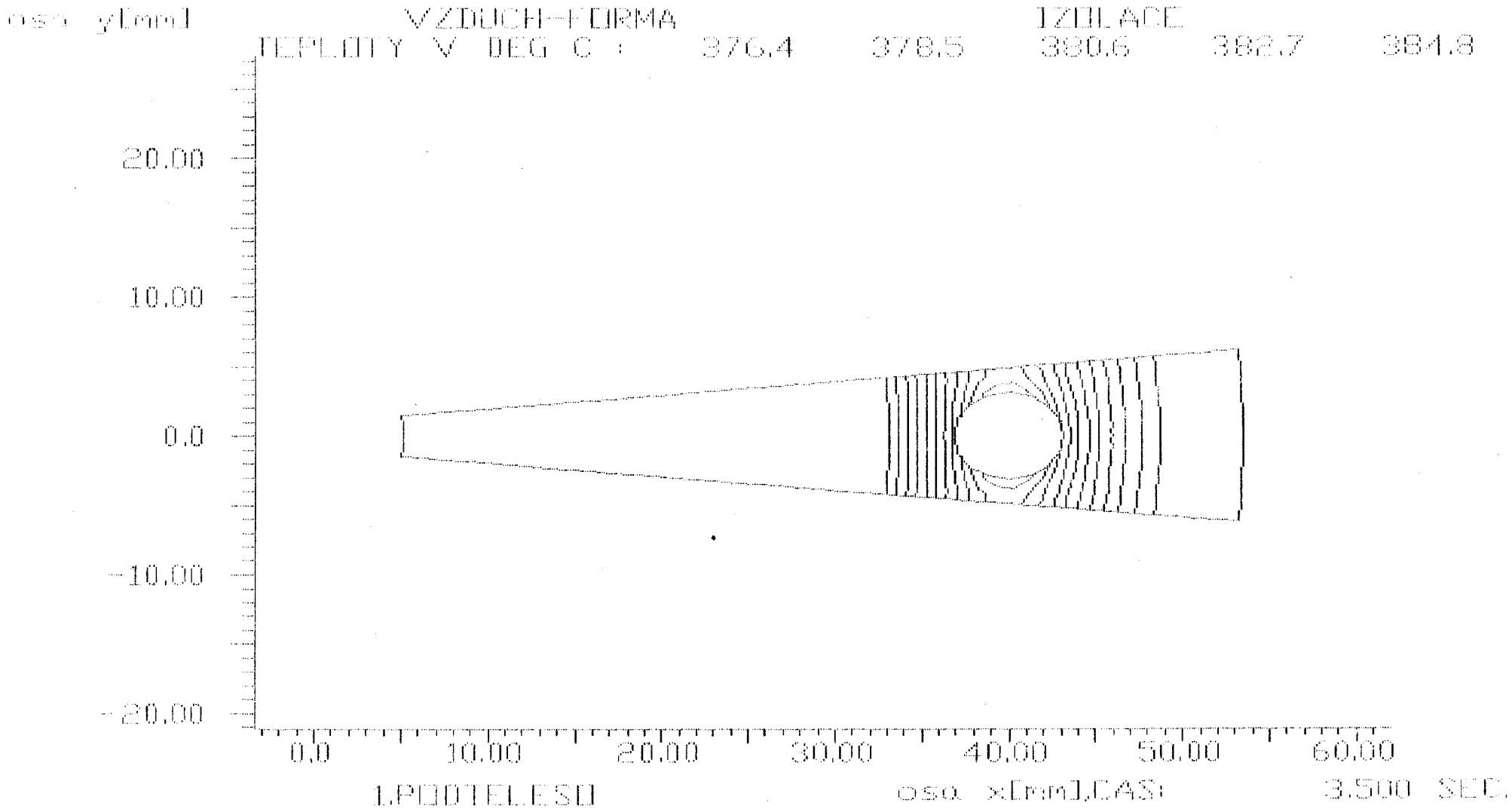

osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
TEPLOTY V DEG C
382.1
384.6
387.2
389.7
392.2
DZDILACE
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
LPODTELESO
osa x[mm],CAS:
1.000 SEC.

