

# 7. Holečkova konference



**Tepelné zpracování kokilových tenkostěnných odlitků  
pro zajištění specifických deformačních vlastností  
D-dílů ze slitiny AlSi7Mg**

**22.3.2017**

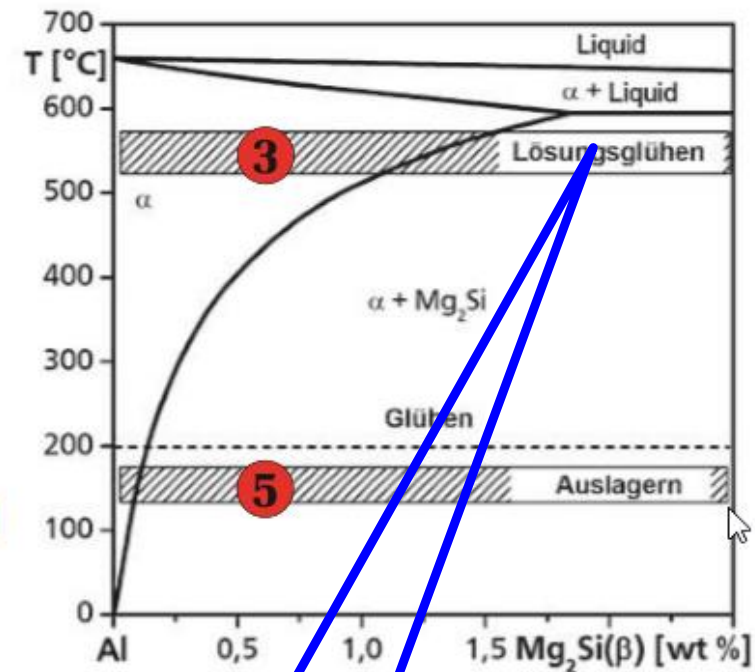
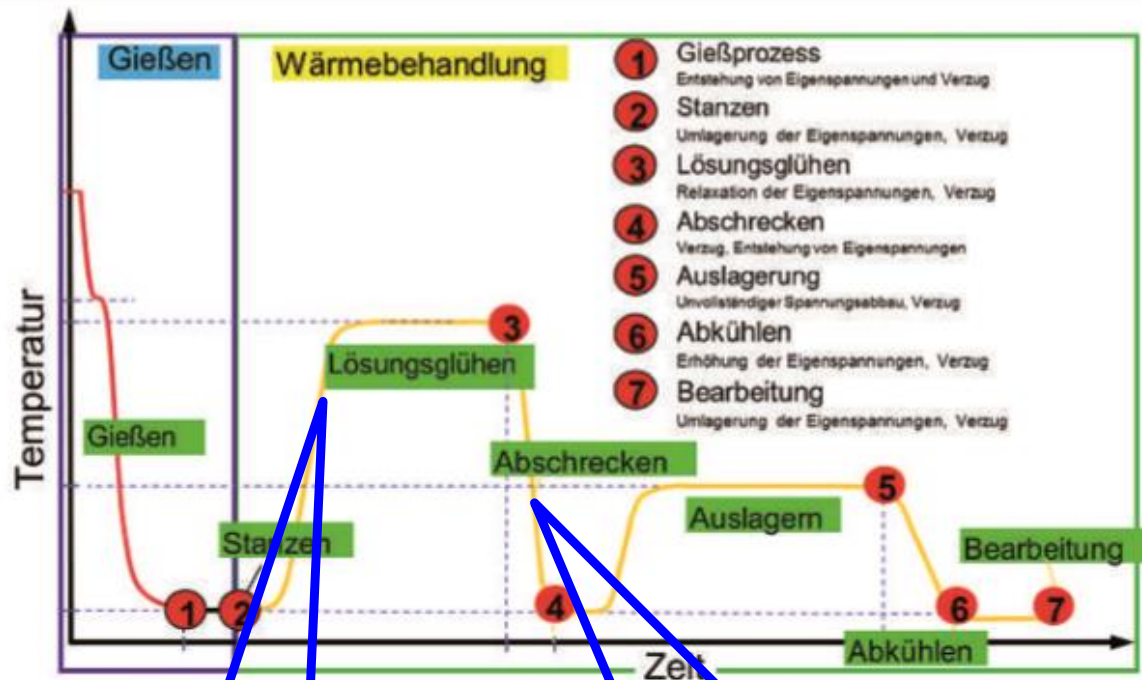
**Dr. Marko Grzinčič**

# OBSAH

- Teorie tepelného zpracování
- Vlastnosti slitiny AlSi7Mg
- Experimentální část
  - metalurgie
  - technologie
  - tepelné zpracování
- Vyhodnocení

# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )



