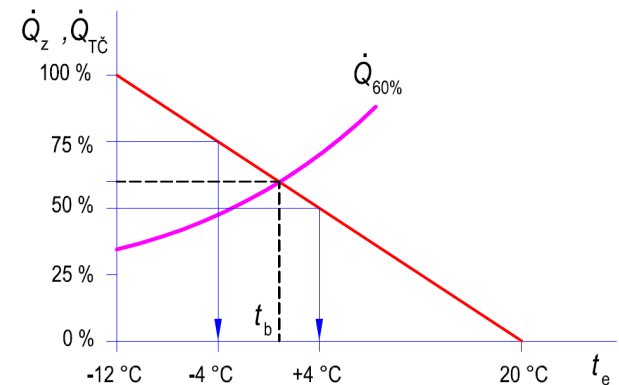




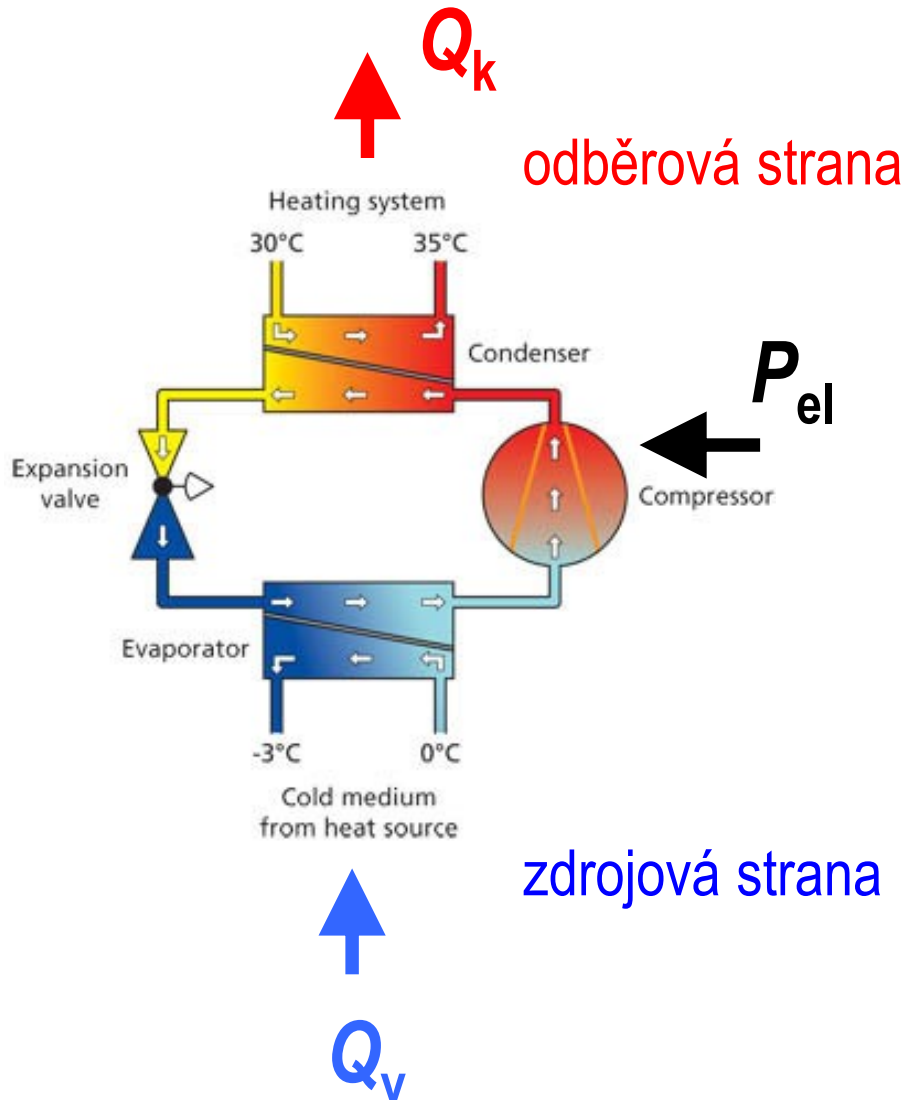
Navrhování a bilancování tepelných čerpadel

- parametry tepelného čerpadla
- provozní režimy, navrhování
- roční topný faktor TČ
- sezónní topný faktor soustav





Tepelné čerpadlo



$$\dot{Q}_k = P_{el} + \dot{Q}_v$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_k}{P_{el}}$$

