UNIVERZITET U NOVOM SADU - FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

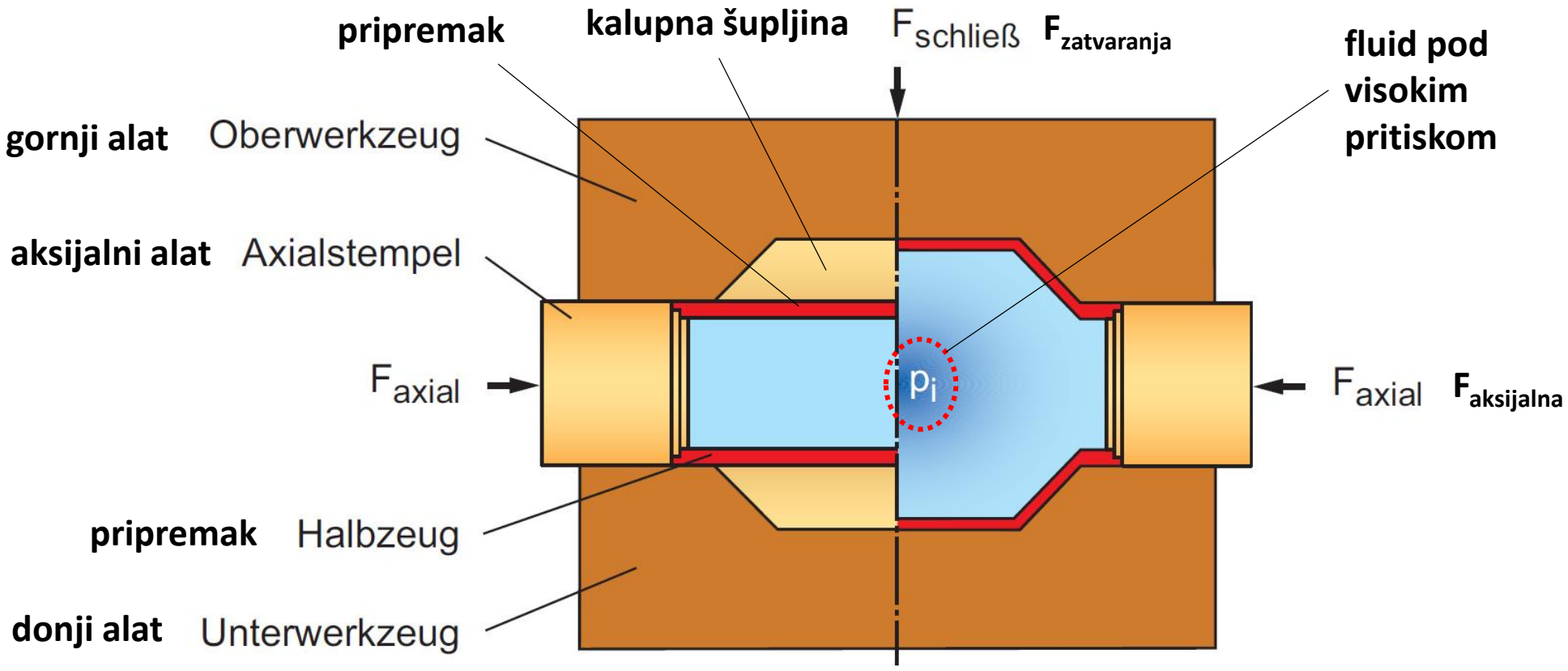
# HIDRODEFORMISANJE

- Napredne metode tehnologije plastičnog deformisanja -

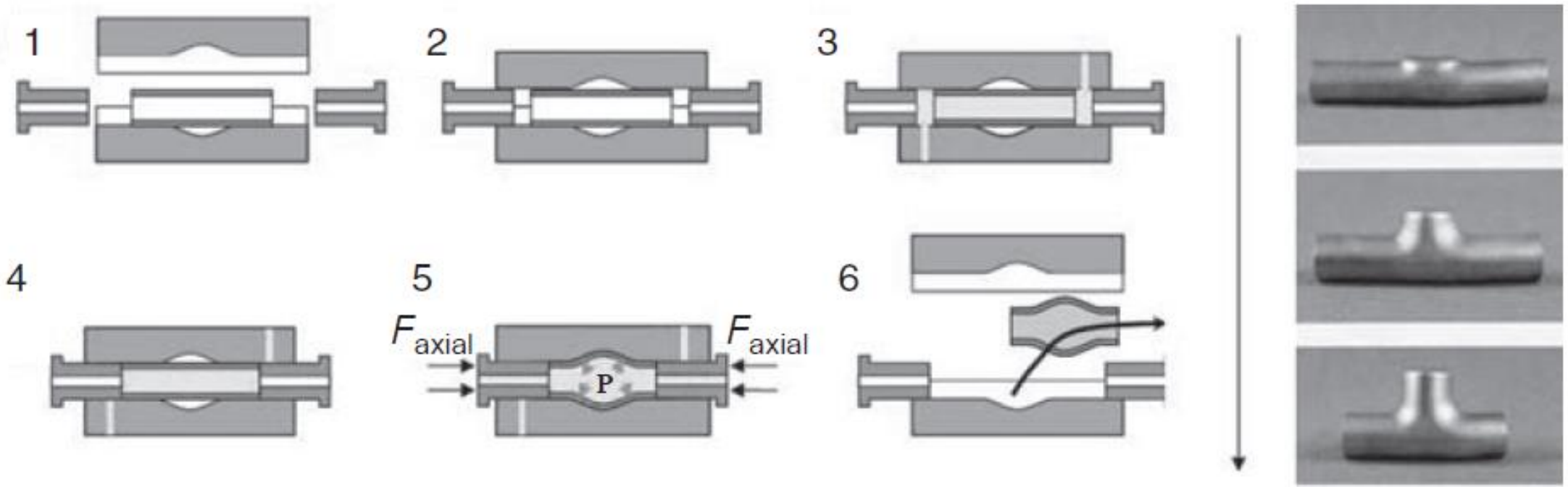
**doc. dr Marko Vilotić**

# Definicija

Hidrodeformisanje je proizvodni proces kod kog fluid pod visokim pritiskom deluje na metalni pripremak kako bi se proizveo deo određenog oblika.




*Princip deformisanja pomoću unutrašnjeg visokog pritiska*




*Tipični koraci neophodni za izradu cevastih proizvoda malih dimenzija*

- delovanjem hidrostatičkog pritiska i spoljnog opterećenja na pripremak, dolazi do deformisanja radnog komada. Konačan proizvod se formira kada zidovi radnog komada popune kalupnu šupljinu
- pripremak može biti u obliku lima ili cevi
- ako se lim koristi kao pripremak, tada proces zovemo hidrodeformisanje lima (eng. sheet metal hydroforming)
- ako se cevi koriste za pripremke, tada proces nazivamo hidrodeformisanje cevi (eng. tube hydroforming)
- u bilo kom od ova dva procesa neophodni su odgovarajući alat, presa i hidraulični sistem

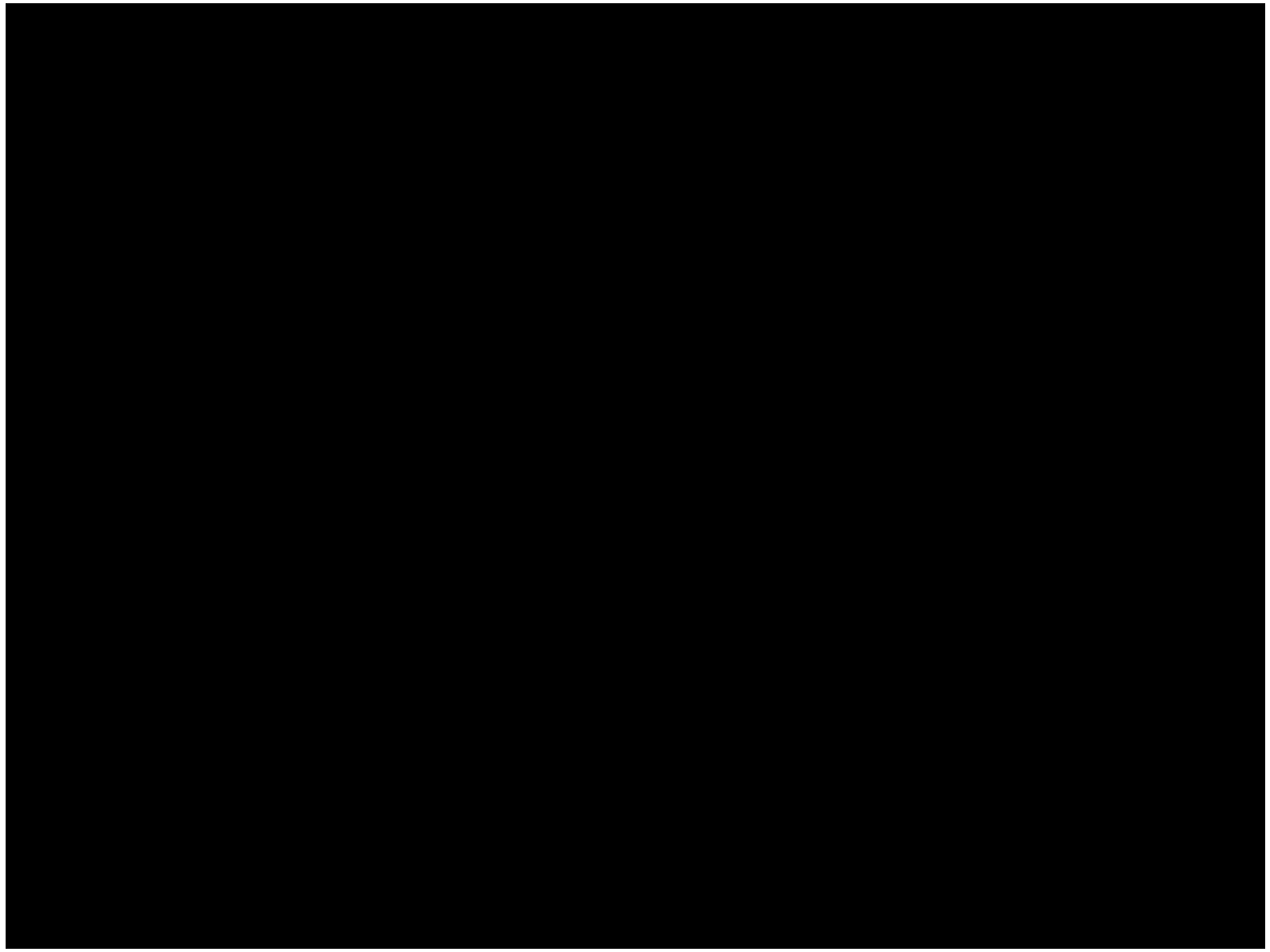
- Prednosti hidrodeformisanja u odnosu na konvencionalne postupke deformisanja:
  - ✓ izrada delova kompleksne geomgetrije
  - ✓ moguće je postići visoke iznose deformacija
  - ✓ visoka tačnost izrađenih delova
  - ✓ visoka krutost izrađenih delova