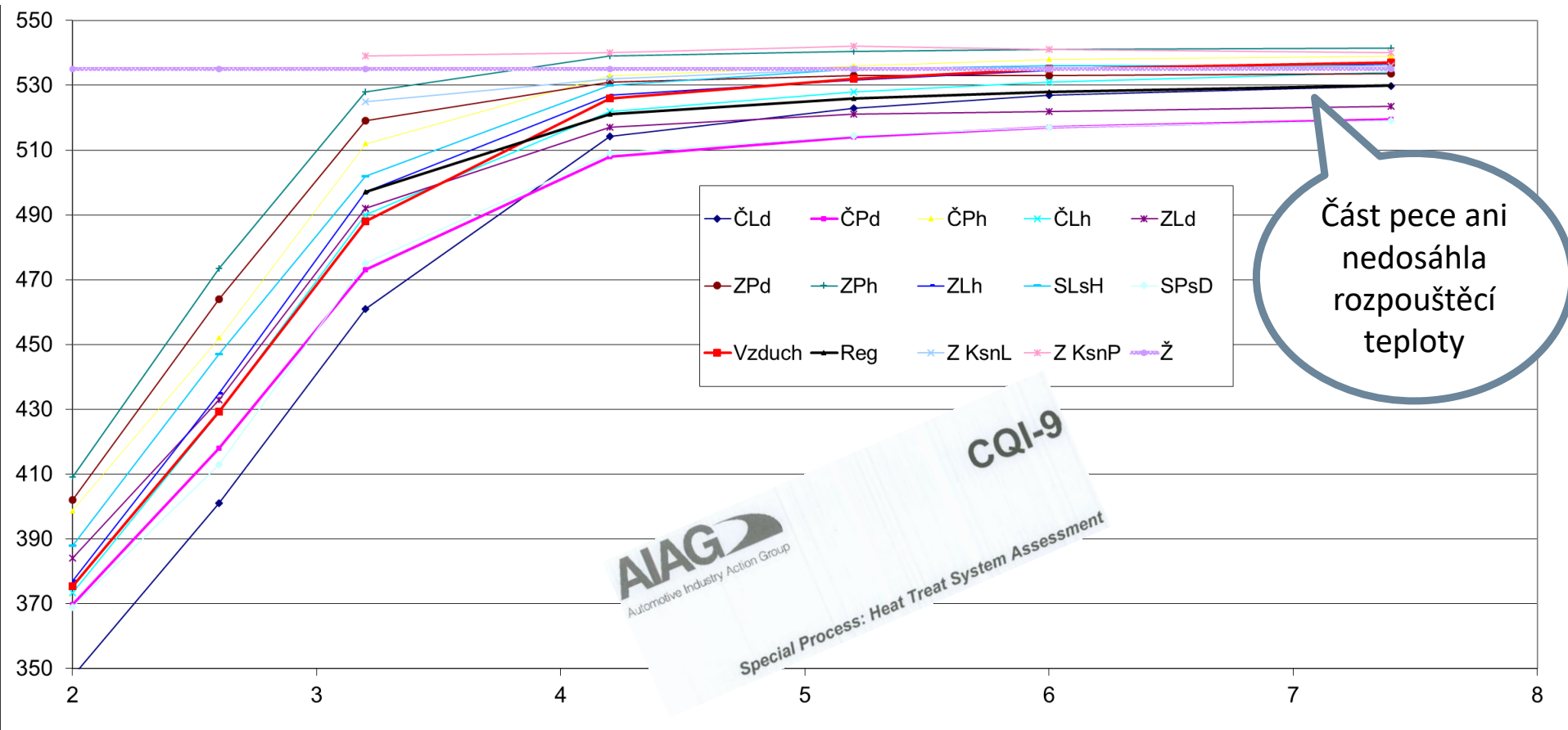
Ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu

Rychlé ochlazení s cílem získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$

Teplota blízká maximální rozpustnosti prvku

# Teorie tepelného zpracování

## Rozpouštěcí ohřev v praxi



# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

**Grossmannův faktor:** charakterizuje vztah mezi ochlazovacím prostředím a ochlazovaným materiálem (odlitkem). Je definovaný vztahem:

$$H = h/2.k$$

kde:  $h$  – koeficient mezipovrchové tepelné vodivosti [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ], který je možný popsat vztahem :

$$h = q/A.(T_1 - T_2)$$

kde :  $q$  – tepelný tok z ochlazovaného materiálu do ochlazovacího média [W]

$A$  – ochlazovaná plocha [ $\text{m}^2$ ]

$T_1$  – teplota povrchu ochlazovaného materiálu [K]

$T_2$  – teplota ochlazovacího média [K]

$k$  – tepelná vodivost ochlazovaného materiálu [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]

**Čím je vyšší hodnota Grossmannového faktoru,**

**tím intenzivněji se realizuje proces ochlazování.**

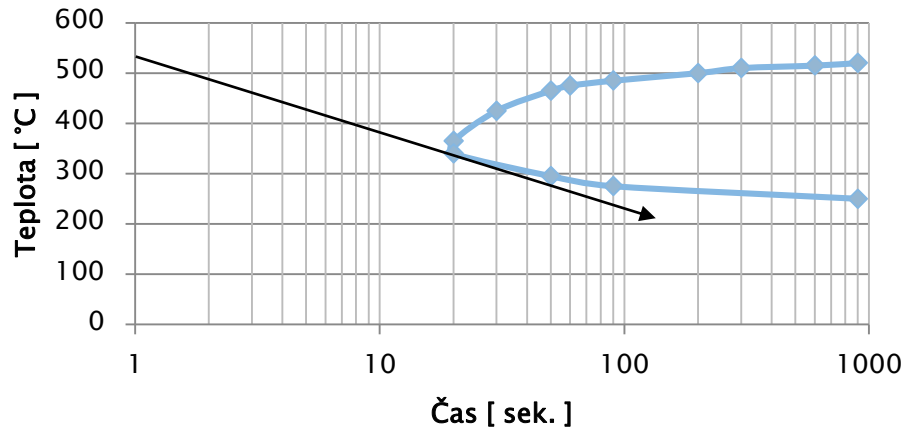
# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