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_k - P_{el}$$

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_k \cdot \left(1 - \frac{1}{COP} \right)$$



Parametry tepelného čerpadla

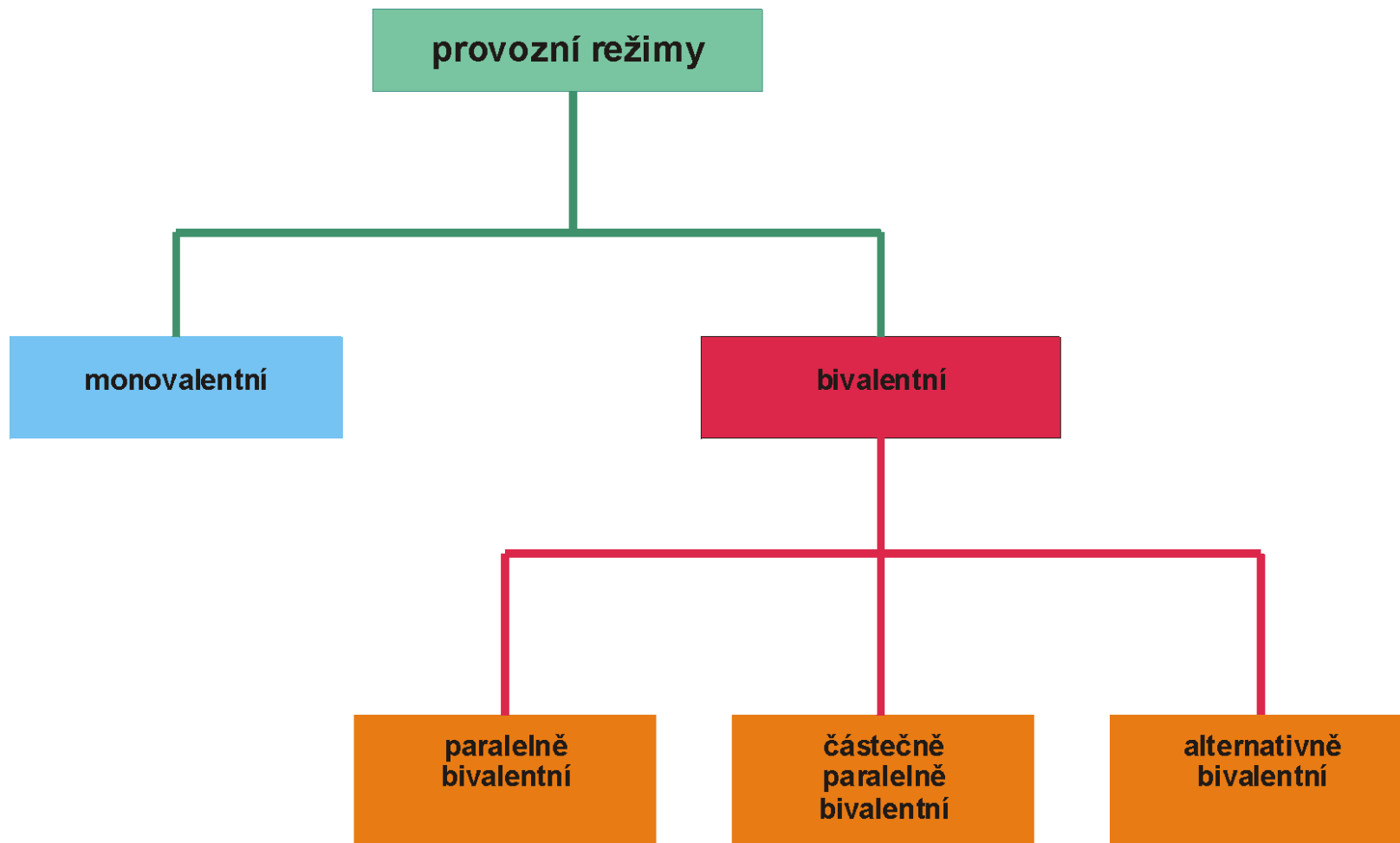
- **topný výkon Q_k [kW]** – výkon odebíraný z kondenzátoru
 - **topný faktor COP [-]**
-

při jasně definovaných podmínkách t_{v1} a t_{k2}

- **elektrický příkon P_{el} [kW]**
- **výkon zdroje NPT Q_v [kW]** – výkon přiváděný do výparníku