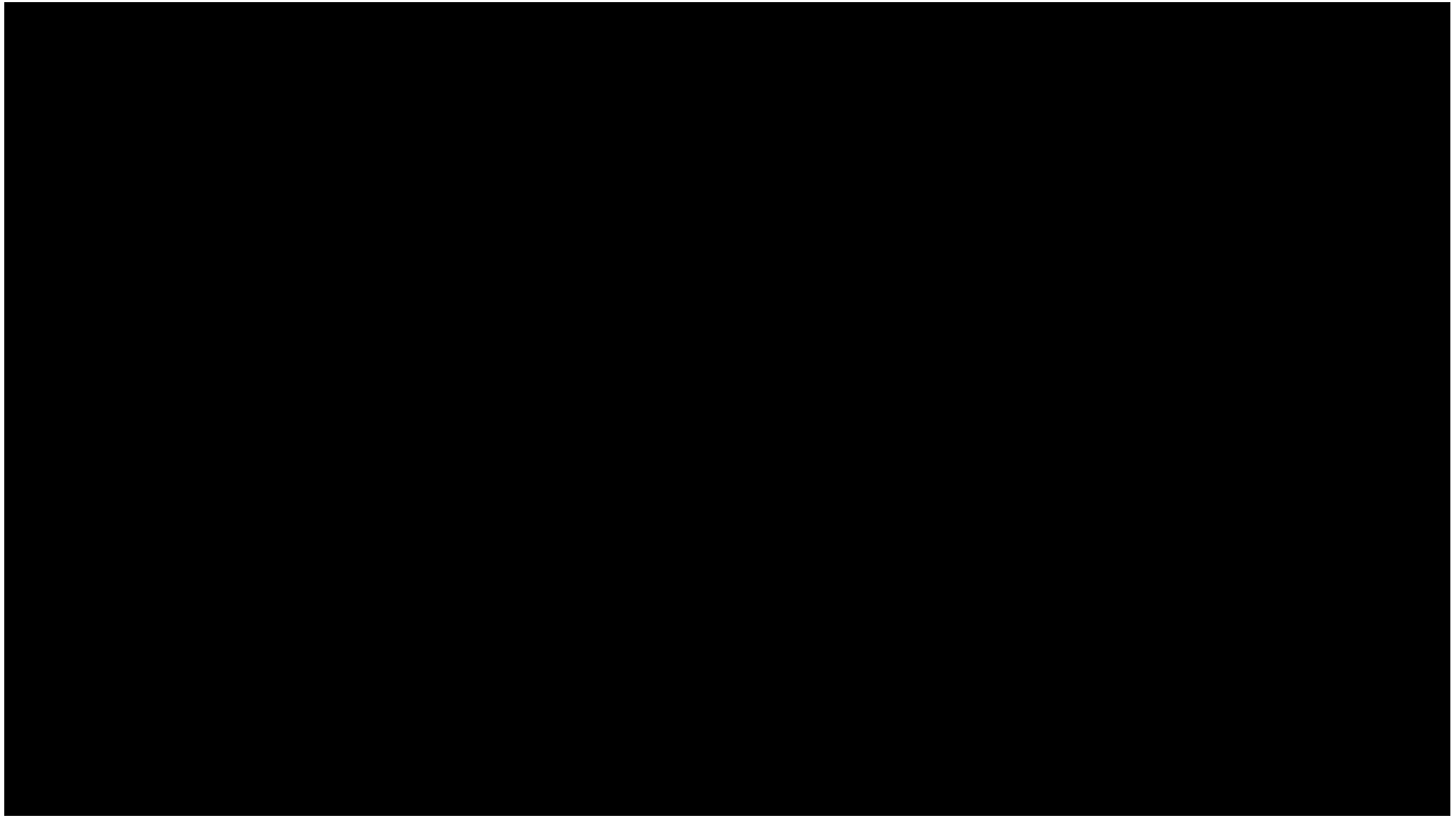
- Ovim postupkom se mogu postići veće dubine izvlačenja, uniformna debljina lima čak i kod velikih površina gotovog komada i niži troškovi izrade u odnosu na konvencionalne postupke dubokog izvlačenja

- Međutim, dugačko vreme ciklusa i zahtev za velikim presama velikog kapaciteta kod proizvoda velikih dimenzija ponekad uslovljavaju primenu ove tehnologije za slučaj maloserijske proizvodnje

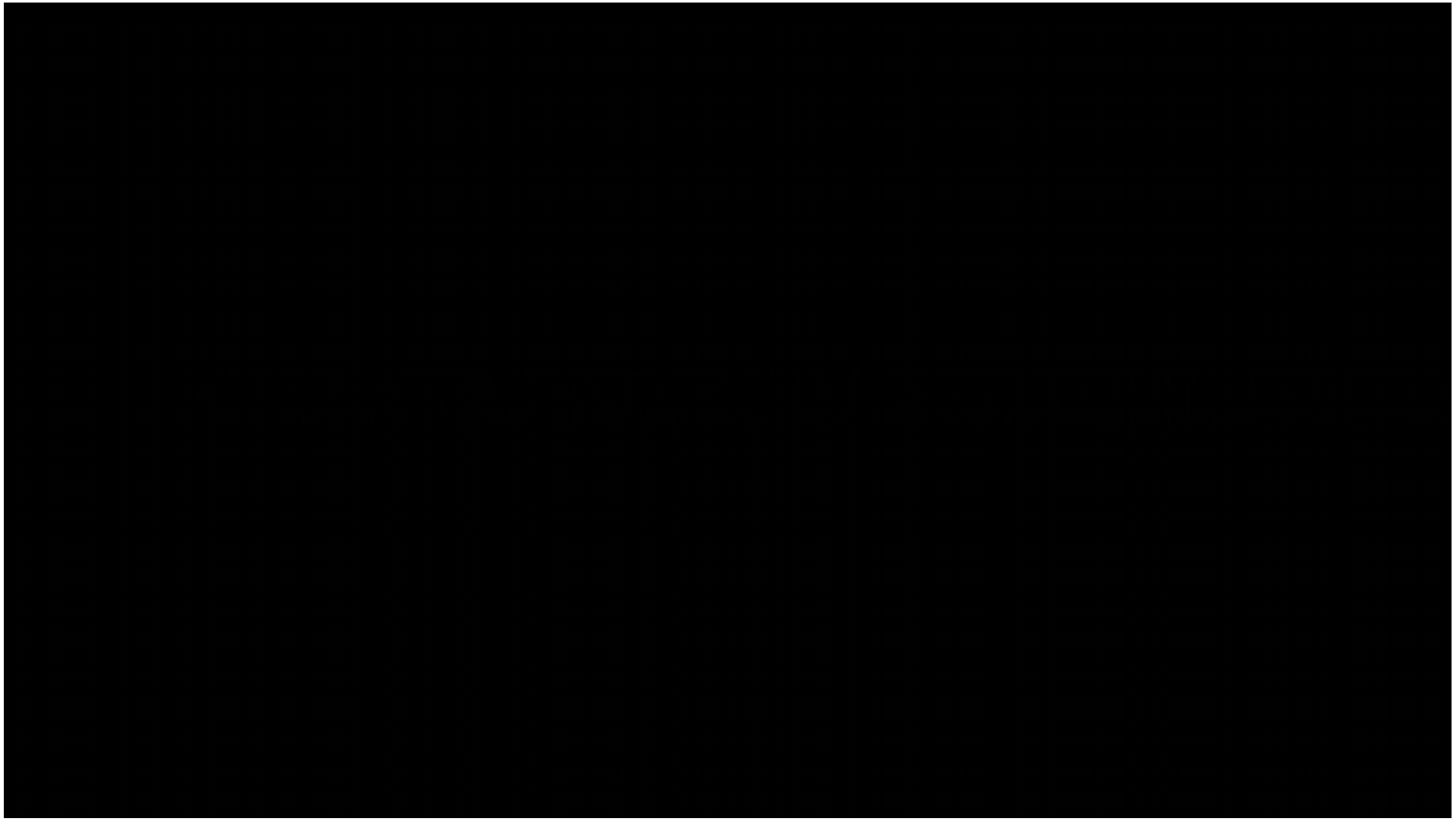
- Primena fluida u procesima deformisanja metala datira od 1900. godine. U periodu od 1900 do 1950. hidrodeformisanje se koristi za proizvodnju bojlera, muzičkih instrumenata i veštačkih kukova. Između 1950. i 1980. počinje primena ove tehnologije za izradu rama za biciklove i vodovodnih instalacija.

- Krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina prošlog veka u Americi i Nemačkoj se vrše znatna unapređenja ove tehnologije





https://www.youtube.com/watch?v=XUMs3cWBlks

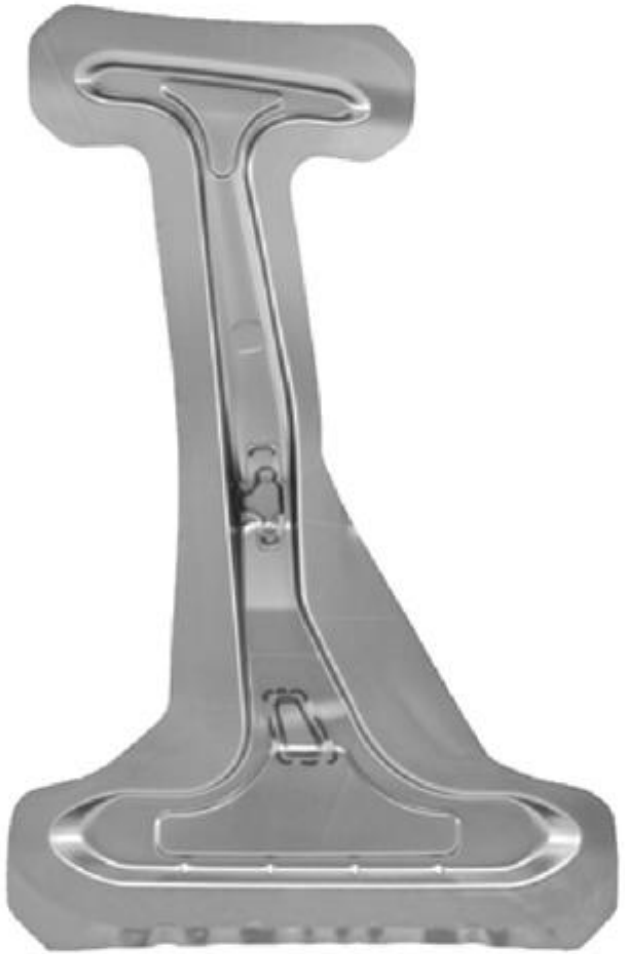


https://www.youtube.com/watch?v=r2qiEr88Z20

- cevasti delovi i sklopovi dobijeni hidrodeformisanjem imaju bolji odnos čvrstoća-težina i nižu cenu u odnosu na delove dobijene konvencionalnim tehnologijama deformisanja i zavarivanja

- hidrodeformisanje cevi se uspešno koristi u masovnoj proizvodnji

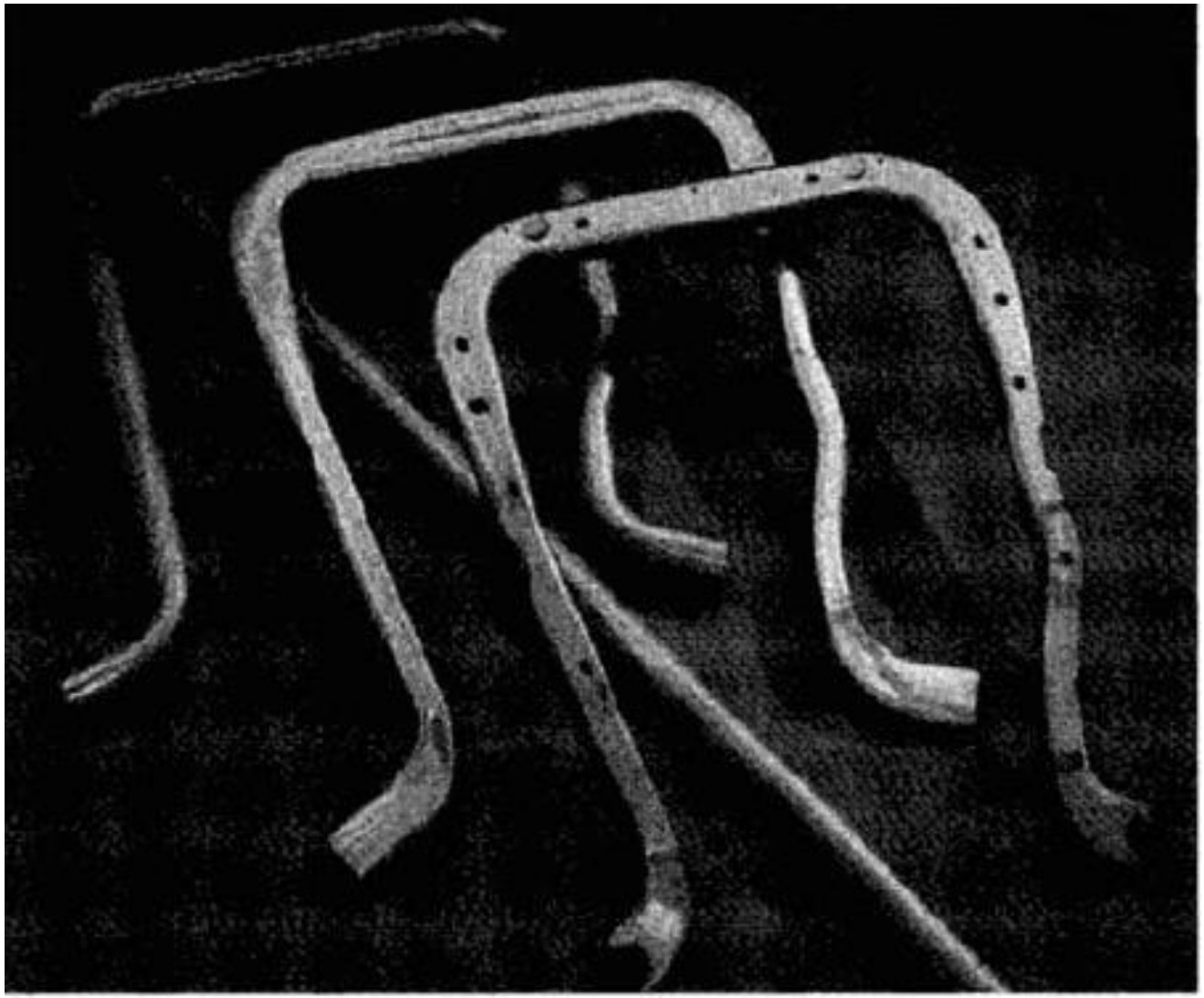
- niska cena, mala težina i dobar kvalitet predstavljaju “dobitnu kombinaciju” za automobilsku industriju