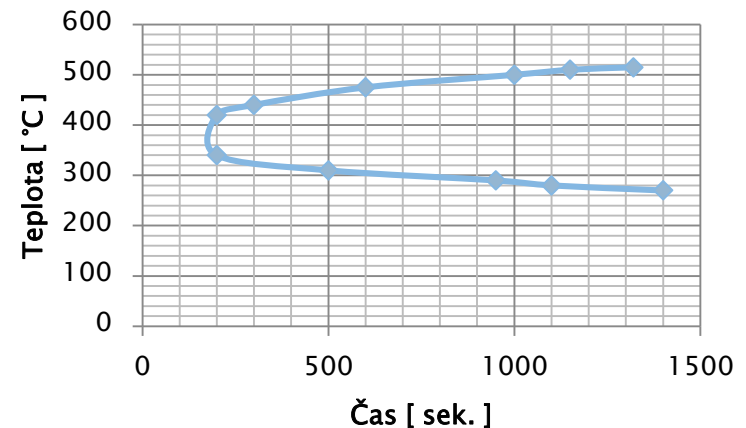
TTC resp. TTPC křivky (time – temperature curves, time – temperature – property - curves)

- můžeme určit kritickou rychlost ochlazování
- TTC (TTPC) křivka pro slitinu

## TTC křivka pro AlSi6Cu4



## TTC křivka pro AlSi9Cu1



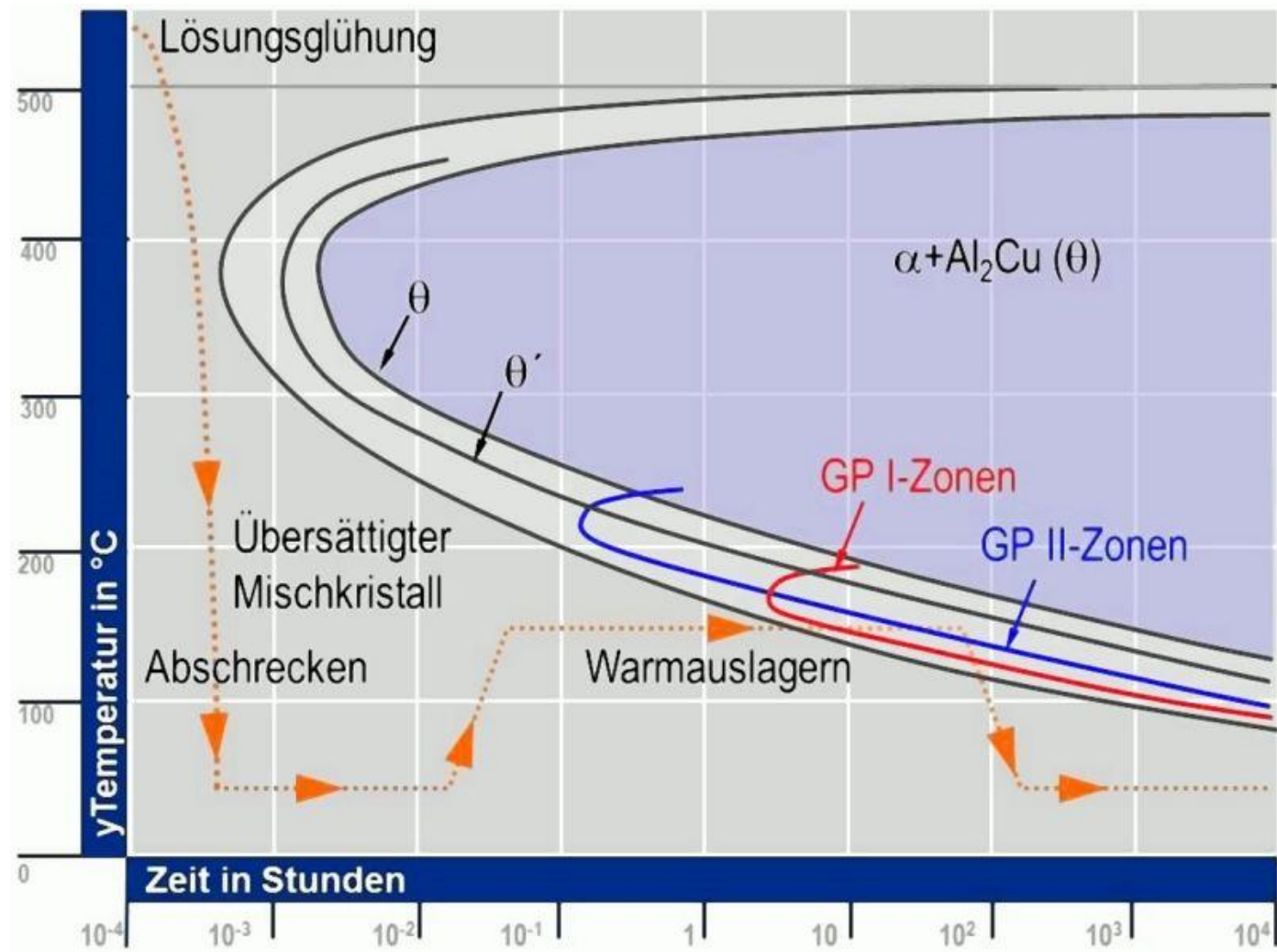
Když aplikujeme teplotu 530 °C jako teplotu rozpouštěcího žíhání, potom **kritická rychlost ochlazování** po teplotu 340 °C je **9,5 °C/sek.**

Kritická rychlost ochlazování, při teplotě rozpouštěcího žíhání 515 °C po teplotu 340 °C je **0,875 °C/sek.** resp. 52,5 °C/min.

# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

Slitina typu AlCu4  
Uveden jen  
ilustrativní příklad  
TTC-křivky



# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

Vliv teploty vody **bez cirkulace** na rychlost ochlazování

Zvýšit rychlost ochlazování je možné velmi účinně přidáním NaCl – 10 % roztok. Ochlazovací schopnost vody se tímto způsobem zvýší 11 násobně ( při teplotě 400 °C ).

Teplota vody [ °C ]	Rychlost ochlazování v °C.sec. <sup>-1</sup> při teplotě	
	400 °C	200 °C
20	200	700
40	100	550
80	30	200
20 + 10 % NaCl	2.200	1.300



# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

Hodnoty Grossmannového faktoru

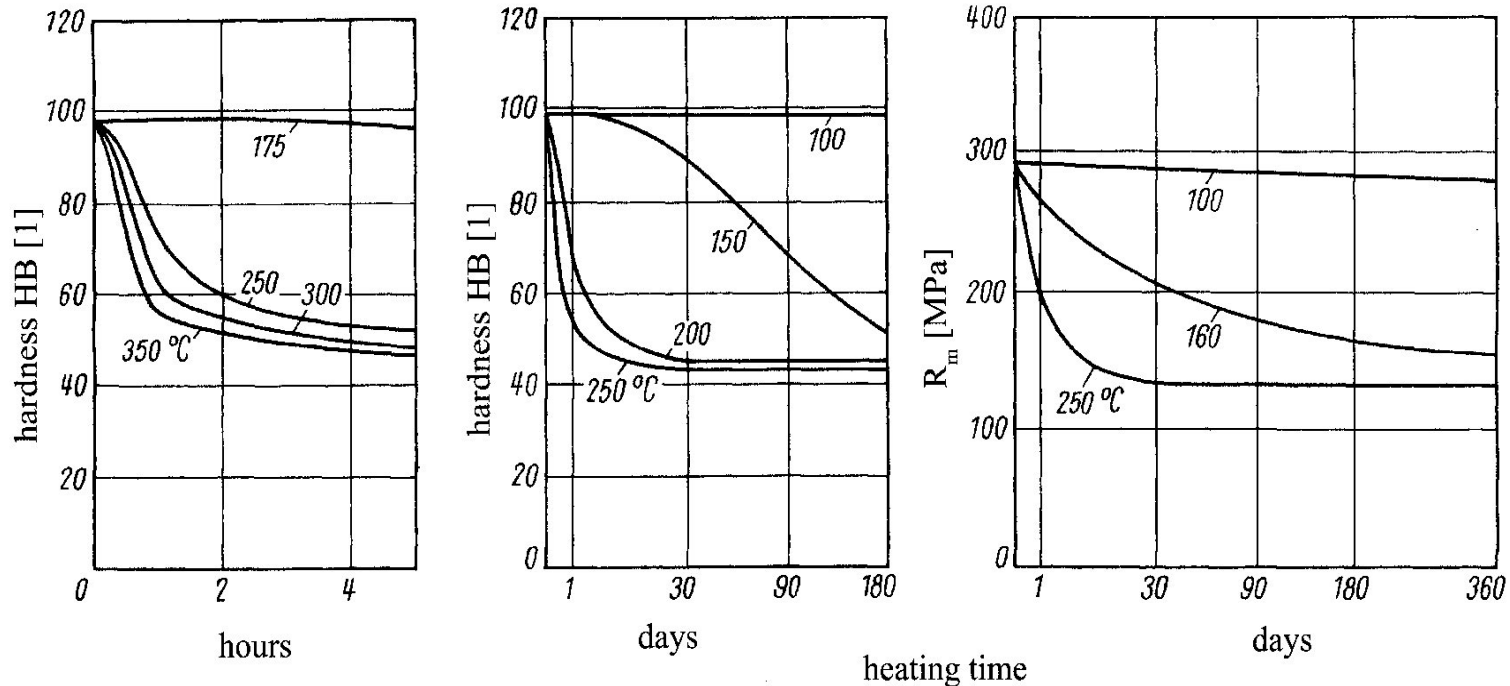
Médium	Teplota ochlazovacího média [°C]	Rychlost proudění [m.s <sup>-1</sup> ]	Grossmannův f.
Voda	27	0,00	1,07
		0,25	1,35
		0,50	1,55
Voda	38	0,00	0,99
		0,25	1,21
		0,50	1,48
Voda	60	0,00	0,86
		0,25	1,09
		0,50	1,33
Voda	93	0,00	0,06
		0,25	0,08
		0,50	0,09

# Teorie tepelného zpracování

Vytvrzování ( *heat treatment for precipitation strengthening* )

