

## AMPACITA VENKOVNÍCH VEDENÍ

Ampacita (Ampere Capacity) = proudová zatížitelnost

- omezení – maximální dovolená provozní teplota vodiče; ta dána typem vodiče a provozním stavem
- vlivy – klimatické (teplota okolí, vítr, Slunce)
- další limity: mechanika (průhyb), magnetické pole, stabilita

Provozní teplota AlFe lan (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced)

dle ČSN EN 50341-3-19

- normální zatížení: 80°C
- krátkodobé zvýšení při zvláštním zatížení (až 150°C)
- při zkratu: 200°C

x předpisy výrobce, zhoršení optických a mechanických vlastností, průhyb

## Tepelné modely venkovního vedení

Tepelná vodivost vodiče  $\lambda$  vysoká  $\rightarrow$  teplota vodiče uvažována konstantní po průřezu:  $T_{AV}$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

### Diferenciální rovnice pro teplotu vodiče

$$M \cdot c_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (\text{W / m})$$

$M$  ..... poměrná hmotnost vodiče ( $\text{kg/m}$ )

$c_p$  ..... měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$P_J$  ..... Joulovy ztráty ( $\text{W/m}$ )

$P_S$  ..... výkon dodaný slunečním zářením ( $\text{W/m}$ )

$P_M$  ..... ohřev magnetickým polem ( $\text{W/m}$ )

$P_R$  ..... výkon odvedený sáláním ( $\text{W/m}$ )

$P_C$  ..... výkon odvedený konvekcí ( $\text{W/m}$ )

(také ohřev korónou, ochlazení odpařováním – obvykle neuvažujeme)

Střídavý odpor zohledňuje el. i mag. vlivy

$$P_Z = P_J + P_M = R_{ac} I^2 \quad (\text{W / m ; } \Omega / \text{m , A})$$

Ustálený stav – rovnice algebraická

$$\frac{dT_{AV}}{dt} = 0$$

Parametry AlFe lan

$$M = \rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe} \quad (\text{kg / m ; kg / m}^3, \text{ m}^2)$$

$$c_P = \frac{c_{Al} \cdot \rho_{Al} \cdot S_{Al} + c_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}}{\rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

$$\rho_{Al} = 2703 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \quad \rho_{Fe} = 7780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{Al} = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad c_{Fe} = 477 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

## Joulovy ztráty

$$P_Z = I_P^2 \cdot R_{dc0} \cdot k_{ac} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W / m})$$

$R_{dc0}$  .... měrný DC odpor ( $\Omega/\text{m}$ ) při teplotě  $T_0$

$T_0$ ..... referenční teplota, obvykle  $20^\circ\text{C}$

$b$ ..... teplotní součinitel odporu ( $\text{K}^{-1}$ )

$$b \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$k_{ac}$  ..... poměr mezi AC a DC odporem

$$k_{ac} = R_{ac} / R_{dc} > 1$$

## Výkon dodaný slunečním zářením

$$P_S = a \cdot D \cdot I_{př} \sin \omega \quad (\text{W / m})$$

$a$ ..... koeficient pohltivosti (absorpce) slunečního záření (-)

$$a \approx 0,5 \div 1$$

$D$ ..... průměr vodiče (m)

$I_{\text{př}}$  ..... přímé sluneční záření ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

sluneční konstanta  $I_0 \approx 1370 \text{ W} / \text{m}^2$

$\omega$  ..... úhel mezi slunečními paprsky a osou vodiče ( $^\circ$ )

### Výkon odvedený sáláním

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot \left[ (T_{\text{AV}} + 273,15)^4 - (T_a + 273,15)^4 \right] \quad (\text{W} / \text{m})$$

$T_a$  ..... teplota okolí ( $^\circ\text{C}$ )

$\sigma$  ..... Stefanova-Boltzmannova konstanta

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$\varepsilon$  ..... emisivita tepelného záření (-),  $\varepsilon \approx 0,5$

## Výkon odvedený konvekcí

$$P_C = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{AV} - T_a) \quad (\text{W} / \text{m})$$

$\alpha$  ..... součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha = k_w \cdot \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{D} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$$

$\lambda$  ..... tepelná vodivost vzduchu ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

Nu ..... Nusseltovo číslo (-)

volná konvekce  $\text{Nu}_V = f(\text{Gr}, \text{Pr})$

nucená konvekce  $\text{Nu}_N = f(\text{Re})$

$k_w$  ..... koeficient vlivu směru větru (-)

$$k_w = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cos 2\psi + 0,364 \sin 2\psi$$

$\psi$  ..... úhel mezi směrem větru a normálou k vodiči

## Vliv trojsvazku

$P_Z$  – každý vodič 1/3 celkového proudu (ztrát)

$P_S$  – beze změn, stínění proměnlivé

$P_C$  – beze změn, mezní vrstva x cm

$P_R$  – menší, částečné sálání na stejnou teplotu

$$k_{\text{rad}} = 1 - \frac{2 \cdot \text{Arctg}\left(\frac{D}{2l}\right)}{\pi}$$

l ... rozteč svazku (m)

→ menší ochlazování, nižší zatížitelnost (cca o 0,5%)