Provozní režimy tepelných čerpadel

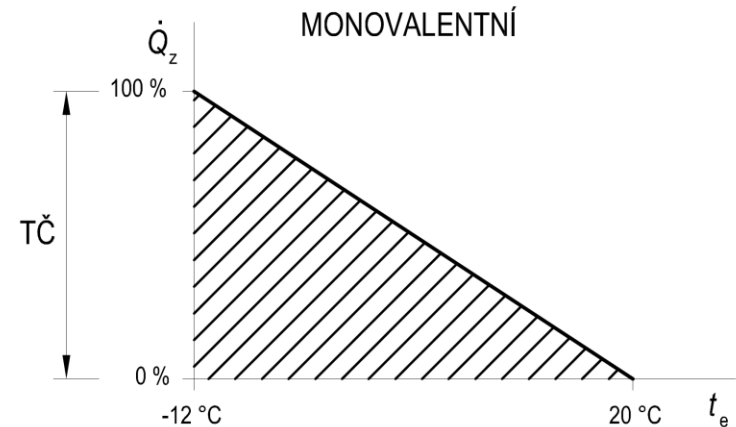




Provozní režimy tepelných čerpadel

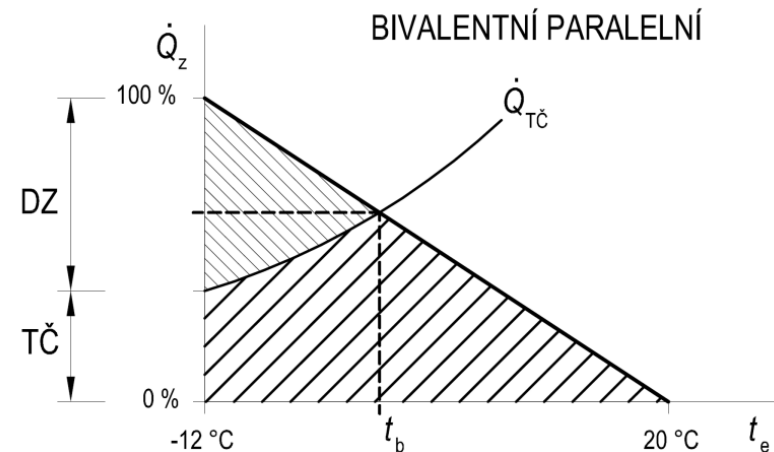
■ monovalentní provoz

- tepelné čerpadlo je jediným vytápěcím zařízením – nízkoteplotní vytápění do teploty otopné vody 55 °C



■ paralelně bivalentní provoz

- pod teplotou bivalence se připojává další zdroj, tepelné čerpadlo pracuje i pod bodem bivalence. **Nízkoteplotní otopná soustava** (velkoplošná otopná tělesa, podlahové vytápění) s teplotou do 55 °C