*(B-Säule)*
***B-stub automobila***

***Izrada vešanja automobila hidrodeformisanjem cevi***

*https://www.youtube.com/watch?v=fOkCKOWpUr0*



*Četiri faze oblikovanja proizvoda*

# Istorija hidrodeformisanja

- dve faze u razvoju i primeni hidrodeformisanja
- prva faza – ispitivanje fizičkih karakteristika fluida za potrebe različitih oblasti tehnike. Zatim princip prenosa opterećenja pomoću fluida koji je srpoveo Blaise Pascal u drugoj polovini 17. veka
- druga faza – počinje primenom hidrodeformisanja u serijskoj i masovnoj proizvodnji – naročito u automobilskoj industriji. Za Nemačku taj period počinje sredinom osamdesetih godina prošlog veka
- zahtevi za malom masom proizvedenih delova i numeričkom kontrolom procesa su doveli do intenzivnog razvoja hidrodeformisanja

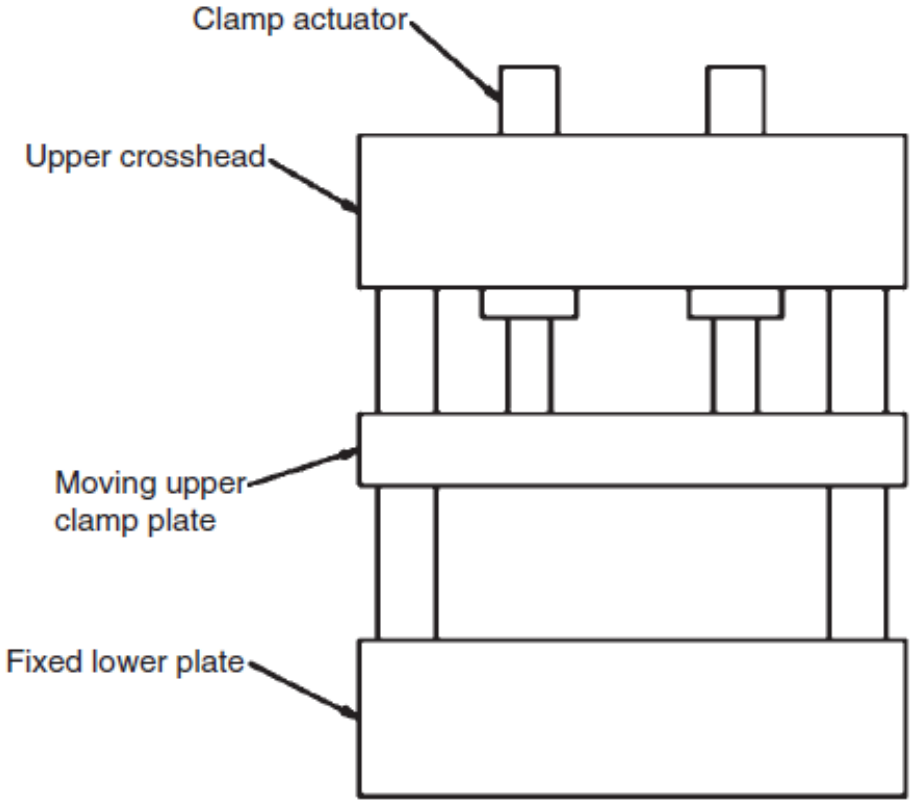
# Sistem fluida

- osnovni element/radni medijum u procesu hidrodeformisanja jeste fluid
- spoljno optereće se preko fluida/radnog medijuma prenosi na radni komad
- kao radni medijum moguće je koristiti: gasove (vazduh), tečnost, fluide visoke viskoznosti (npr. rastopljeni polimer) i dr.

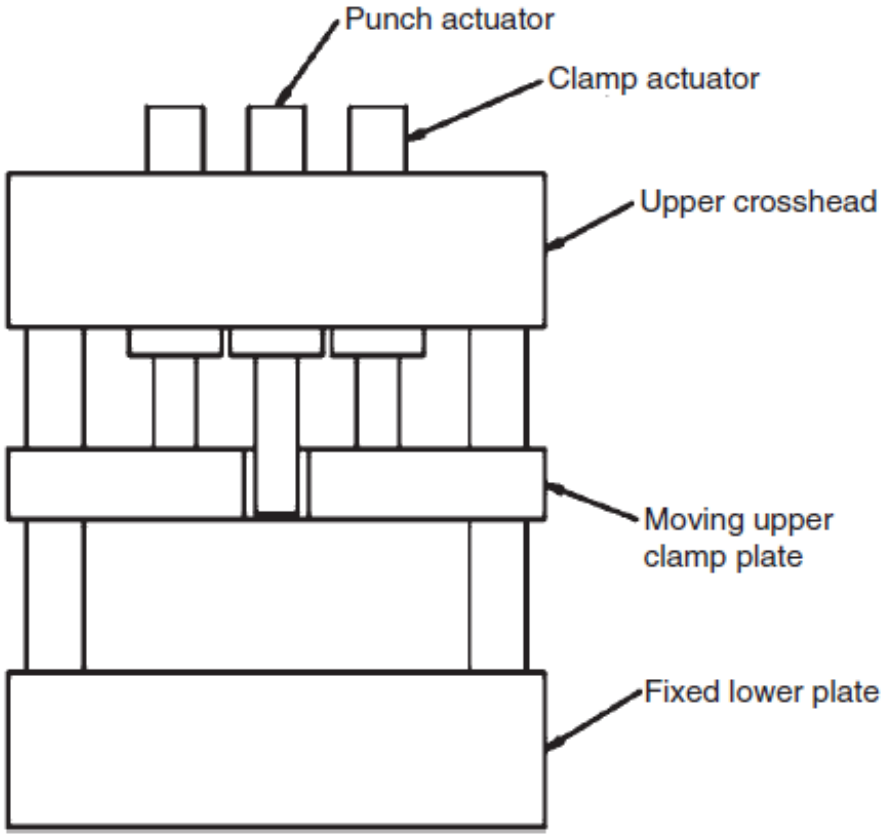
- Zahtevi koje fluidi tokom procesa hidrodeformisanja moraju ispuniti:
  - ✓ visoka stabilnost pod visokim mehaničkim opterećenjem
  - ✓ visoka otpornost na starenje
  - ✓ hemijska neutralnost u odnosu na materijale sa kojim dolazi u kontakt – pogotovo prema materijalu obratka, hidrauličnog sistema i zaptivanja
  - ✓ niska stišljivost
  - ✓ da pruži dobru zaštitu od korozije
  - ✓ da pruži odgovarajuću viskoznost

- ✓ dobra kompatibilnost sa drugim sredstvima za podmazivanje
- ✓ da nije toksično i opasno za životnu sredinu
- ✓ što manja zapaljivost
- ✓ lako uklanjanje sa obratka nakon procesa hidrodeformisanja
- ✓ adekvatna biostabilnost
- ✓ niska cena

- princip procesa hidrodeformisanja se bazira na povećanju pritiska u fluidu/radnom medijumu
- statički pritisak u fluidu predstavlja količnik sile koja se javlja u fluidu i površine na koju sila deluje
- ako izuzmemo delovanje gravitacije na fluid, pritisak fluida na svaku tačku/površinu je konstantan kada fluid miruje
- statički pritisak je skalarna veličina – ima istu vrednost u svim pravcima




*Presa jednostrukog dejstva (obično za hidrodeformisanje cevi)*




*Presa dvostrukog dejstva (obično za hidrodeformisanje limova)*

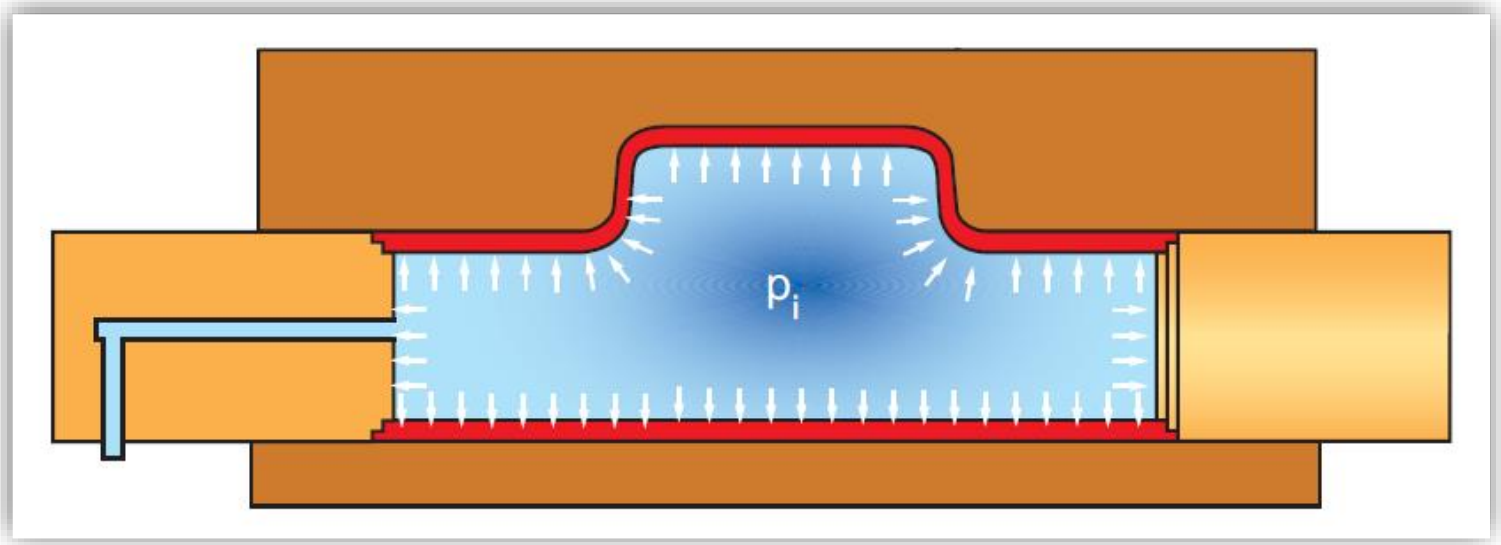
$$F = \frac{pA}{2000}$$

- F - minimalna sila neophodna za izvođenje hidrodeformisanja [tona]
- p - maksimalni pritisak radne tečnosti [psi]
- A - razvijena površina dela koji se proizvodi [kvadratni inči]
- ! obično se izračunata vrednost sile (F) poveća za 30 do 60% iz bezbednosnih razloga
- početna vrednost pritiska za generisanje okvirnog oblika dela koji se prozvodi, i visoki pritisak za finalnu geometriju i maksimalan kvalitet površine (kalibracija)

$$p_{\min} = \frac{(\mathrm{YS})t}{r}$$

- $p_{min}$ - minimalni pritisak neophodan za početak procesa hidrodeformisanja cevi [psi]
- YS - napon tečenja materijala cevi [psi]
- t - debljina zida cevi [inč]
- r - unutrašnji prečnik cevi [inč]