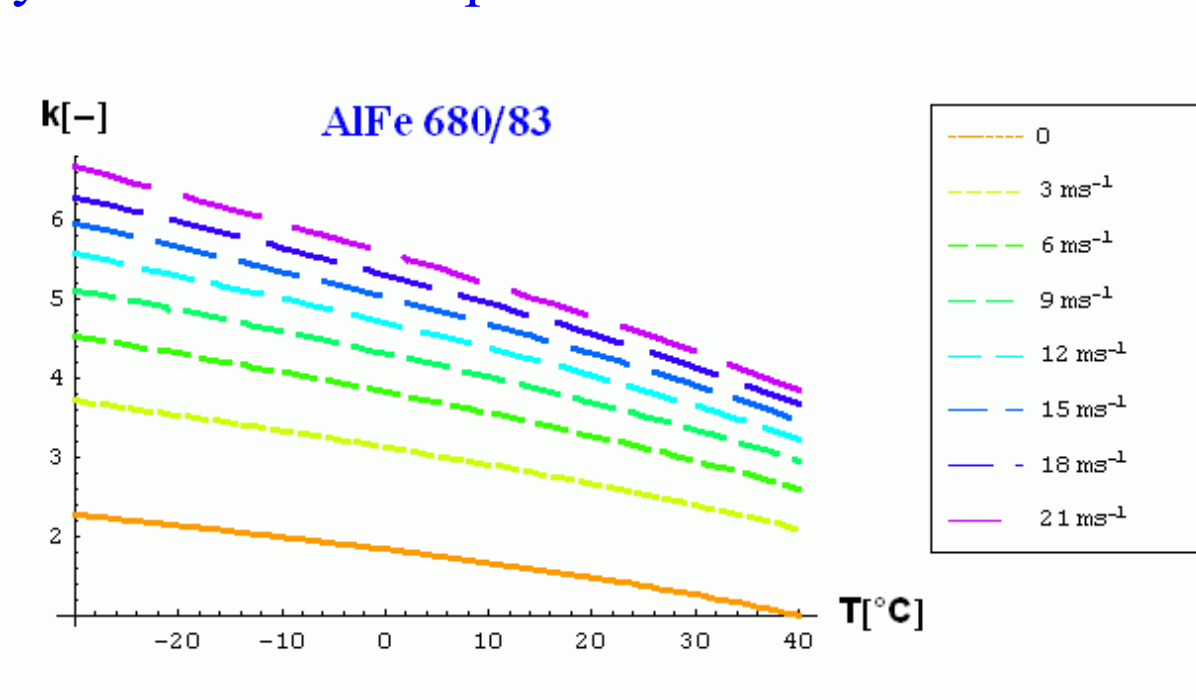
## Ustálené stavy

Ampacita pro danou teplotu vodiče

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{k_{\text{ac}} \cdot R_{\text{dc}}}} \quad (\text{A})$$

## Ustálená teplota – algebraická rovnice 4. řádu

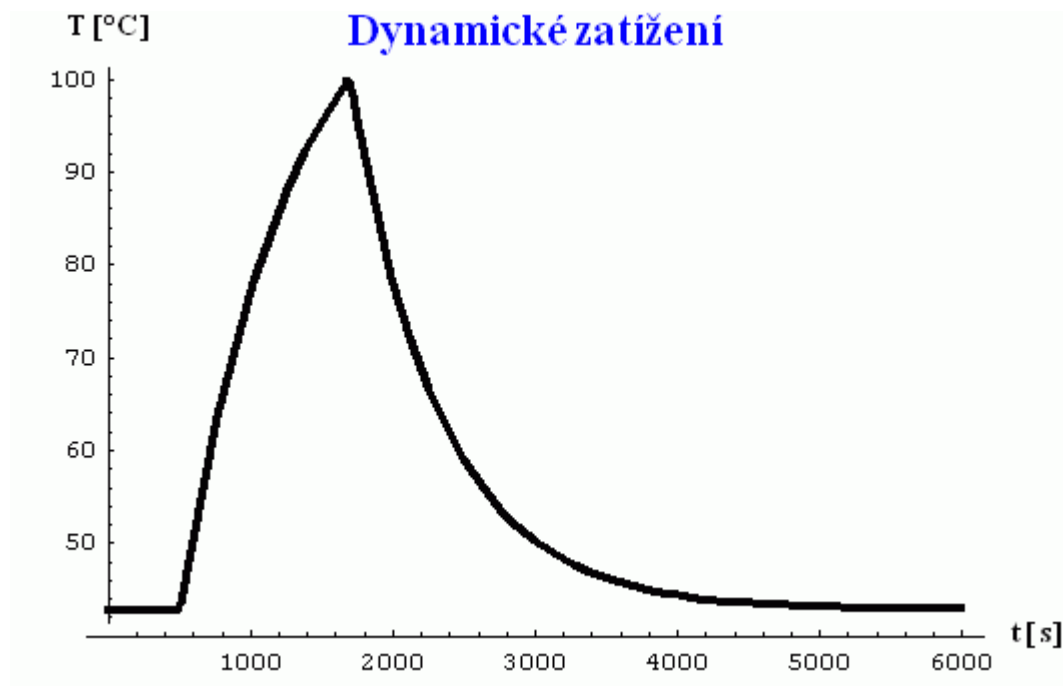
### Vliv klimatických veličin na ampacitu





## Dynamické stavy

- Změny v konfiguraci soustavy, výrobě, zatížení, 10x minut, akumulace tep. energie.
- Rychlost dějů závisí na tepelné časové konstantě: např. pro 434-AL1/59-ST1A  $\tau_{\text{vod}} = 16,5 \text{ min}$ .
- Př.: AlFe 680/83 přetěžováno 20 min do  $100^{\circ}\text{C}$  → dynamická ampacita 2292 A.