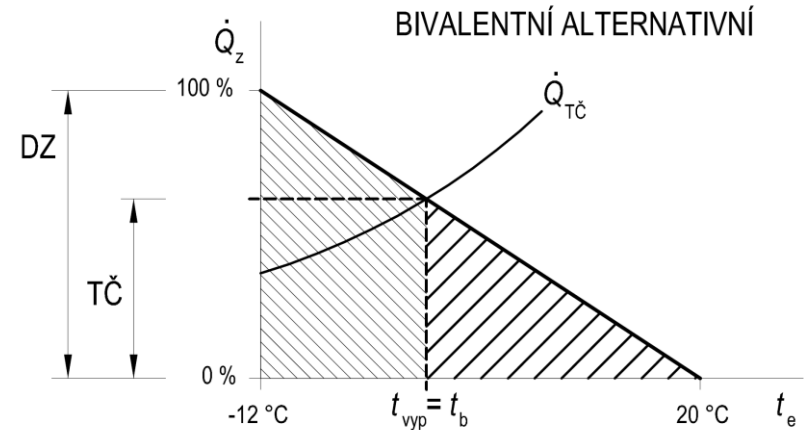




Provozní režimy tepelných čerpadel

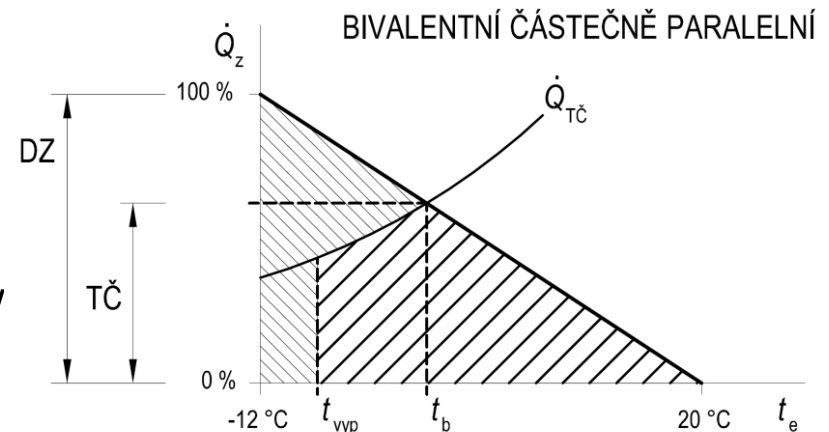
■ alternativně bivalentní provoz

- při poklesu pod stanovenou teplotu bivalence a vytápění zajišťuje jiný zdroj. Vhodné pro otopné soustavy s teplotou otopné vody do 90 °C



■ částečně paralelně bivalentní provoz

- pod teplotou bivalence (od výkonu) se připojuje další zdroj tepla, a dále při nedosažení potřebné výstupní teploty otopné vody se čerpadlo vypíná.