- statički pritisak u fluidu izaziva opterećenje upravno na površinu obratka
- kada kombinovano opterećenje statičkog pritiska i drugih alata dovoljno visoko, naponi u obratku premašuju granicu tečenja i dolazi do plastične deformacije materijala obratka
- plastično deformisanje se odvija sve dok materijal obratka ne popuni kalupnu šupljinu ili statički pritisak nije dovoljan da izazove plastično deformisanje




*Distribucija sile tokom procesa hidrodeformisanja*

- sile koje se deluju na obradak tokom procesa hidrodeformisanja su drugačijeg tipa u odnosu na recimo, konvencionalno duboko izvlačenje
- usled toga je i tečenje materijala tokom deformisanja drugačije
- zbog toga je neke delove moguće dobiti jedino hidrodeformisanjem, a neke konvencionalnim postupcima deformisanja
- postoji slučaj kada se zahteva da distribucija pritiska bude različita, tj. da sile koje deluju na obradak budu različite. U tom slučaju je moguće koristiti nenjutnovske fluide visoke viskoznosti – npr. rastop polimera
- generisanje određenog statičkog pritiska se vrši najčešće pomoću pumpi
- hidrodeformisanje je proces delimično otvorenog kola, u kom se fluid vraća nazad u rezervoar, te ge je potrebno prečistiti

# Najvažniji parametri procesa hidrodeformisanja

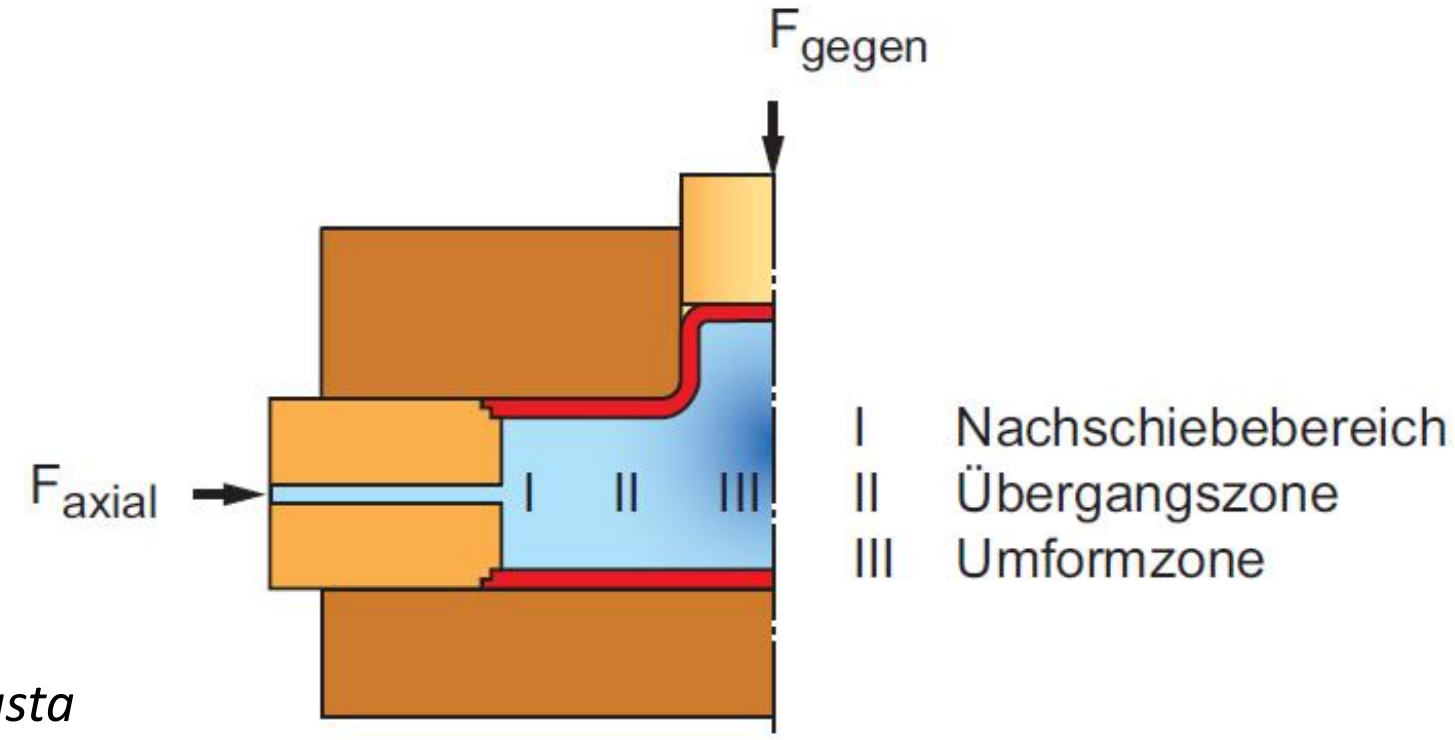
- efektivni unutrašnji pritisak $p_i$
- pritisak kalibracije $p_{i_{max}}$

  *(za potpuno popunjavanje gravure)*

- aksijalna sila $F_{axial}$
- protivsila $F_{gegen}$

  *(sprečava stanjenje zidova u toj obl.)*
- sila zatvaranja $F_{schließ}$

  *(sprečava otvaranje alata usled porasta pritiska i stabiliše proces)*




*Kontaktzonen beim Innenhochdruck-Umformen eines T-Stücks*

***Kontaktne zone prilikom hidrodeformisanja T-cevi***

# Karakteristični defekti pri hidrodeformisanju

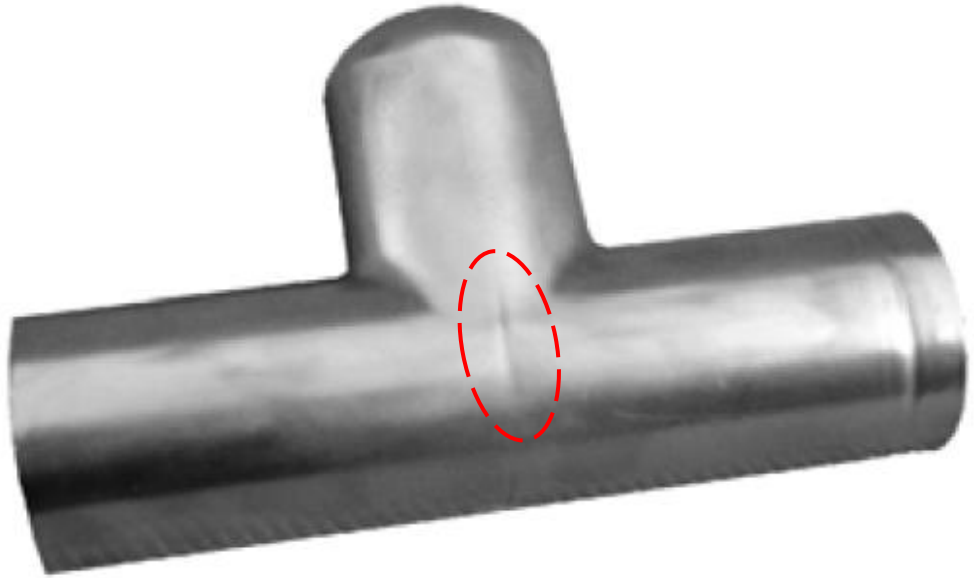
- Tipični problemi koji se javljaju prilikom obrade hidrodeformisanjem obuhvataju:

  1) razaranje radnog komada
  2) formiranje nabora/gužvanje materijala
  3) promena/savijanje/izvijanje početnog profila

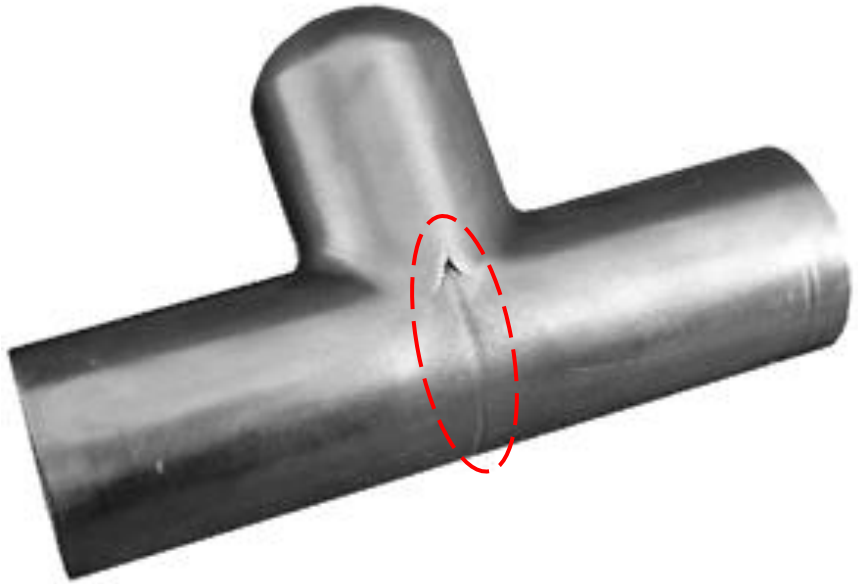
*Versagensfall Bersten am Bauteil „T-Stück“*
***(Razaranje materijala T-cevi)***

Za proizvodnju dela bez defekata neophodno je obezbediti adekvatan unutrašnji pritisak. U slučaju da se prekorači homogena ekspanzija materijala usled prevelikog unutrašnjeg pritiska, dolazi do određenih ograničenja/problema u deformacionoj zoni. To dovodi do razaranja materijala obratka u slučaju da se dalje prekorači ekspanzija usled povećanog unutrašnjeg pritiska. Limit u deformisanju se može povećati na primer primenom alata koji će prilikom obrade izazvati pritisne napone u materijalu umesto zateznih.

- nabor materijala je poželjan kod predeformisanja – rezerva materijala
- nabor se ne može eliminisati povećanjem unutrašnjeg pritiska
- nabor se obično javlja kada je unutrašnji pritisak fluida nizak, a aksijalno pomeranje alata tj. količina materijala koja se dovede u deformacionu zonu prevelika
- prevelika deformacija → povećana čvrstoća materijala → otežano tečenje materijala u zonu deformisanja → razaranje materijala