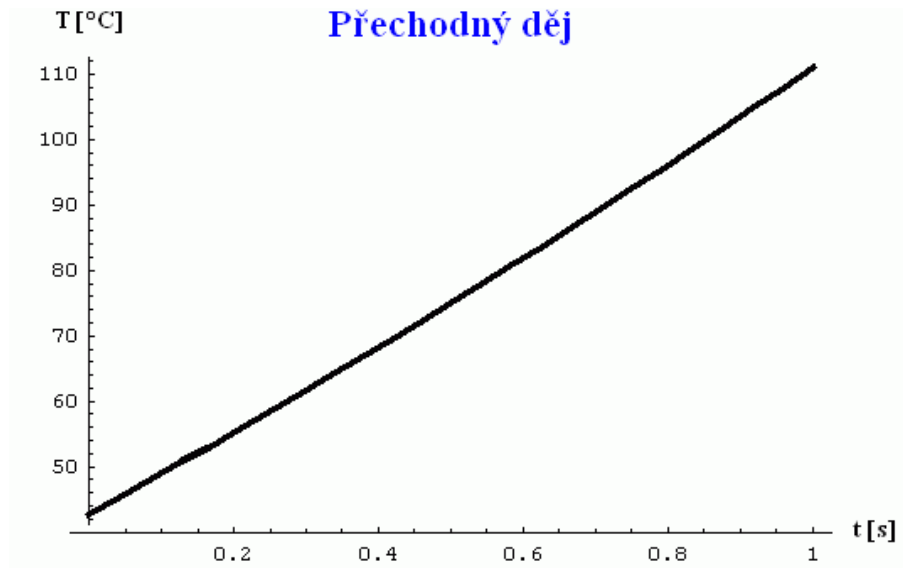


## Přechodné děje

- Bleskové, zkratové proudy.
- Adiabatické podmínky  
( $P_S = 0, P_R = 0, P_C = 0$ ).

$$M \cdot c_P \frac{dT_{AV}}{dt} = P_Z = I_Z^2 \cdot R_{ac0} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W / m})$$

Př.: AlFe 680/83, zkrat 50 kA po 1 s



## Zatížitelnost linek

### Limitní faktory zatížení

- průhyb
- zařízení v rozvodně (MTP, ODP)
- lano

### Měření teploty (průhybu)

- kontaktní
- měření mechanického napětí (CAT-1 – Nexans)
- termovize
- průhyb laserem  $\rightarrow$  T
- fázorové měření  $\rightarrow$  průměrná teplota
- mechanické vlastní kmity  $\rightarrow$  průhyb  $\rightarrow$  T (Ampacimon)
- průběžná teplota odrazem v optických vláknech (*Distributed Temperature Sensing*)