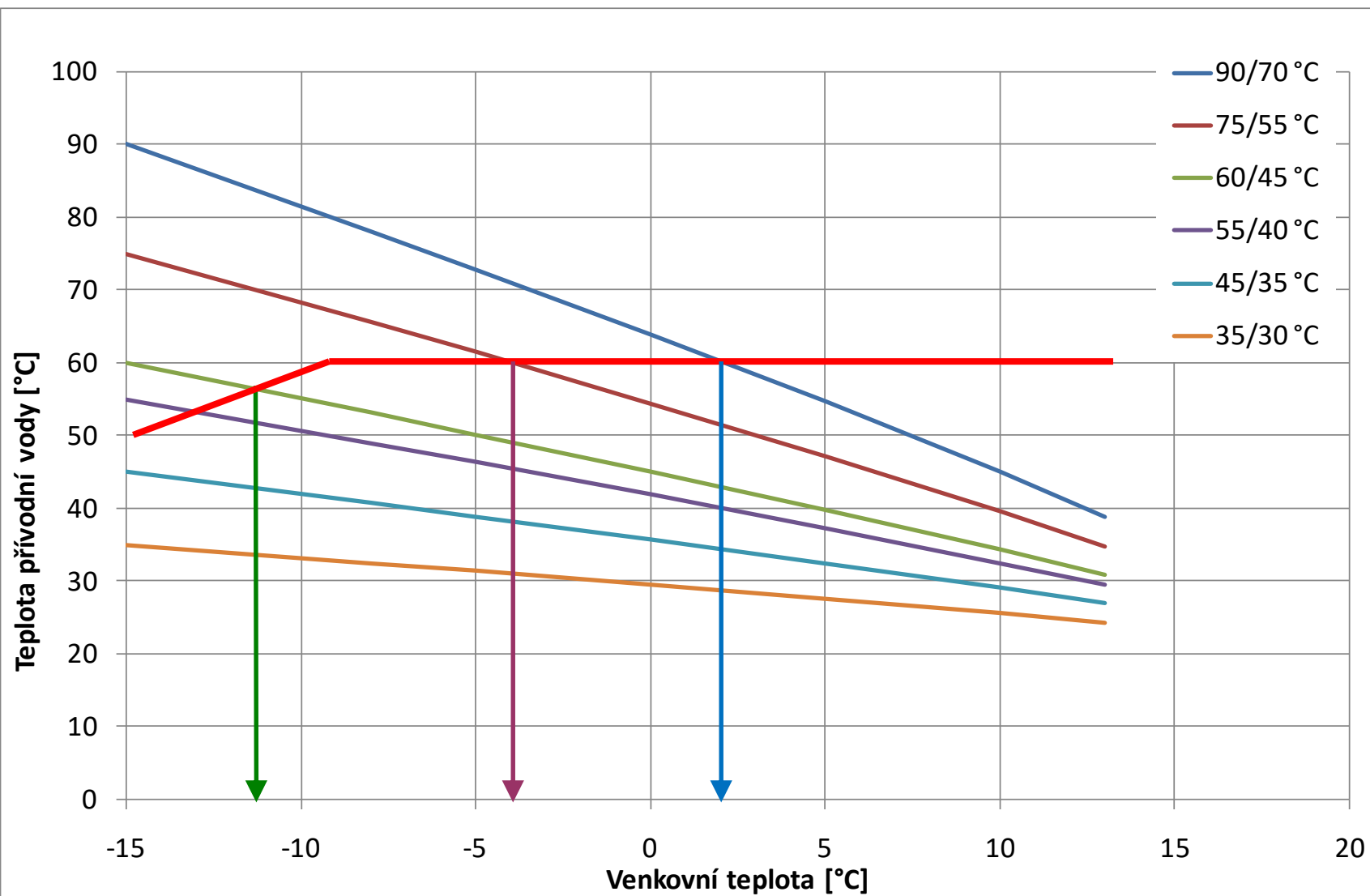
Provozní režimy tepelných čerpadel

- **monoenergetický provoz**
 - např. bivalentní provoz elektricky poháněného TČ s elektrokotlem (často integrovaný do kompaktního zařízení)

- **teploty bivalence**
 - podle výkonu (dimenzování)
 - podle teploty otopné vody
 - výkon TČ je dostatečný
 - otopné plochy navrženy na vysoké teploty, kterých TČ nedosáhne, zvláště v extrémních zimních podmínkách