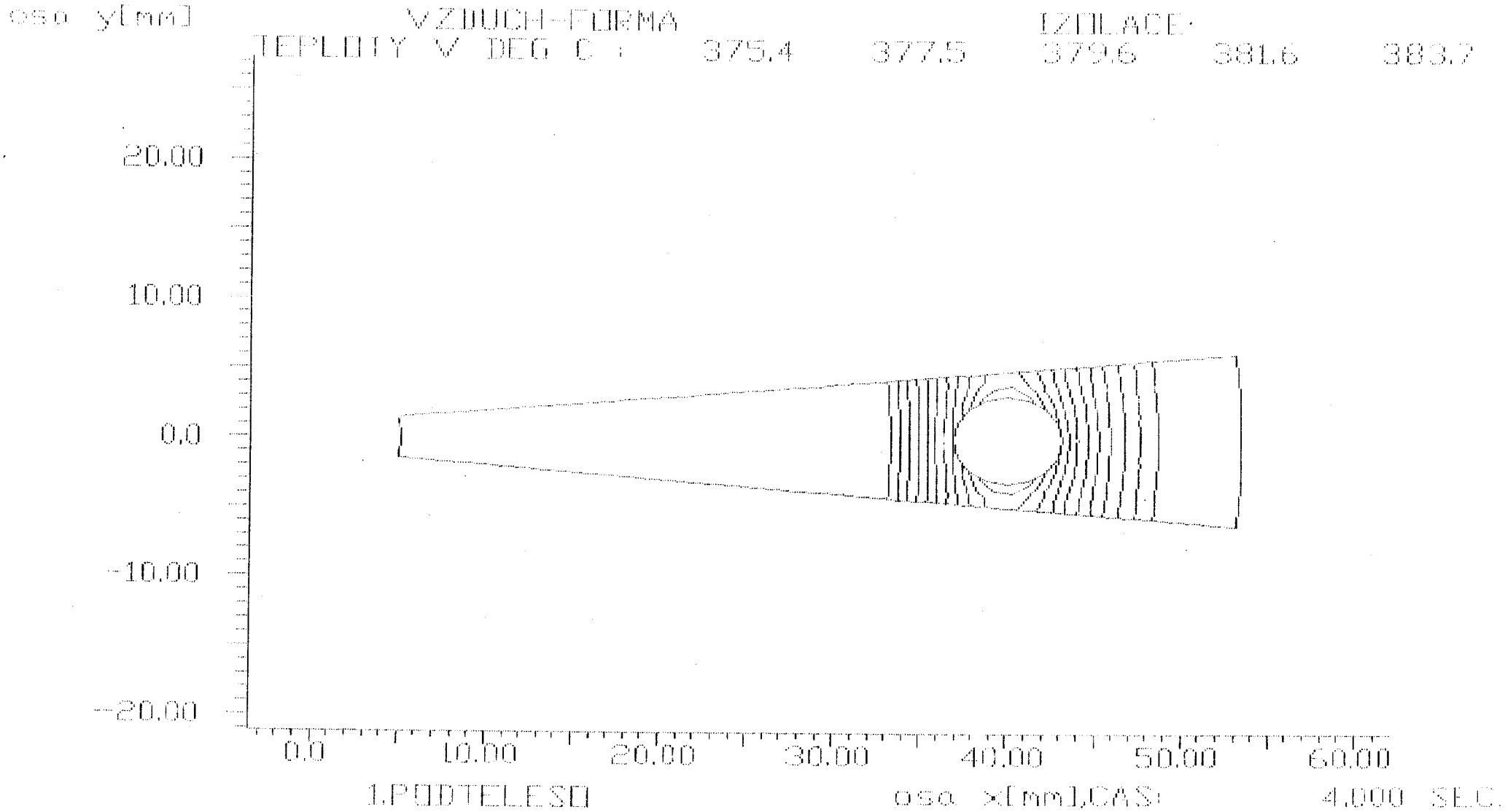

osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 380.8 383.1 385.5 387.9 390.3
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 1.500 SEC.