## CAT-1

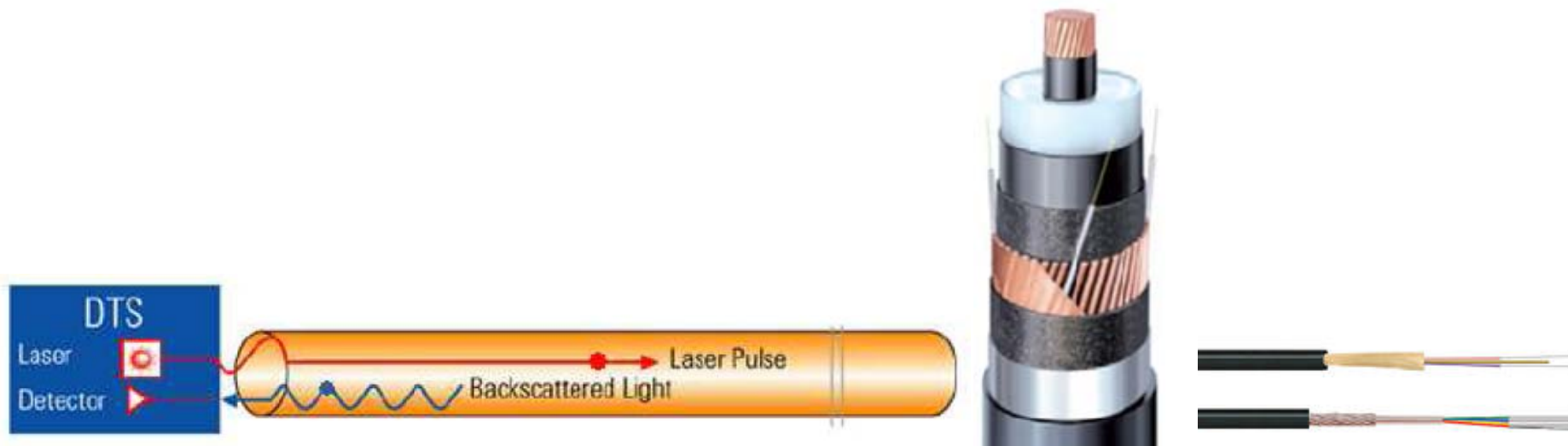


## Ampacimon



# DTS

## AP Sensing



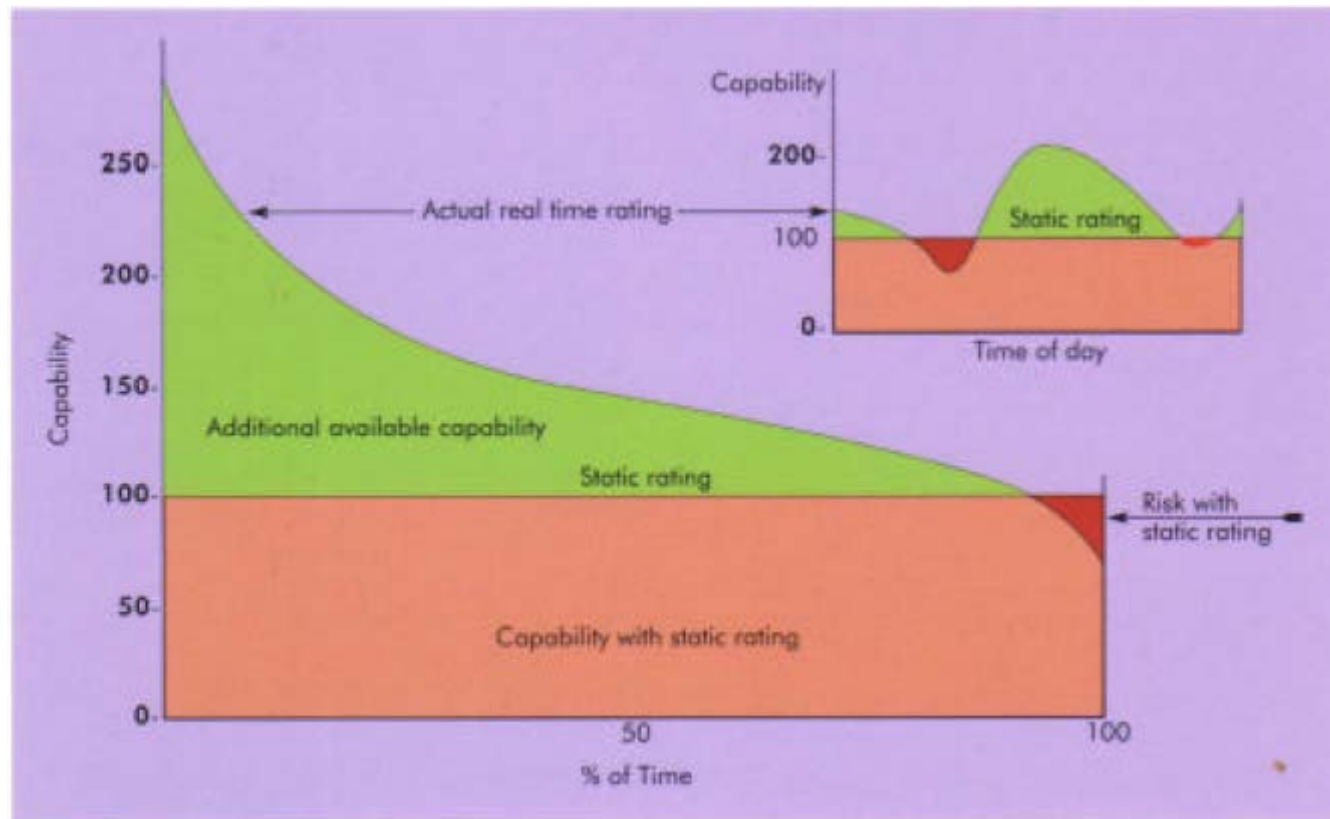
## Valcap - NKT Cables (V444 – Nošovice - Wielopole (PL))



## Zatěžování

- statické – konstantní limity, někdy léto x zima (nastavení ochran)
- dynamické (*dynamic line rating, real-time line rating*)
  - online – měření teploty vodičů → data do dispečinku → omezování zatížení
  - online – měření teploty vodičů + meteorologická data → tepelné modely pro rozhodování
  - offline – jen meteodata do modelů
  - predikční systémy založené na síti meteostanic (USA)
- normální x mimořádné stavy – rozhodovací čas pro dispečera

# Dynamic Line Rating



## Řízení zatížení

- rekonfigurace
- redispečink zdrojů
- FACTS
- mimořádné stavy (omezování odběrů)

## Kritická místa a stavy

- vývody z elektráren
- mezinárodní propojení
- dlouhá „paralelní“ vedení
- tranzit x vnitřní zatížení
- OZE