Bivalence podle teploty





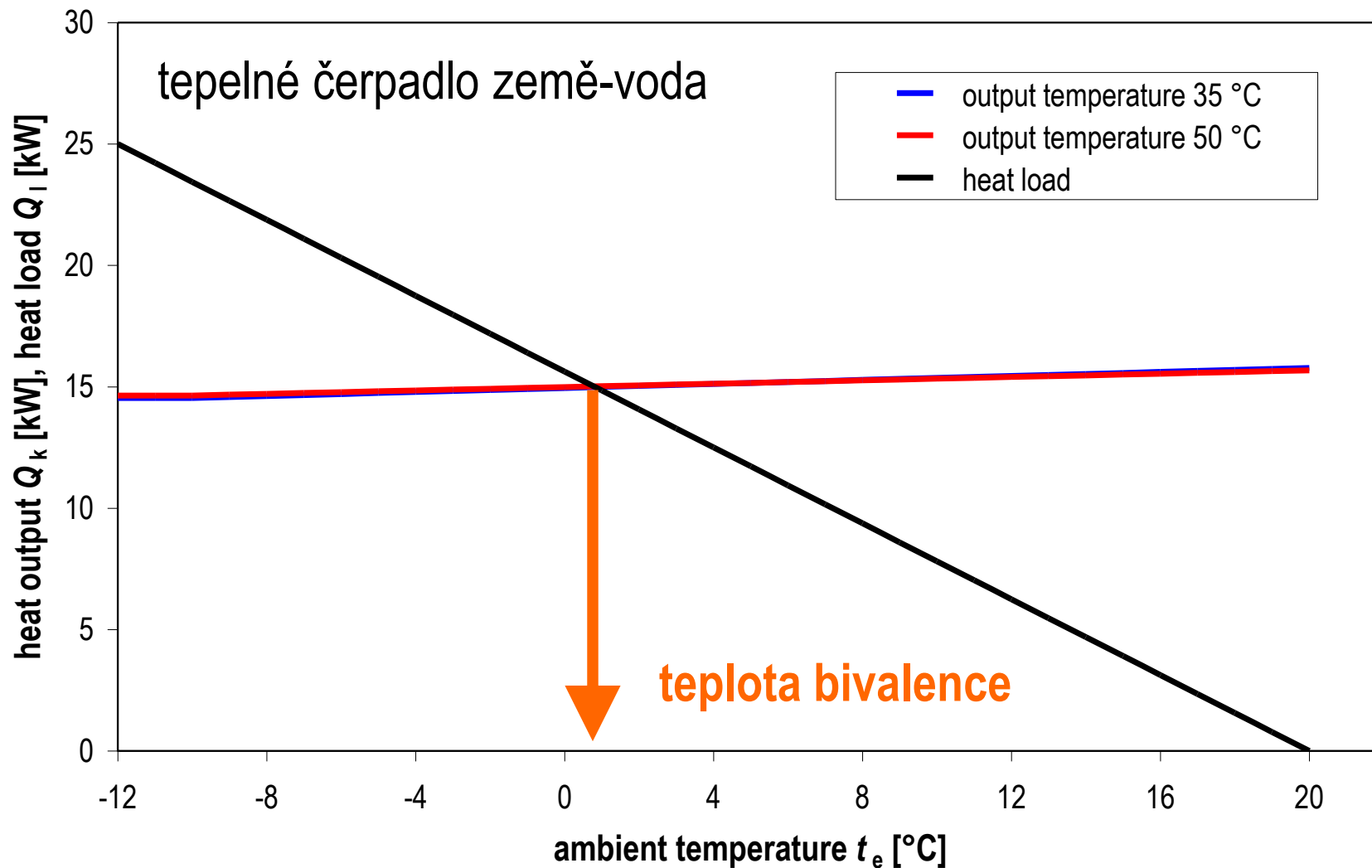
Navrhování tepelných čerpadel

- **návrh typu tepelného čerpadla**
 - dostupný zdroj NPT

- **návrh topného = kondenzačního výkonu Q_k (pro vytápění)**
 - tepelná ztráta objektu
 - výkon pro přípravu teplé vody
 - návrhová teplota otopné vody: teplotní spád
 - návrhová teplota zdroje NPT