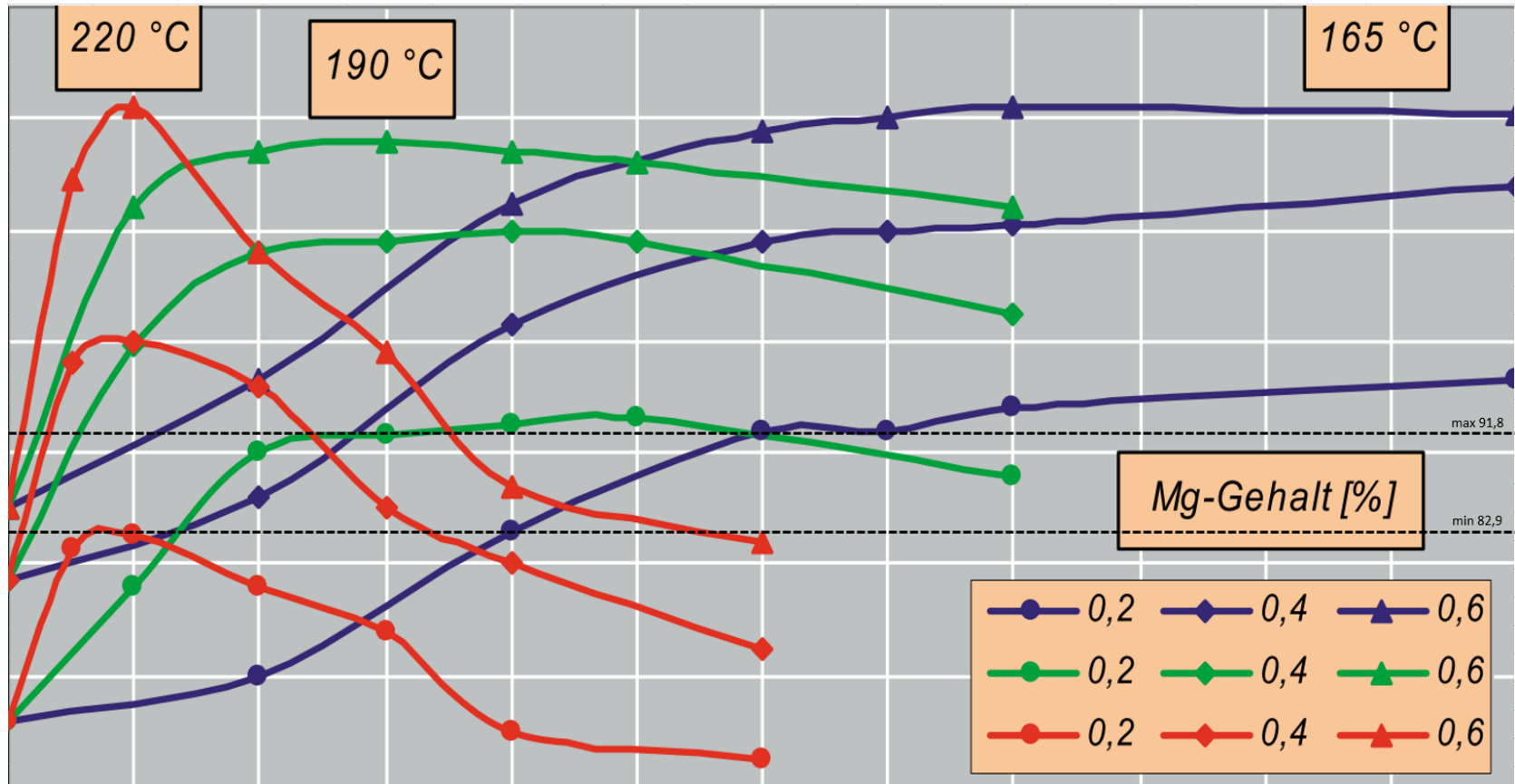
Fáze precipitačního zpevnění ( *precipitation hardening* ) - zpevnění způsobené precipitáty vzniklými z přesyceného tuhého roztoku

Úlohu zpevnění  $\alpha$  fáze má **intermetalická fáze  $Mg_2Si$**



Změna pevnostních vlastností slitiny AlSi10Mg po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí od teploty exploatace