## Dimenzování vodičů

Přístupy stanovení hraničních podmínek

Klimatická veličina	Rozsah pracovních podmínek	Hraniční hodnoty		
		pod-kritické	kritické	mezní
$T_a$ (°C)	-30 až 35	30	35	40
$w_S$ (m/s)	0,6 až 30	1,34	0,6	0
$I_{gm}$ (W/m <sup>2</sup> )	0 až 800	800	800	1100

Podmínky dle ČSN EN 50341-3-19 pro stanovení nejvyšší návrhové teploty vodičů:

- teplota okolí 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem náběhu 45° na vodič
- globální intenzita slunečního záření 1000 W/m<sup>2</sup>
- součinitel absorpce 0,5
- součinitel emisivity 0,5

## Zvyšování přenosových schopností („uprating“)

<b>Zvyšování</b>	<b>Metoda</b>	<b>Nástroj</b>
Proudu	zvýšení teploty	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	výměna vodičů	kompaktní / hladké vodiče vysokoteplotní vodiče
	speciální metoda	statistické metody metody reálného času
Napětí	izolace	výměna izolátorů / přídavné izolátory modifikace uchycení
	vzdálenost vůči zemi	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	mezifázová vzdálenost	změna dvojitého vedení na jednoduché nová hlava stožáru

## Vodiče pro venkovní vedení

Obvykle více materiálů, pevnost + vodivost.

### Klasické vodiče

- ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
- AAAC (All-Aluminium Alloy Conductor)
  - pevnější než ACSR, odolnější proti korozi, odolnější povrch
- ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
  - při stejné hmotnosti jako ACSR větší zatížitelnost a mech. pevnost
- AACSR (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced)
  - pro drsnější klima, přechody řek,...
- AAC (All Aluminium Conductor)
  - vysoká zatížitelnost, pro krátká rozpětí



Kompaktní vodiče – „bez vzduchových mezer“, extrémně až „sheath-type“

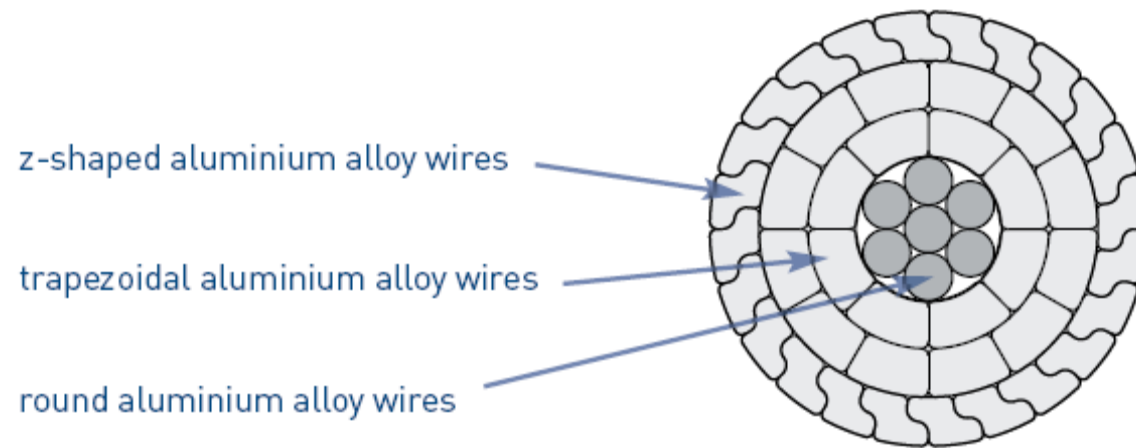
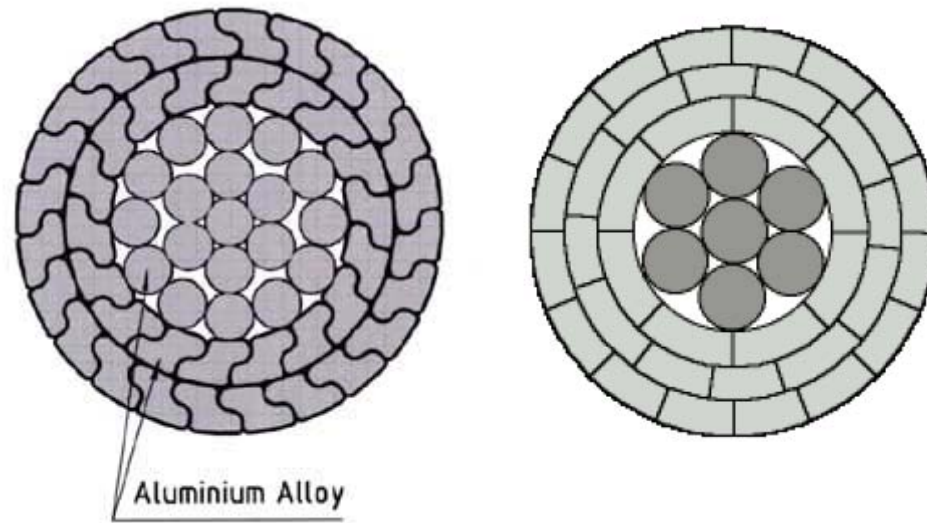
– plný materiál;

o vodivější x těžší, stačí menší průměr, nižší ztráty, vyšší odolnost proti větru (omezení tančení vodičů), omezení koroze (nižší ztráty maziva), omezení námrazy