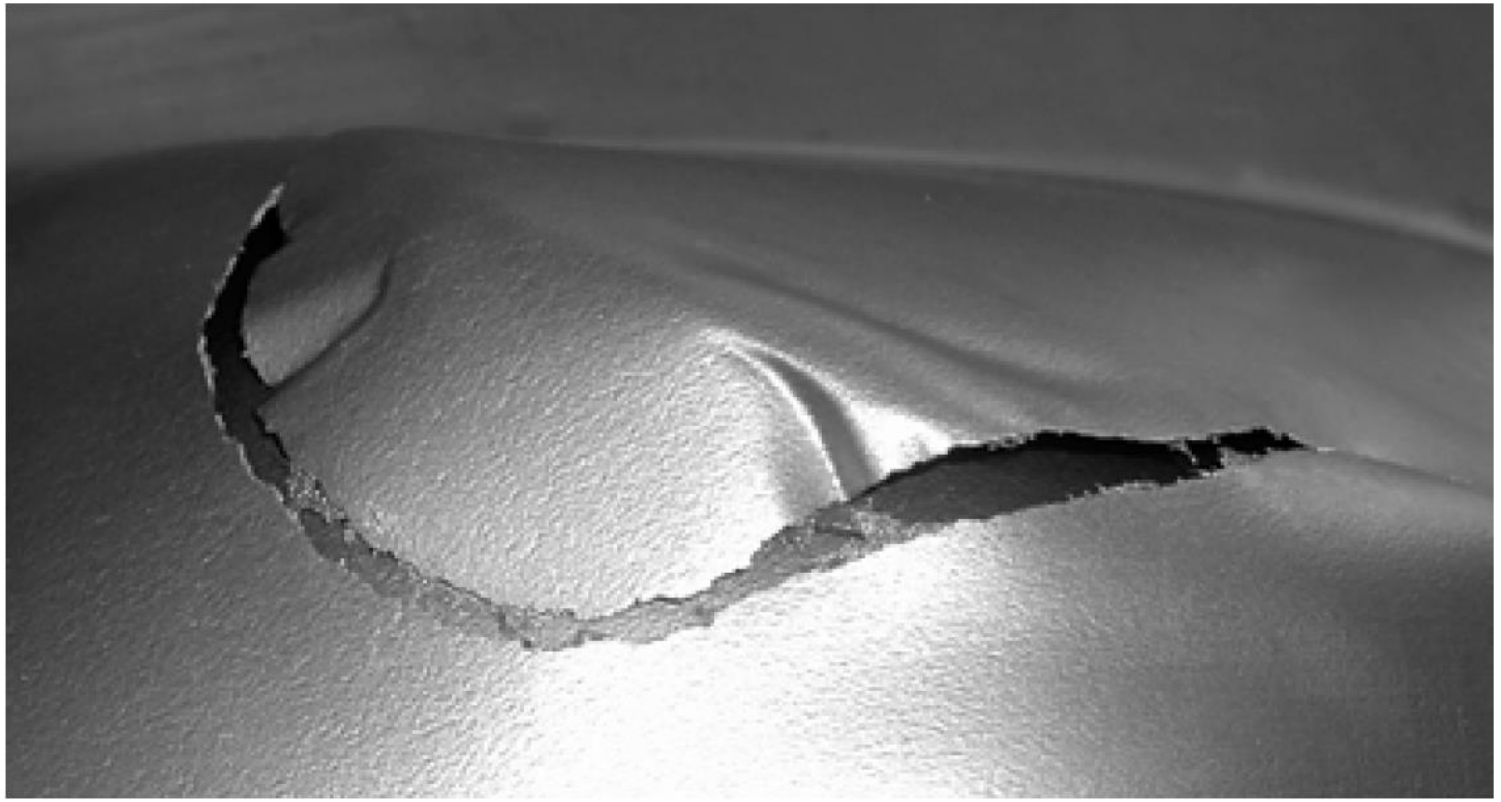


***Stvaranje nabora na materijalu T-cevi***

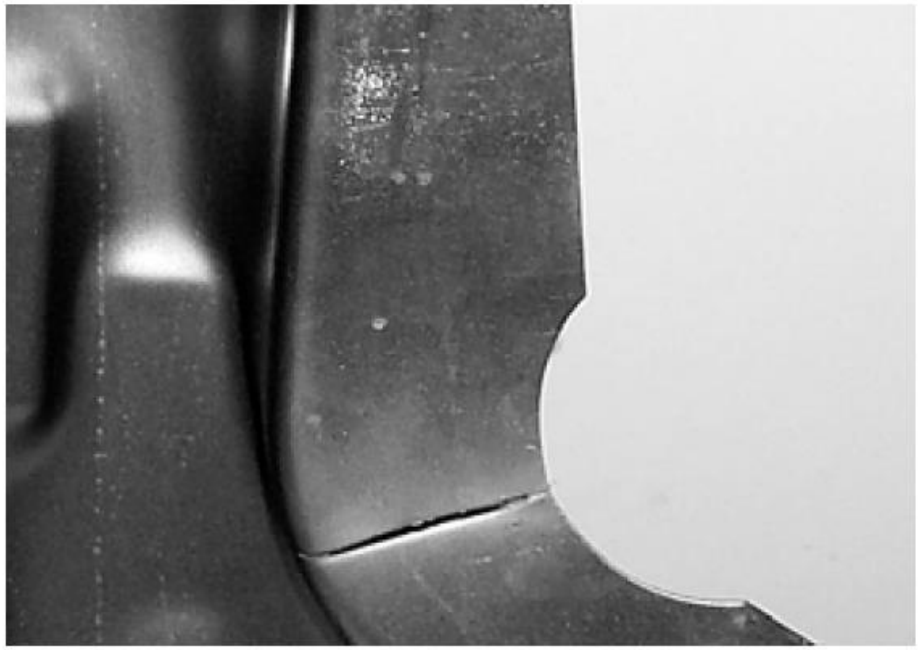


***Nabor i razaranje materijala T-cevi***

Ako je odnos dubokog izvlačenja ($D_{pripremka}/D_{proizvoda}$) prevelik prilikom pred-oblikovanja ili je tečenje materijala na neki način otežano dolazi do razaranja radnog materijala komada



***Razaranje površine gotovog dela velikih dimenzija dobijenog hidrodeformisanjem***

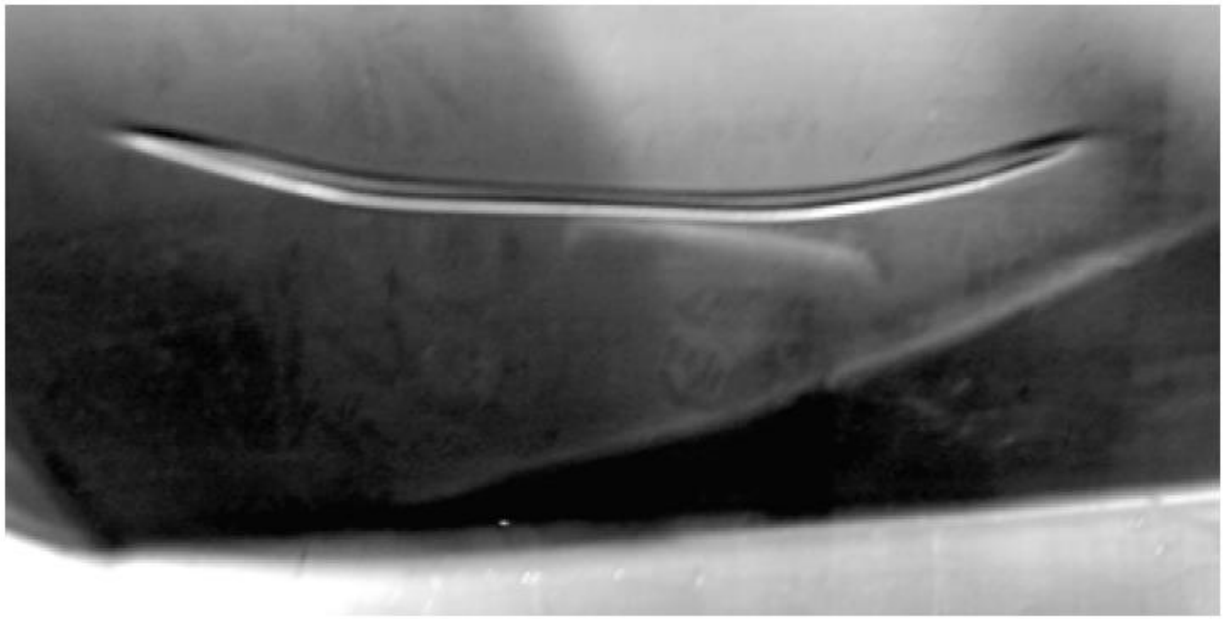


***Razaranje dela konkavnog oblika***

Prilikom izrade delova koji sadrže konkavne elemente, materijal na obodu/ivici je opterećen na zatezanje – horizontalno i vertikalno, što dovodi do značajnog smanjenja debljine lima u toj oblasti. Tada se javlja ojačavanje materijala i otežano tečenje, što može imati loše posledice po proces hidrodeformisanja. U tom slučaju je česta pojava razaranja ili stanjenja materijala.

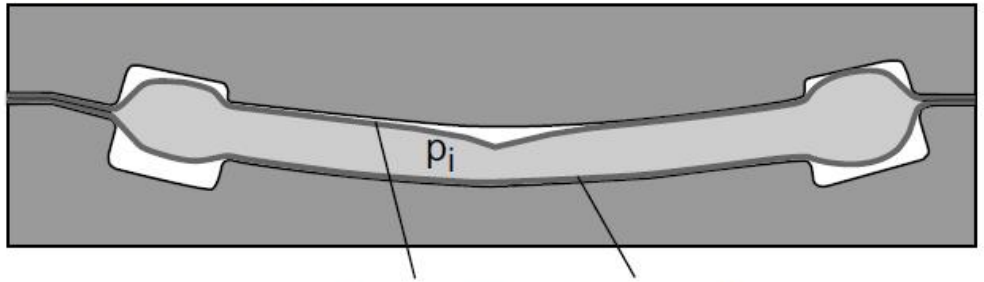
# Nabor materijala

Nabor se često javlja kod dubokog izvlačenja i to na obodu, zbog tangencijalnih pritisnih napona. Kod hidrodeformisanja se taj problem može rešiti velikom vrednošću sile zatvaranja. Međutim, nabor se može javiti u nekim oblastima obratka zbog nekontrolisanog tečenja materijala u fazi preddeformisanja.

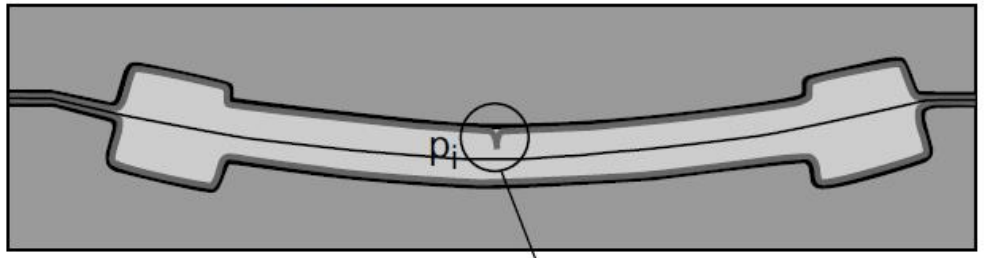


***Nabor usled nekontrolisanog tečenja materijala***

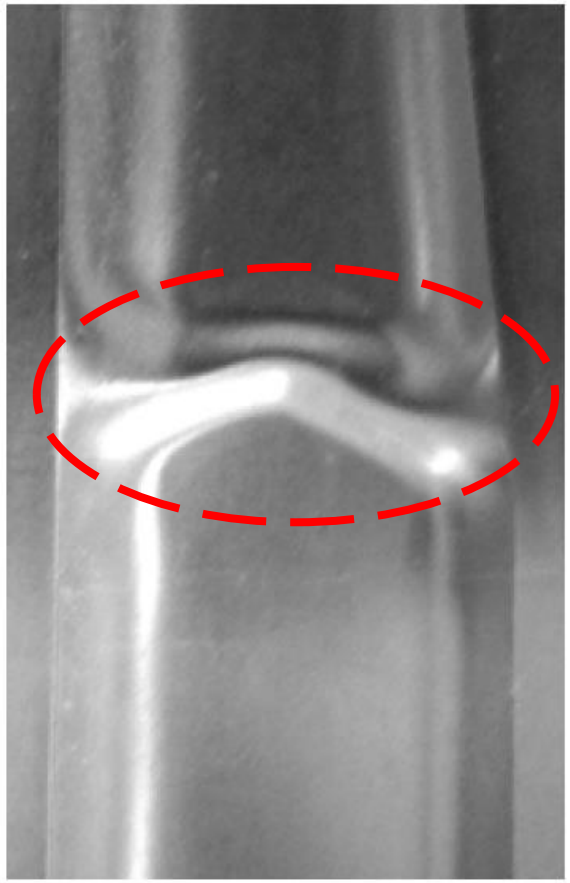
**Vorformung**




**Kalibrierung**




**formiranje nabora**



Slično se može desiti kod lošeg izbora podeone ravni/dizajna alata

# Tribologija

Tribološki uslovi između alata i obratka su takođe veoma važan faktor prilikom hidrodeformisanja, jer imaju direktan uticaj na gotov proizvod.

Kao i kod drugih metoda obrade lima deformisanjem, i kod hidrodeformisanja se javlja mešovito trenje.

Uprkos tankom sloju koje potiče od mazivnog sloja, dolazi do direktnog kontakta između alata i obratka u lokalnim zonama.