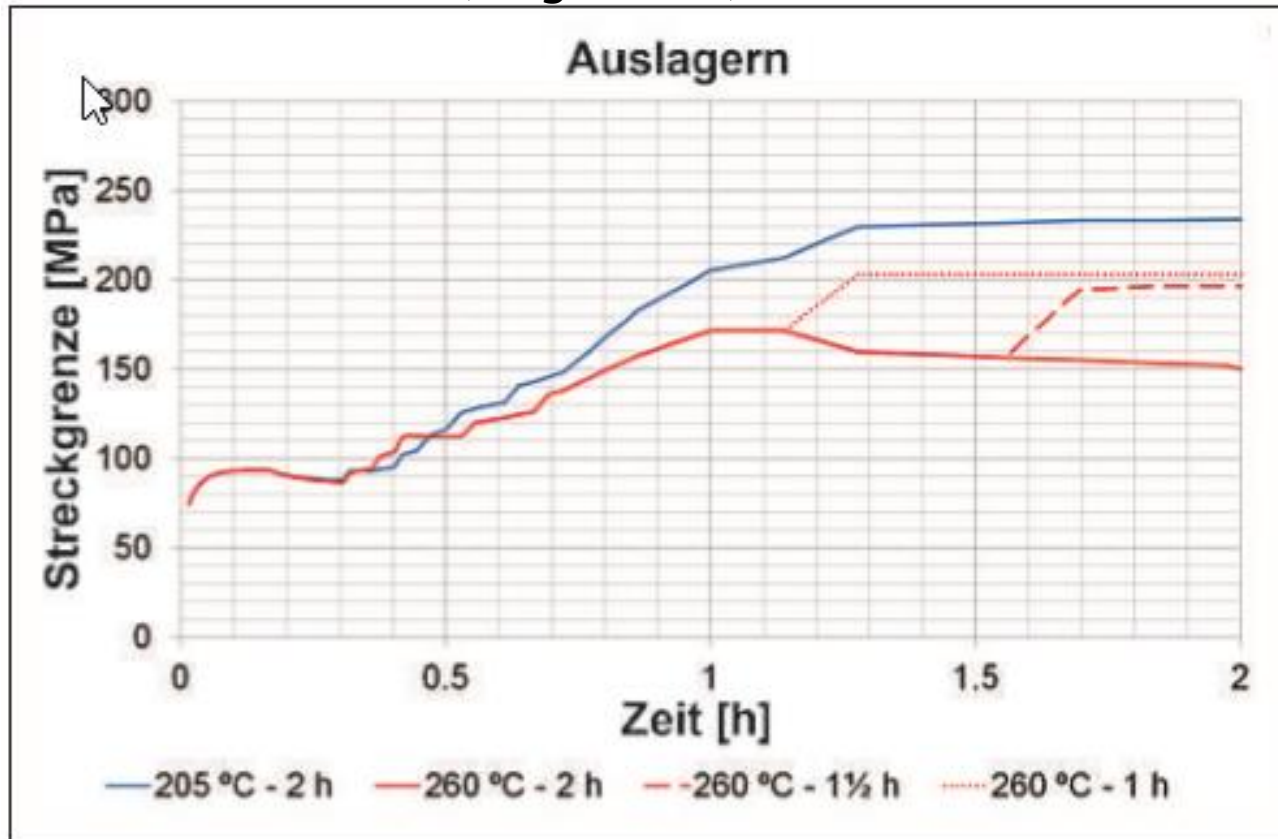
# Tepelné zpracování – řešerše praktických příkladů



Zdroj: Dambauer, G., Pabel, T., Schumacher, P.: Optimierung der Wärmebehandlungsparameter der Legierung EN AC-ALSi7Mg0,x, Giesserei-Rundschau 53, 2006

# Tepelné zpracování – řešerše praktických příkladů

Vypočítaný vývoj meze kluzu během stárnutí v jednom konkrétním bodě (Magma-sw)



Zdroj: Gaspers, H.J., Thorburg, J.: Optimierung der Wärmebehandlung für ein Aluminium-Strukturbauteil durch virtuelles Experimentieren, Giesserei Rundschau 62, 2015

# Vliv technologie

**Hall – Petchův vztah:**  $R_{p0,2} = R_o + k \cdot d^{-1/2}$

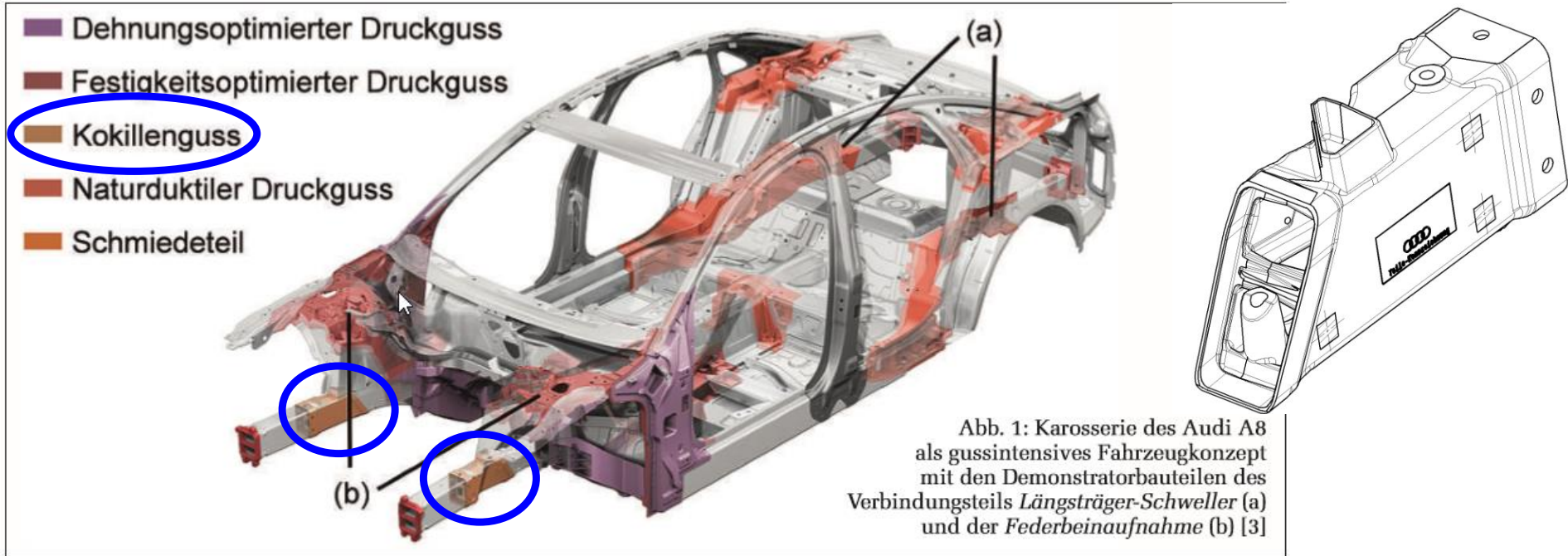
Kde  $R_o$  a  $k$  jsou materiálové konstanty a  $d$  velikost dendritických buněk.