- sheath-type – menší průměry, kratší rozpětí



- kompaktní profily: ACSR/TW, AERO-Z



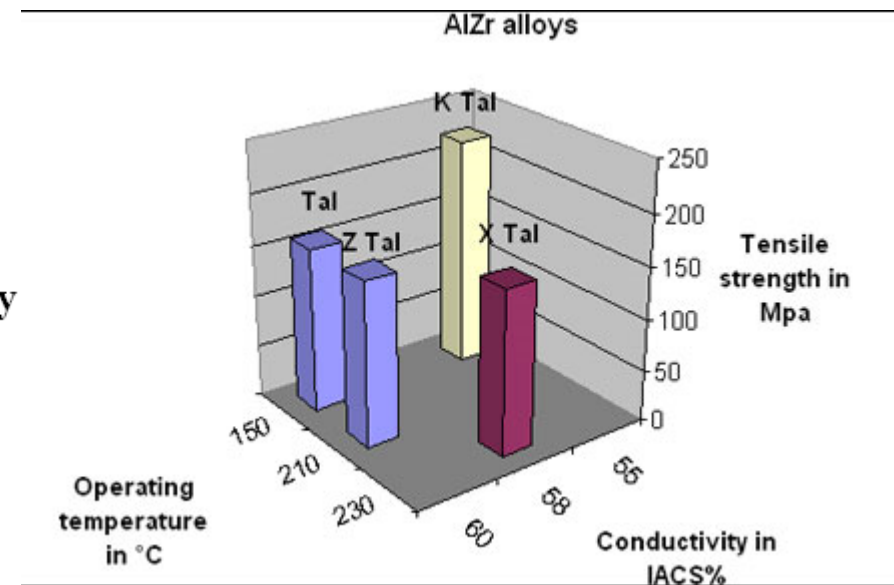
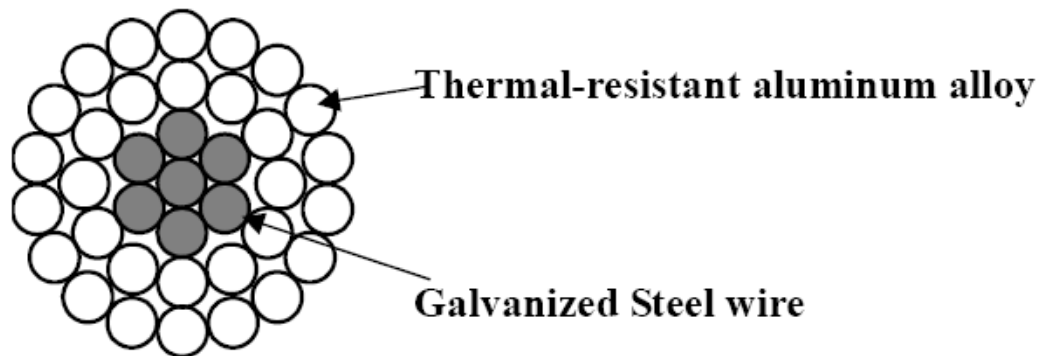
## Vysokoteplotní vodiče

- slitiny hliníku a zirkonu s pevností do vyšších teplot (TAI, ZTAI, XTAI)