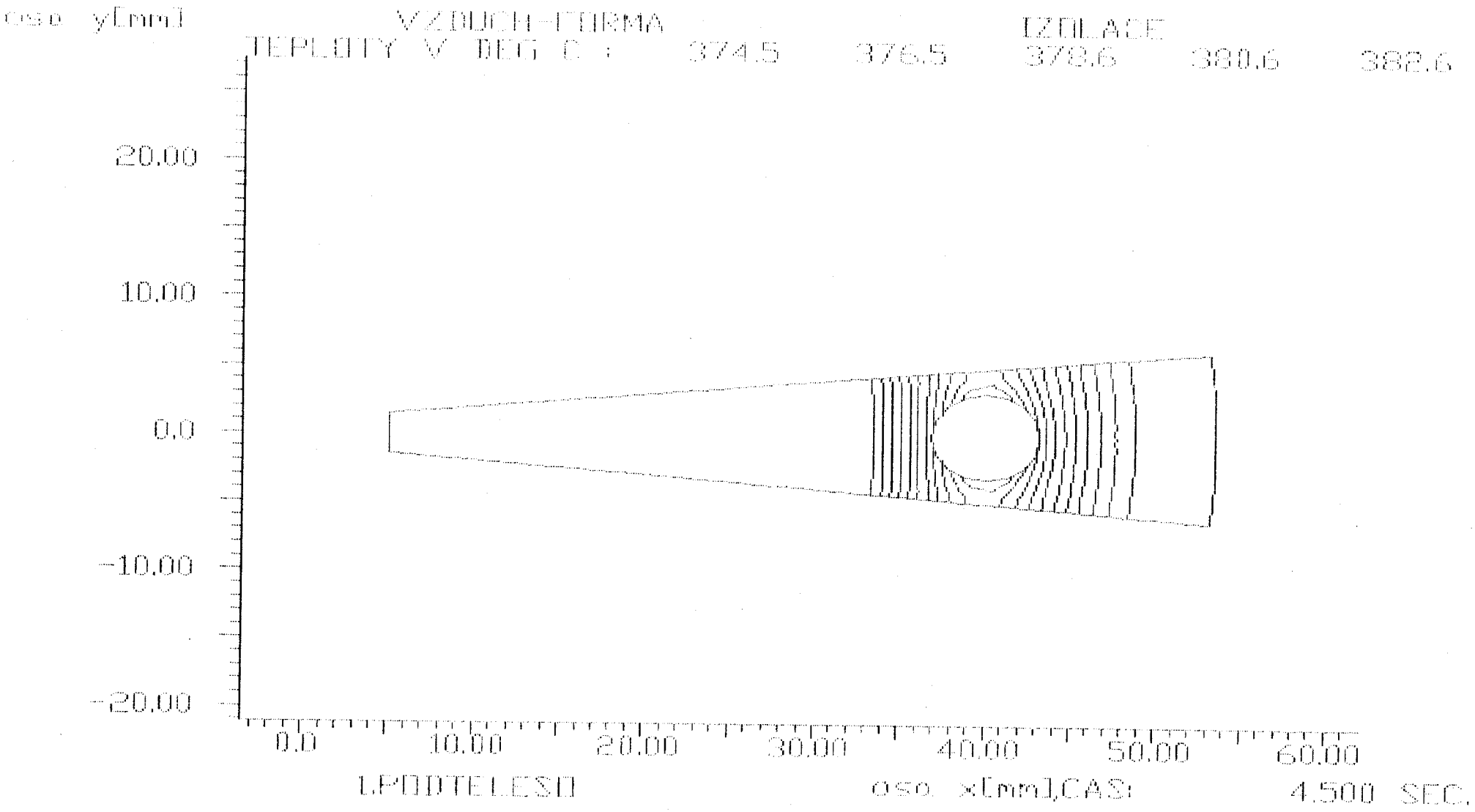

osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 379.6 381.8 384.1 386.4 388.7
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 2.000 SEC.


osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 378.4 380.6 382.9 385.1
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm]CAS: 2.500 SEC.


osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 377.4 379.5 381.7 383.8 386.0
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm]CAS: 3.000 SEC.


osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 376.4 378.5 380.6 382.7 384.8
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.POTELESO
osa x[mm],CAS: 3.500 SEC.


osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 375.4 377.5 379.6 381.6 383.7
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
1.PODTELESO
osa x[mm],CAS: 4.000 SEC.


osa y[mm]
VZDUCH-FORMA
IZOLACE
TEPLOTY V DEG C : 374.5 376.5 378.6 380.6 382.6
20.00
10.00
0.0
-10.00
-20.00
0.0
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00
60.00
LPODTELESO
osa x[mm],CAS: 4.500 SEC.