**Čím je  $d$  větší, tím je  $R_{p0,2}$  menší !**

Možnosti ovlivnění S-DAS:

- Teplota formy – případné chlazení (vzduchové; vodní)
- Teplota formy – licí takt
- Lokální odvod tepla z odlitku
  - bodové chlazení formy
  - vodivý nátěr jádra
- Teplota taveniny – teplo na  $T_{likvidu}$  musíme někam odvést

# Zadání zákazníka



Zákazník požadoval mechanické vlastnosti na plochých vzorcích dle DIN-norem:

$$R_{m \min} = 220 \text{ MPa}$$

$$R_{p0,2} = 160 \div 190 \text{ MPa}$$

$$A_{5 \min} = 7 \%$$

# Technologický vývoj – příprava taveniny



## *Vlivy:*

- Primární slitina (jeden dodavatel)
- Podíl vratu a jeho stav (max 50%)
- Obsah hořčíku (rozpětí X)
- Obsah mědi (max. X)
- Očkování ( Ti X hmotn. %)
- Modifikace (sodík X ppm; každých X min)
- Metalurgická čistota – oxidické vměstky
- Odplynění/naplynění (DI X)

# Technologický vývoj – licí technologie

Sklopné lití do kokily s 2 otisky

Středový licí kůl s pěnovým filtrem na dně kůlu

Plnění spodem + etážové zavtokování

Nálitkování masivních partií – náboje napříč dílem

Obr.



# Technologický vývoj – tepelné zpracování

Typ linky

Stabilita garantovaná normou CQI-9

Rychlost přejezdu z pece rozpouštění do zachlazovací vany (max. X s)