U pogledu tribologije, karakteristike procesa hidrodeformisanja u odnosu na konvencionalne procese deformisanja su:

- visoki kontaktni pritisci između alata i obratka
- različita relativna brzina između alata i obratka
- vremenska i prostorna promena kontaktne površine u vremenu i prostoru
- promena topografije obratka

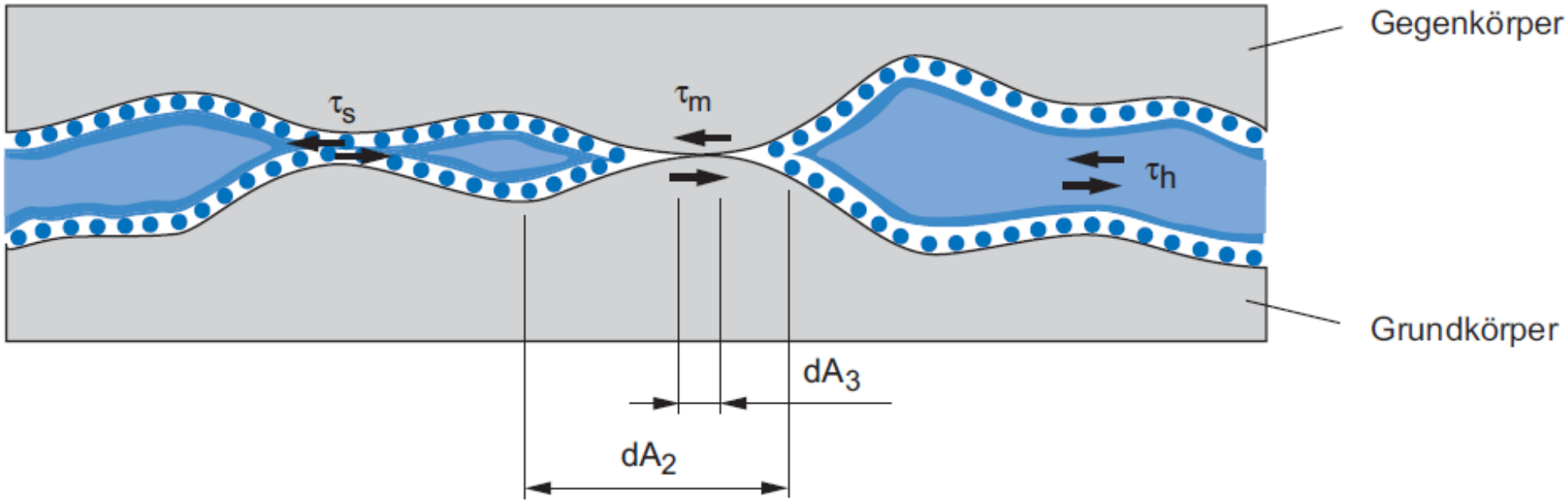



**Abb. 2.11.** Reibmodell bei Mischreibung **Model trenja za slučaj mešovitog trenja**

$dA_2$; $dA_3$ Flächenelement **Elementarna površina**

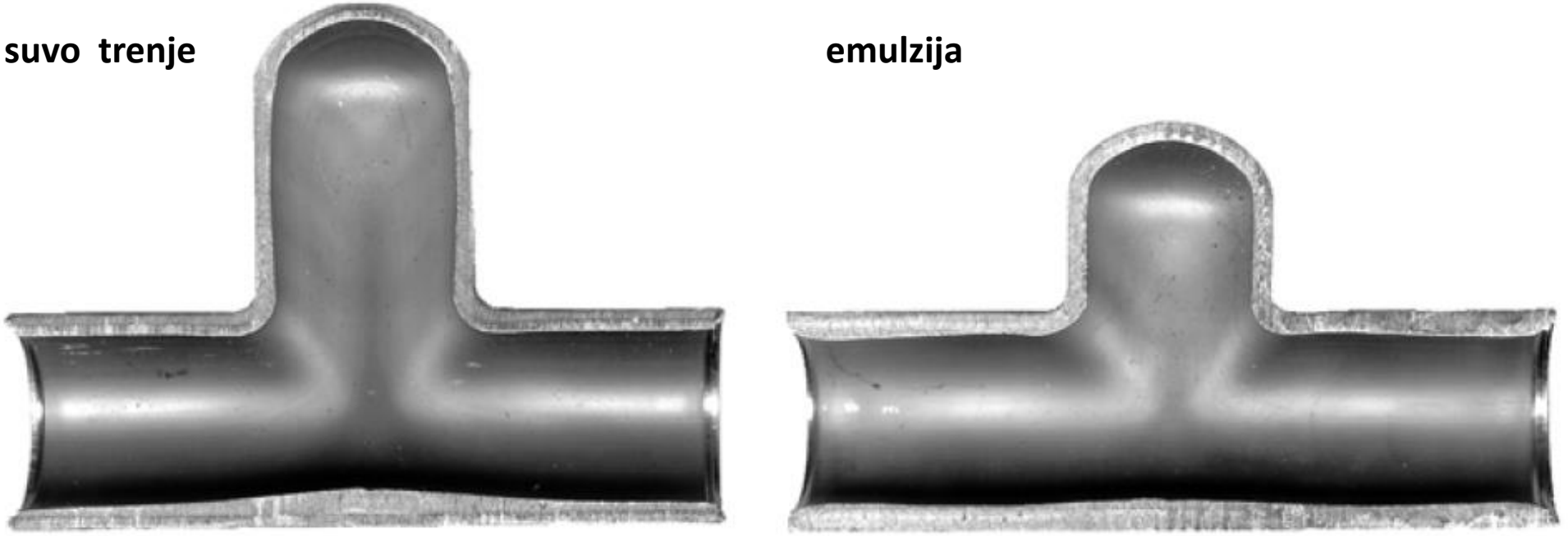
$\tau_h$ Schubspannung unter hydrostatischen Reibbedingungen **Tangencijalni napon u uslovima hidrostatičkog trenja**

$\tau_m$ Schubspannung an der metallischen Kontaktfläche **Tangencijalni napon na kontaktu metalnih površina**

$\tau_s$ Schubspannung im dünnen Schmierfilm **Tangencijalni napon u tankom sloju fluida**

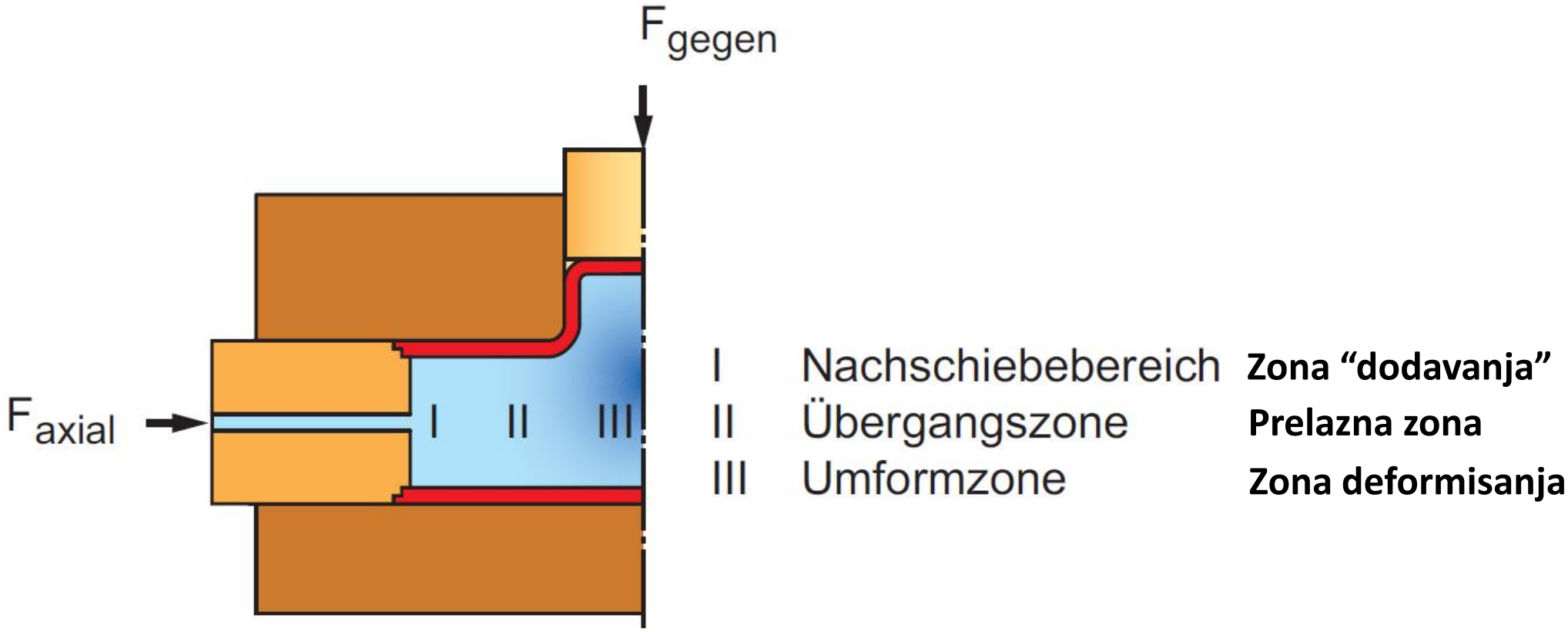
**suvo trenje**

**emulzija**



*Einfluss des Schmiermittels auf das Umformergebnis (links: Trockenschmierstoff; rechts: Emulsion)*

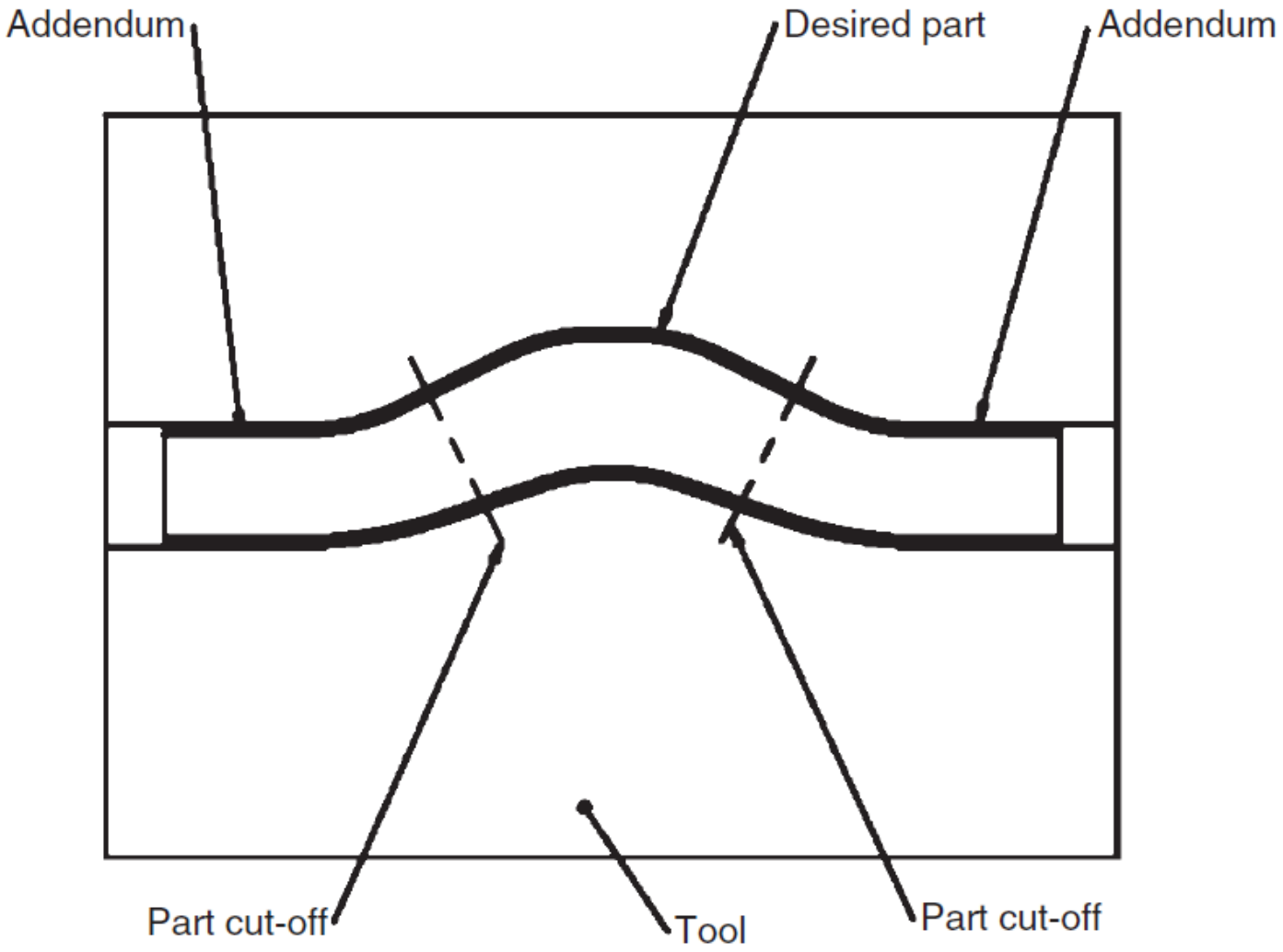
***Uticaj sredstva za podmazivanje na gotov deo dobijen hidrodeformisanjem***