→ např. TACSR

Dovolená ustálená teplota

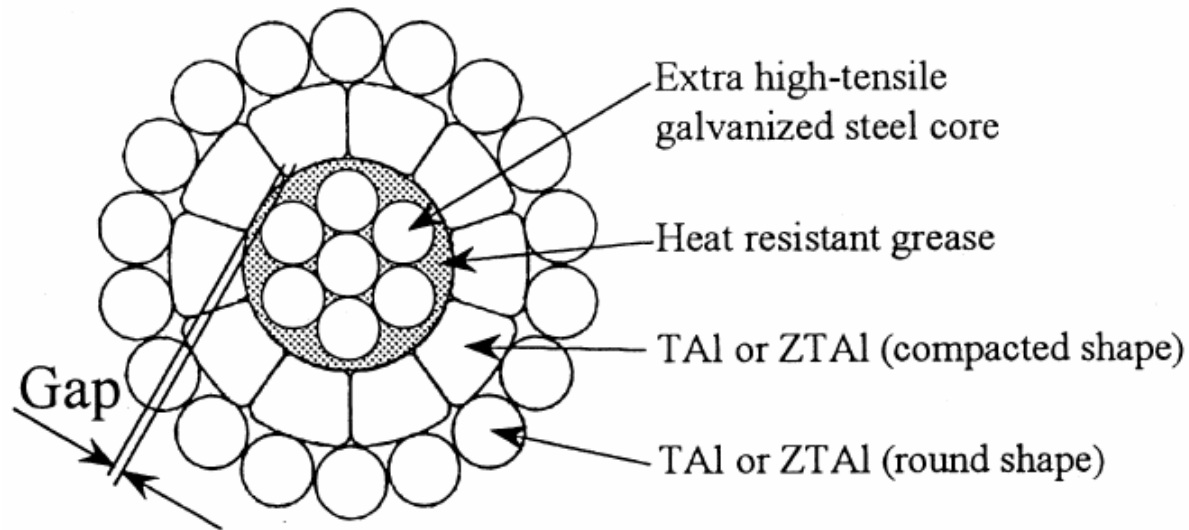
TAI: 150°C, ZTAI: 210°C, XTAI: 230°C



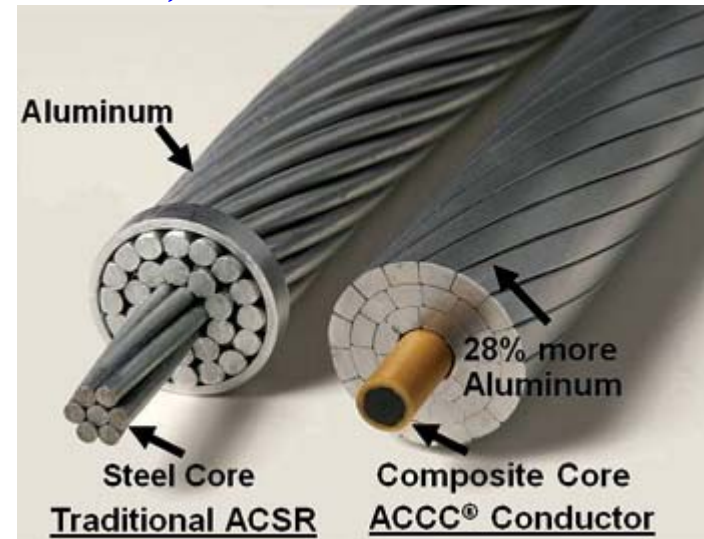
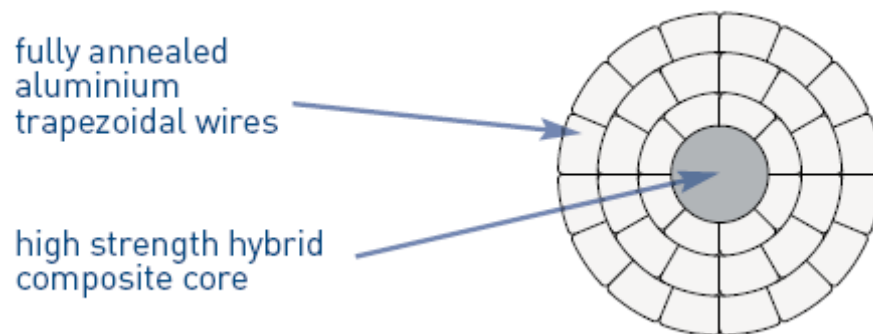
- pevnost dána oběma materiály až do přechodového bodu (knee-point), pak jen jádro,  $T_{kn} \approx 100^\circ\text{C}$

- nízká roztažnost jádra: Invar (Fe + Ni), 1/3 oproti oceli, cca  $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , malý průhyb x nižší pevnost (pro kratší rozpětí) → např. TACIR

- vodiče s mezerou mezi Fe a Al: GZTACSR (Gap-type ZT-Aluminium Conductor Steel Reinforced) – tahem namáháno pouze jádro, tj. roztažnost jádra ( $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pro Fe x  $18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  u AlFe)



- kompozitní materiály: ACFR (Aluminium Conductor Carbon Fibre Reinforced), ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)
  - o kompozit uhlíkových a skleněných vláken, vysoká pevnost, malá délková roztažnost, bez koroze, dlouhá rozpětí (až 2,5 km), lehký, nižší ztráty, více Al, do 150°C



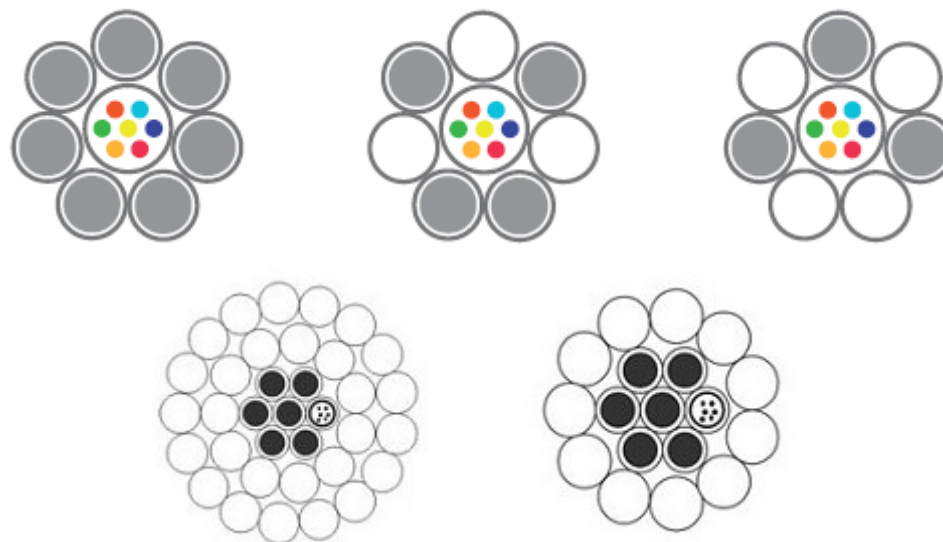


- ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported) – jádro pokryto Zn-Al proti korozi, nese plné zatížení, plášť ze žíhaného hliníku, do 200°C
- optická vlákna: OPGW (Optical Ground Wire) – nejčastěji v zemnicích lanech, komunikace