Teplota vody

Proudění vody ve vaně

Koš na odlitky

Parametry režimu



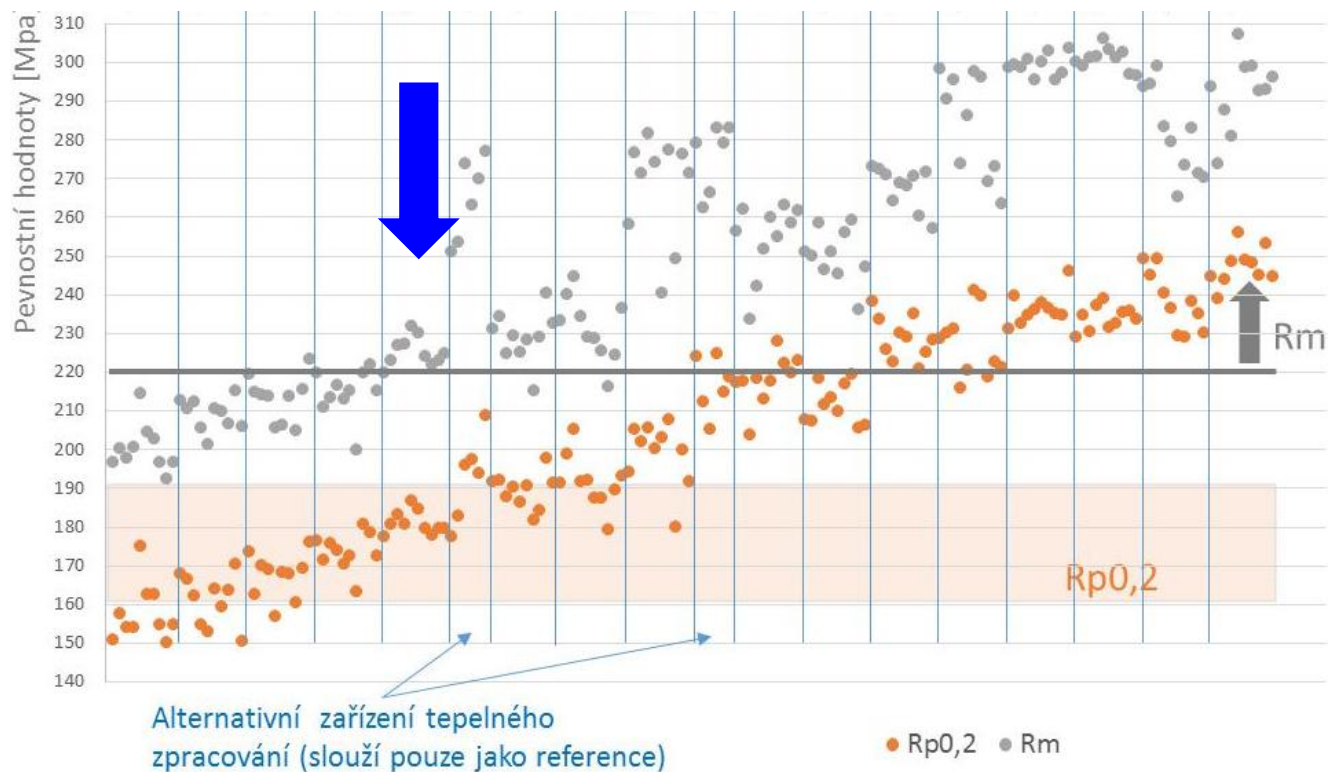
Víko  
zachlazovací  
vany

# Technologický vývoj – tepelné zpracování

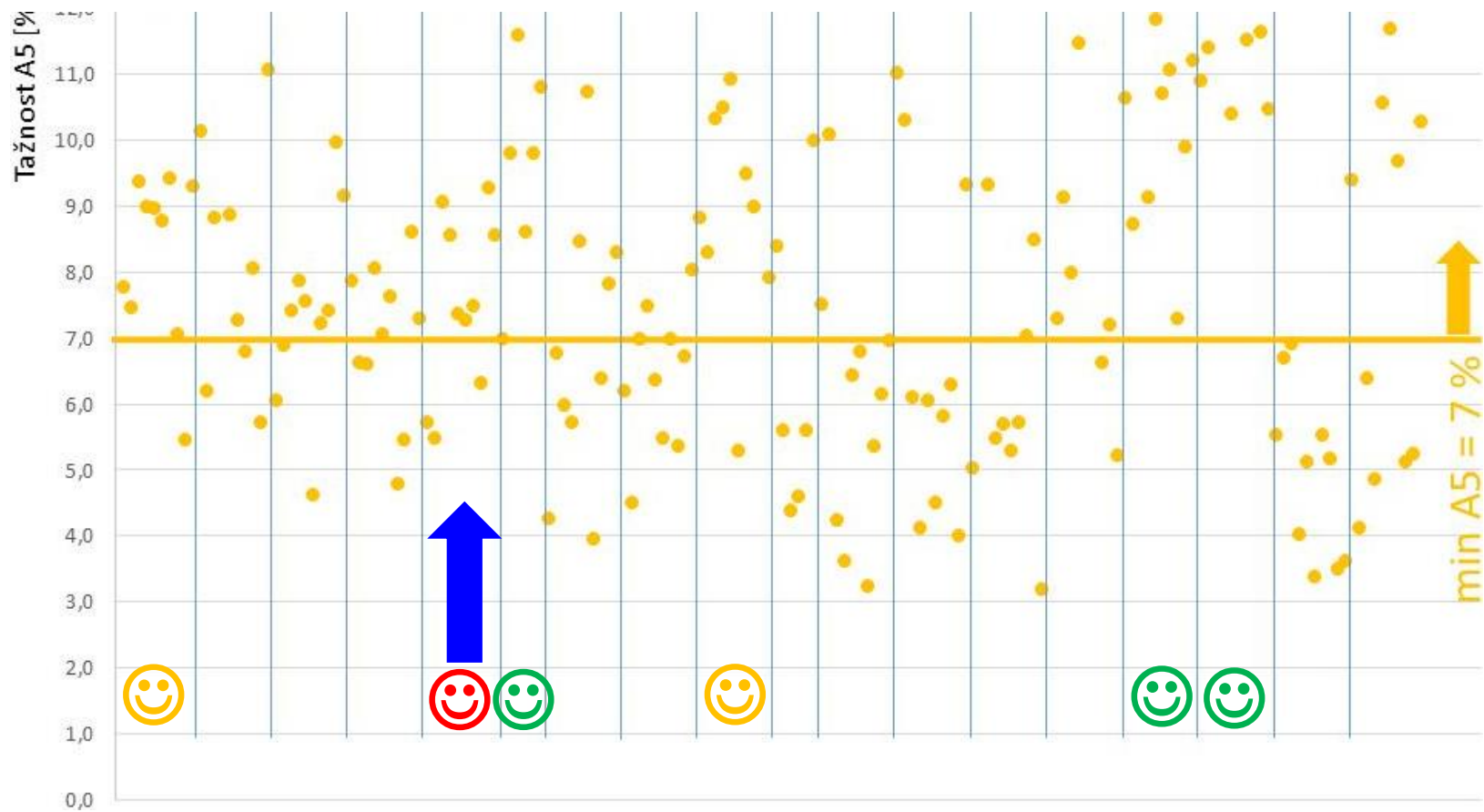
Ověření věrohodnosti publikovaných dat

Obr.

# Hodnocení - tahová zkuška



# Hodnocení - tahová zkuška



# Závěry

- Pokud řešíme specifické zadání mechanických vlastností, musíme experimentálně nalézt řešení
- Literatura uvádí jen hrubé vodítko
- Procesy jsou provázané a je nutné vnímat úlohu komplexně
- Začít se musí při nákupní specifikaci slitiny a všechny další výrobní procesy jsou významné
- Testy musí být prováděny provozně; technologický vývoj je velmi drahý
- Konkrétní příklad vyžaduje nejvyšší představitelnou pracovní disciplínu napříč slévárnou

Děkuji za pozornost