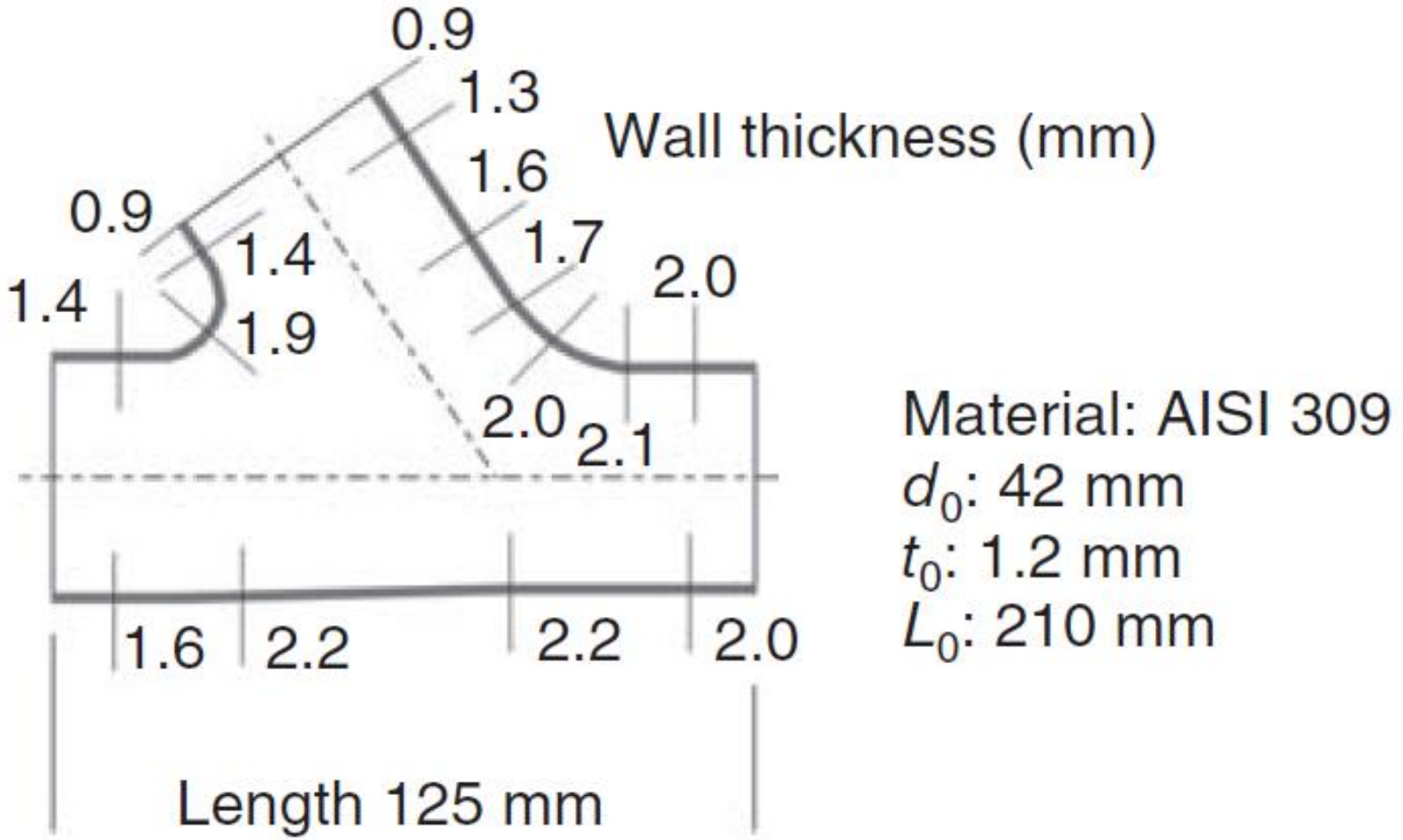

**Zona I** = srednje visoke vrednosti kontaktnog napona, visoka relativna brzina (zavisi od aksijalne sile), nema promene oblika

**Zona II** = opadanje relativne brzine između alata i obratka, moguća promena oblika

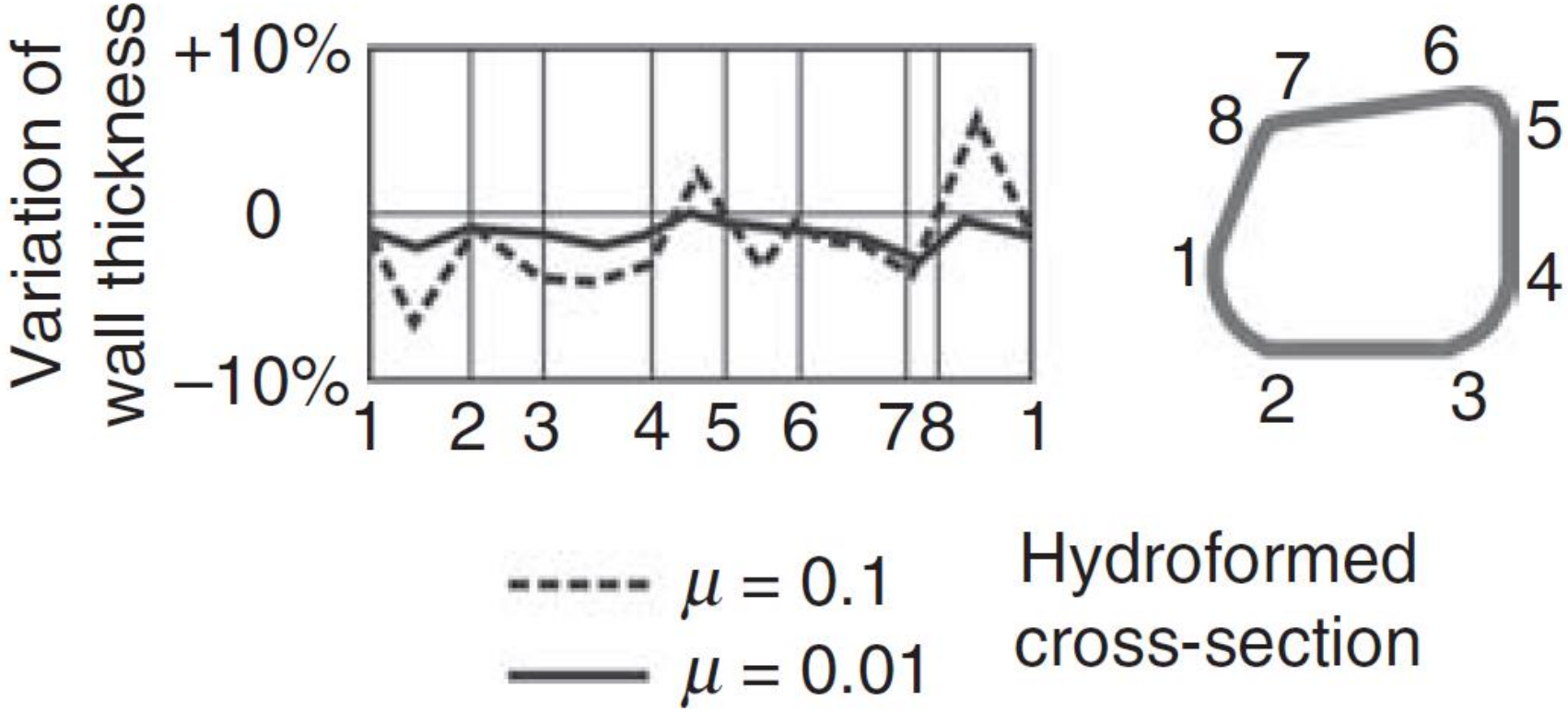
**Zona III** = najmanja relativna brzina između alata i obratka, najviše izražena promena oblika




***Dodatak materijala kod konstrukcije alata (gornja i donja polovina)***




***Distribucija debljine lima u različitim presecima cevi Y-oblika***




***Distribucija debljine lima u različitim presecima kompleksnih profila***

$$R = (.5 \times D) \div E$$

- R - minimalni poluprečnik centralne linije koji se može proizvesti hidrodeformisanjem [mm]
- D - spoljašnji prečnik [mm]
- E - izduženje materijala [%]

---

$$p_b = \sigma_{UTS} \frac{2t_0}{d_0 - t_0}$$

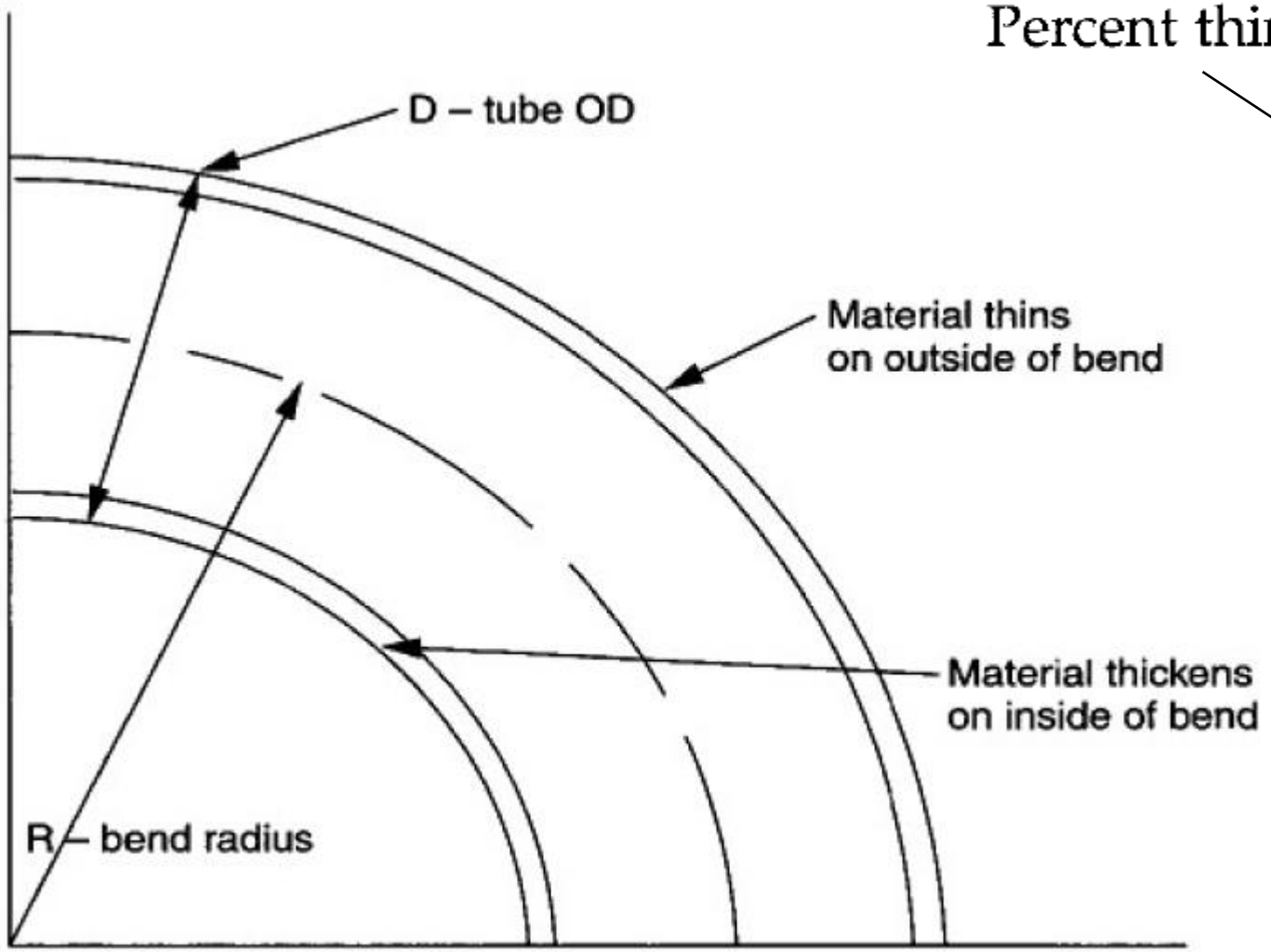
! $p_{radno} < p_b$ dok se ne ostvari kontakt cevi sa kalupnom šupljinom/alatom