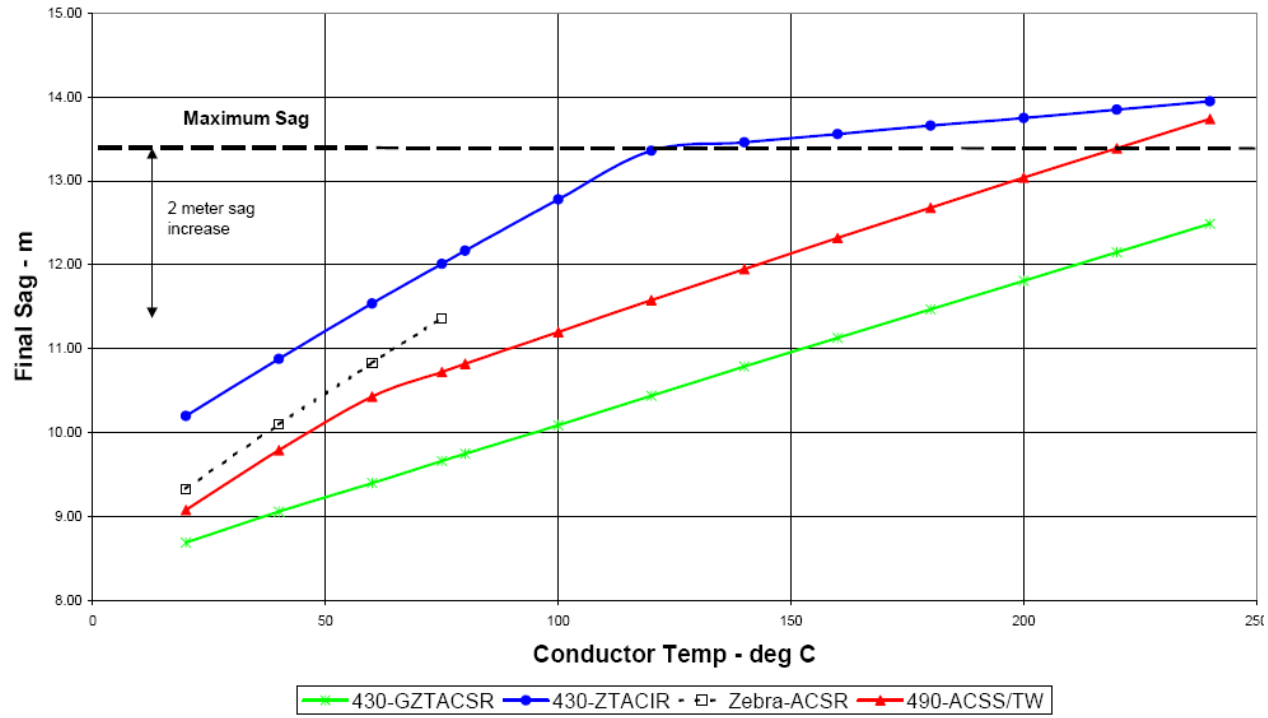
Konstrukce OPGW se slaněnou trubičkou



Konstrukce OPGW se středovou trubičkou



Case 1 - Final Sag vs Conductor Temperature



## Porovnání vlastností nejpoužívanějších slitin hliníku

Slitina hliníku		Vodivost (%IACS)	Minimální únosnost v tahu (MPa)	Povolená provozní teplota (°C)	
				Ustálená	Pohotovostní
Tvrký	1350-H19	61,2	159 – 200	90	120
Tepelně odolný	TAL	60	159 – 176	150	180
Zvlášť tepelně odolný	ZTAL	60	159 – 176	210	240
Plně žíhaný	1350-0	63	59 – 97	200 – 250	250

## Porovnání vlastností nejpoužívanějších ocelí

	<b>Minimální únosnost v tahu (MPa)</b>	<b>Modul pružnosti (GPa)</b>	<b>Koeficient lineární roztlačnosti (<math>\times 10^{-6}</math>)</b>
Galvanizována ocel HS Galvanizována ocel EHS	1230 – 1320 1765	206	11,5
AC ocel plátovaná Al 20,3 % I.A.C.S	1103 – 1344	162	13,0
Zinc – 5 % Al Mischmetal Standard HS	1380 – 1450 1520 – 1620	206 (počáteční) 186 (konečný)	11,5
Galv. Invar	1030 – 1080	162	2,8 – 3,6

## Porovnání vlastností dalších materiálů jádra

Material	Density	$\sigma_R$ (//)	Specific strength (//)	Elastic modulus	Thermal expansion (//)	$T_{MAX}$
	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	MPa*dm <sup>3</sup> /kg	GPa	10 <sup>-6</sup> /°C	°C
Steel	7,8	1500	192 ( <i>reference</i> )	205	11,5	>300
Al alloy	2,7	325	120 (-37%)	65	23	80
Metal matrix Composite	3,4	1600	470 (+144%)	240	7	300
Carbon Fiber Composite	1,7÷1,8	2200	1250 (+550%)	150	<1	200