- $p_b$ - pritisak radnog fluida u momentu pucanja materijala cevi prilikom slobodne ekspanzije
- $t_0$ - početna debljina materijala cevi; $d_0$ - početni spoljašnji prečnik cevi
- $\sigma_{UTS}$ - zatezna čvrstoća materijala

$$p_{\min} = (0.13 + 1.15 t_0/d_a)\sigma_Y$$

- $p_{min}$ - minimalni pritisak hidraulične tečnosti koji sprečava nabor materijala pri izradi T-cevi hidrodeformisanjem
- $\sigma_Y$ - napon tečenja materijala
- $d_a$ - prečnik ispupčenja cevi

$$\text{Percent thinning} = \{D/2 \div (R + D/2)\} \times 100\%$$




- stanjenje materijala [%]
- R - poluprečnik centralne linije radijusa savijanja [mm]
- D - spoljašnji prečnik cevi [mm]

***Promena debljine materijala cevi prilikom savijanja***

# Projektovanje procesa hidrodeformisanja

## Klasifikacija prozvoda na osnovu geometrije

Hidrodeformisanje se koristi u raznim granama industrije:

- Transport (automobili, motocikli, brodovi, avioni i vozovi)
- Hlađenje/grejanje/sanitarije, rezervoari, uređaji za domaćinstvo
- Industrija nameštaja, svetlo, optika
- Medicina

sa neznatnom promenom uzdužne ose

bez promene uzdužne ose

sa značajnom promenom uzdužne ose

| Bauteilgeometrie | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Geschlossener Querschnitt<br>zatvoreni poprečnog preseka | | | Offener Querschnitt<br>otvoreni popr. pres. | |
| Veränderung des Querschnitts<br>promena poprečnog preseka | | | | |
| ohne Änderung der Längsachse | mit geringfügiger Änderung der Längsachse | mit signifikanter Änderung der Längsachse | Flachteile<br>ravni delovi | Hohlstrukturen<br>šuplji delovi |
| (1) | (2) | (2) | (1 / 2) | (1) |
| (1) | (2) | (1) | (1) | (1) |
| (1) | | | | |

*(Fitting und Faltenbälge)*

***Cev i meh***

*(Verteilerbalken und Mischbatterie)*

## ***Razvodnik i mikser***

***Razvodna grana***

***Izduvna grana***

***Bregasta osovina***

***Razvodnik***

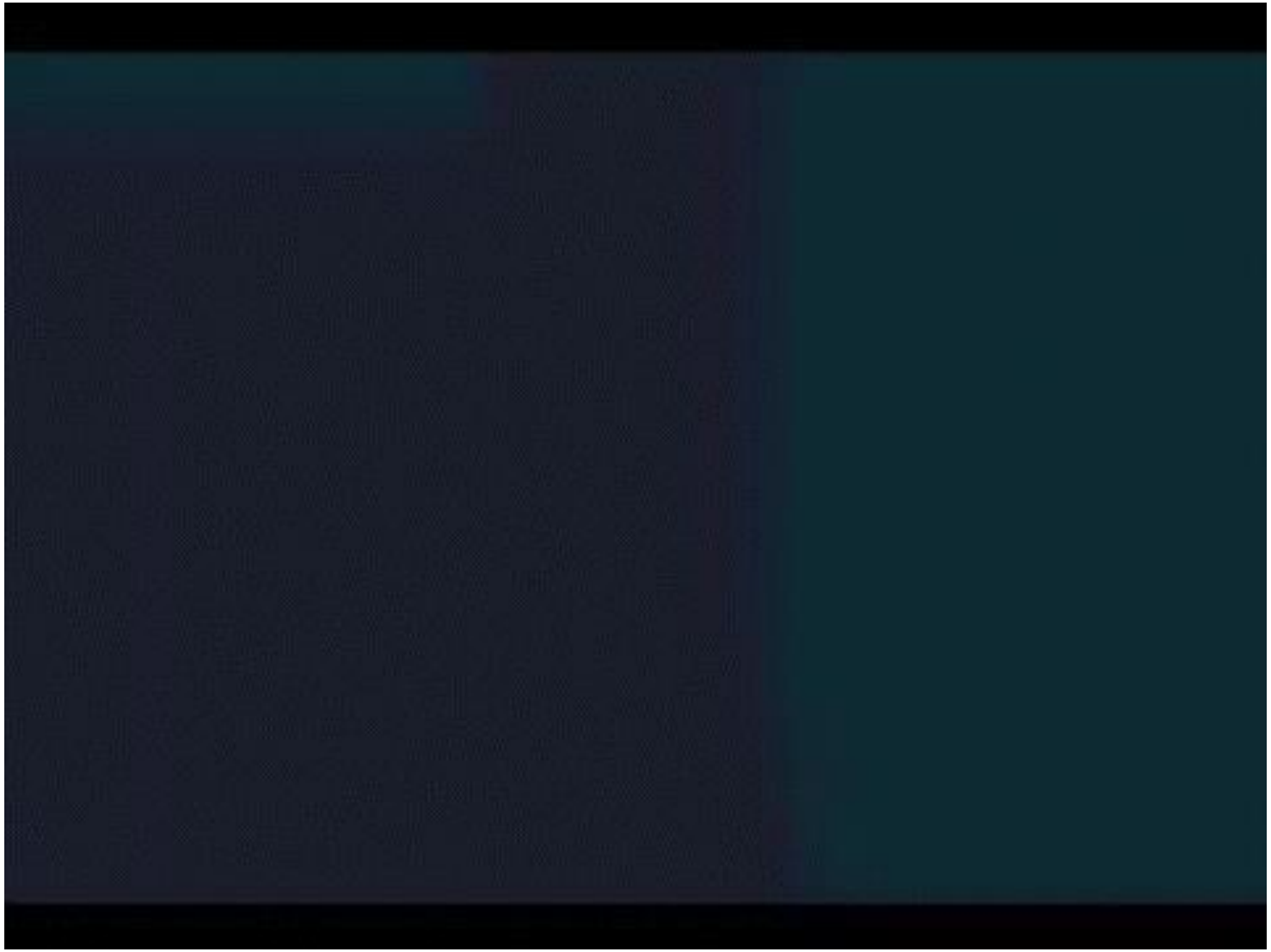
*(Bauteile des Antriebsstrangs)*

***Komponente pogonskog sklopa***

***Izrada haube automobila***

https://www.youtube.com/watch?v=gpYsExL_hUQ

https://www.youtube.com/watch?v=83fGTxa6COY



***Duboko izvlačenje u kombinaciji sa hidrodeformisanjem***

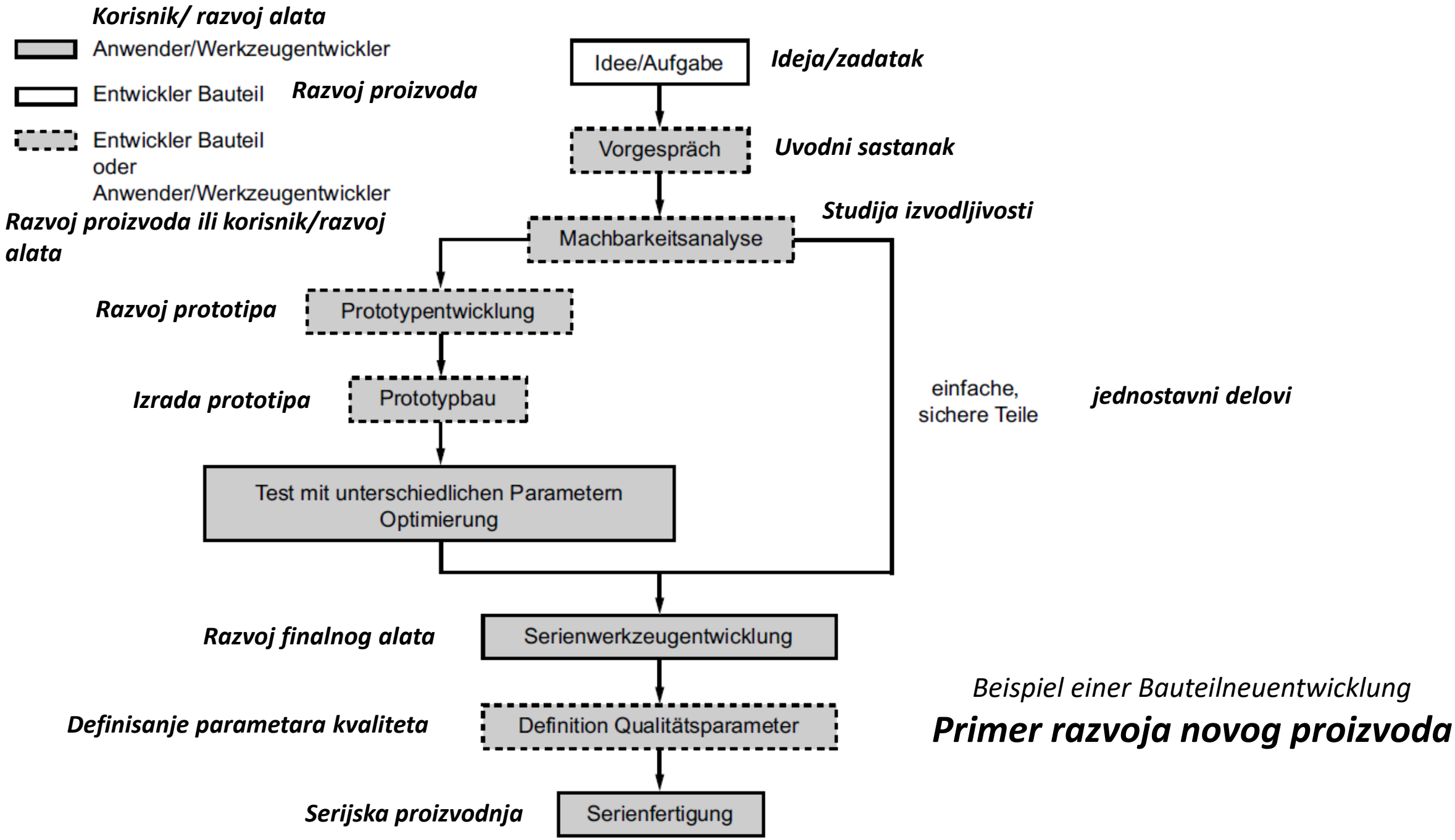
https://www.youtube.com/watch?v=n-ht_5Ysurc

# Zahtevi pri konstrukciji proizvoda

Posebni zahtevi se stavljaju pred proizvod
- dimenzionalna i dimenzijska tačnost,
- kvalitet površine, uključujući stil i izgled,
- zidovi ili gradienti debljine lima,
- promena u obliku,

Stanje solidifikacije (čvrstoća, bezbednost sudara),
- Masa i
- otpornost na koroziju

Značaj pojedinačnih parametara zavisi od funkcije komponente/proizvoda u finalnom proizvodu. Zbog specifičnosti procesa i izvodljivosti različitih tehnoloških varijanti, hidroformiranje nudi dobre mogućnosti za ispunjavanje još većih zahteva u odnosu na navedene parametre.




*Beispiel einer Bauteilneuentwicklung*

***Primer razvoja novog proizvoda***

## *Ograničenja tehnologije hidrodeformisanja*

| parametar | najčešća vrednost [mm] | maksimalna vrednost [mm] |
|---|---|---|
| dužina cevi | 1500 (2000) | 12000 |
| prečnik | 20 - 120 | 600 |
| debljina zida | 0,5 - 4 | 50 |

- procesno orijentisan dizajn komponenti podrazumeva i praćenje parametara procesa hidrodeformisanja. Geometrija radnog komada se menja tokom obrate – od poluproizvoda do gotovog dela. Na primer, promena poprečnog preseka, debljine zida, dužine
- najčešće i maksimalne vrednosti pojedinih parametara u tehnologiji hidrodeformisanja su prikazani u tabeli