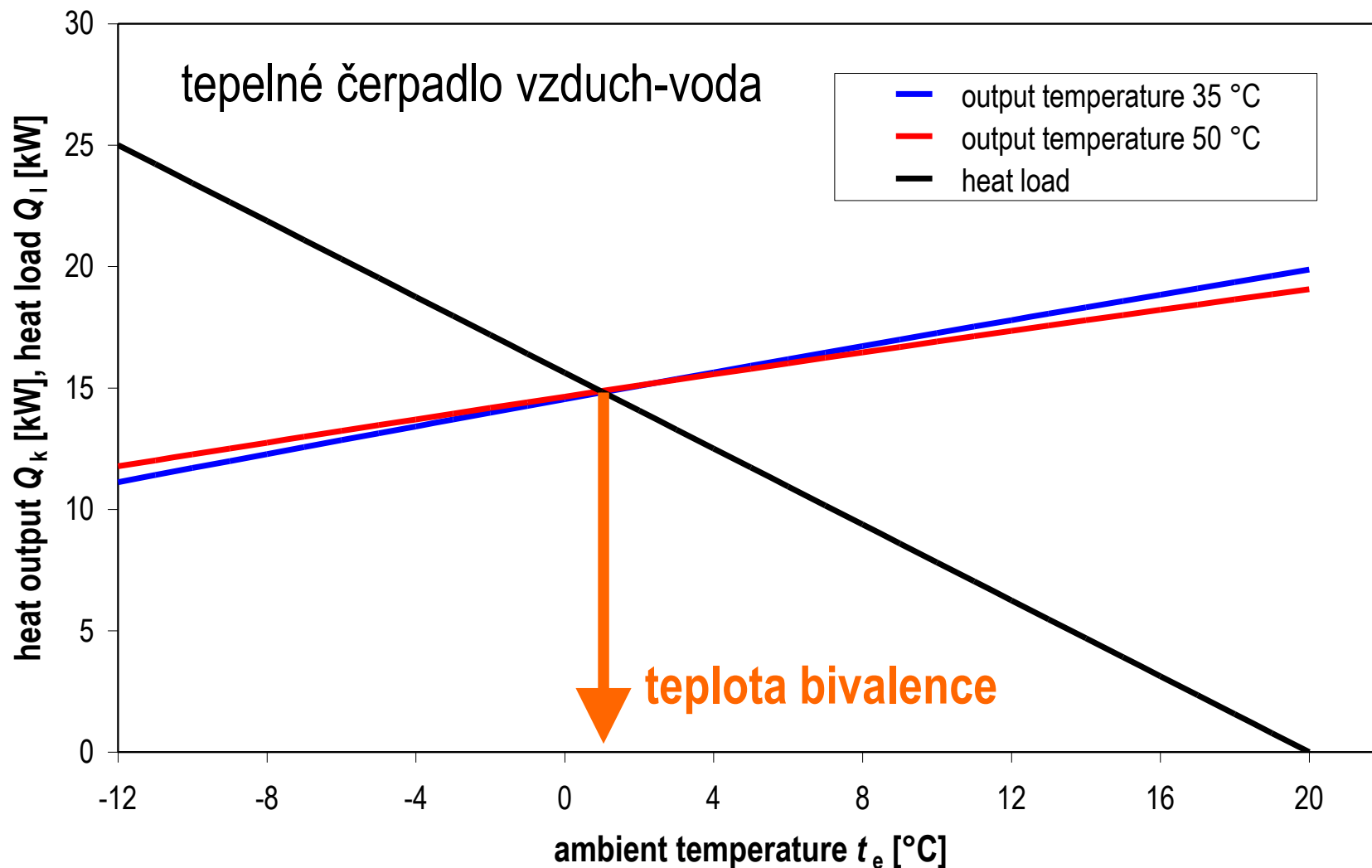


Teplota bivalence podle výkonu





Teplota bivalence podle výkonu





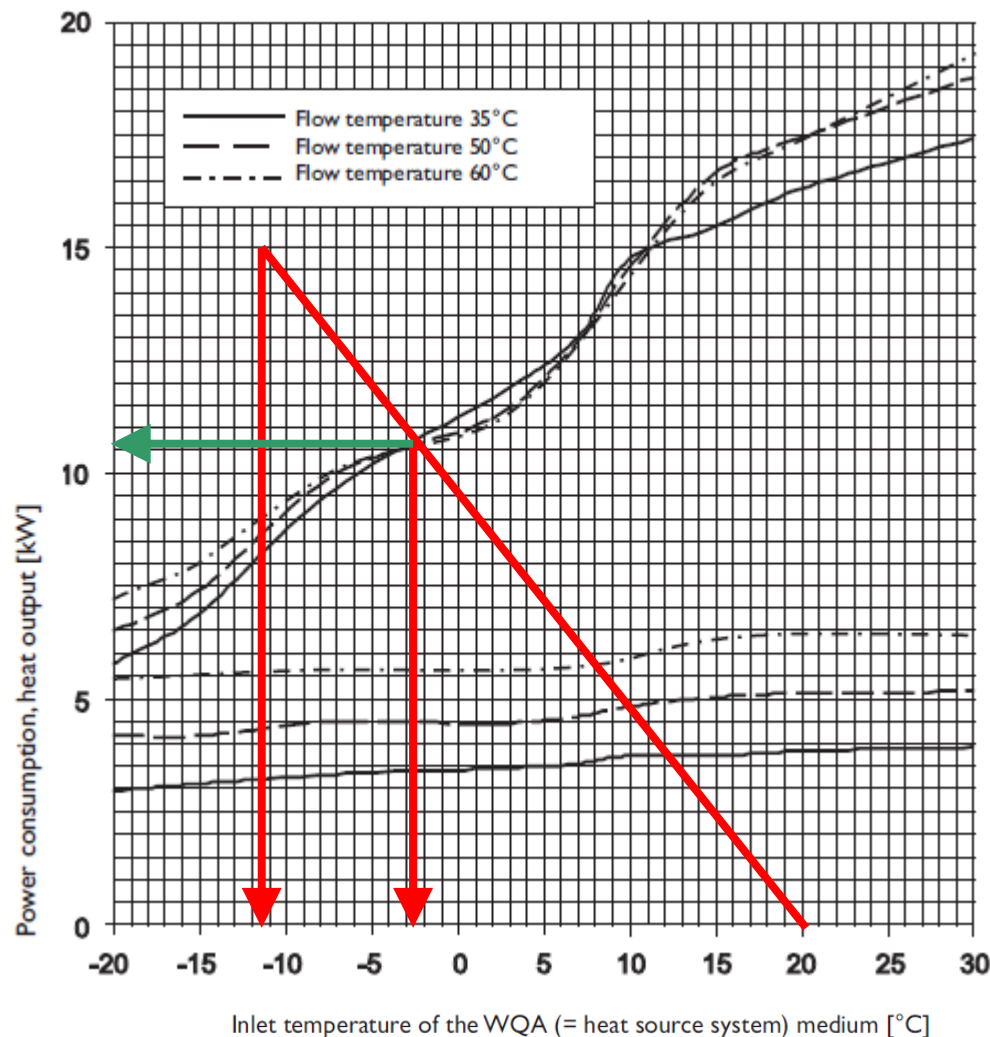
Grafické určení teploty bivalence

rodinný dům

tepelná ztráta 15 kW pro
návrhovou teplotu $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$

tepelné čerpadlo WPL18
otopná soustava 50/40 $^{\circ}\text{C}$

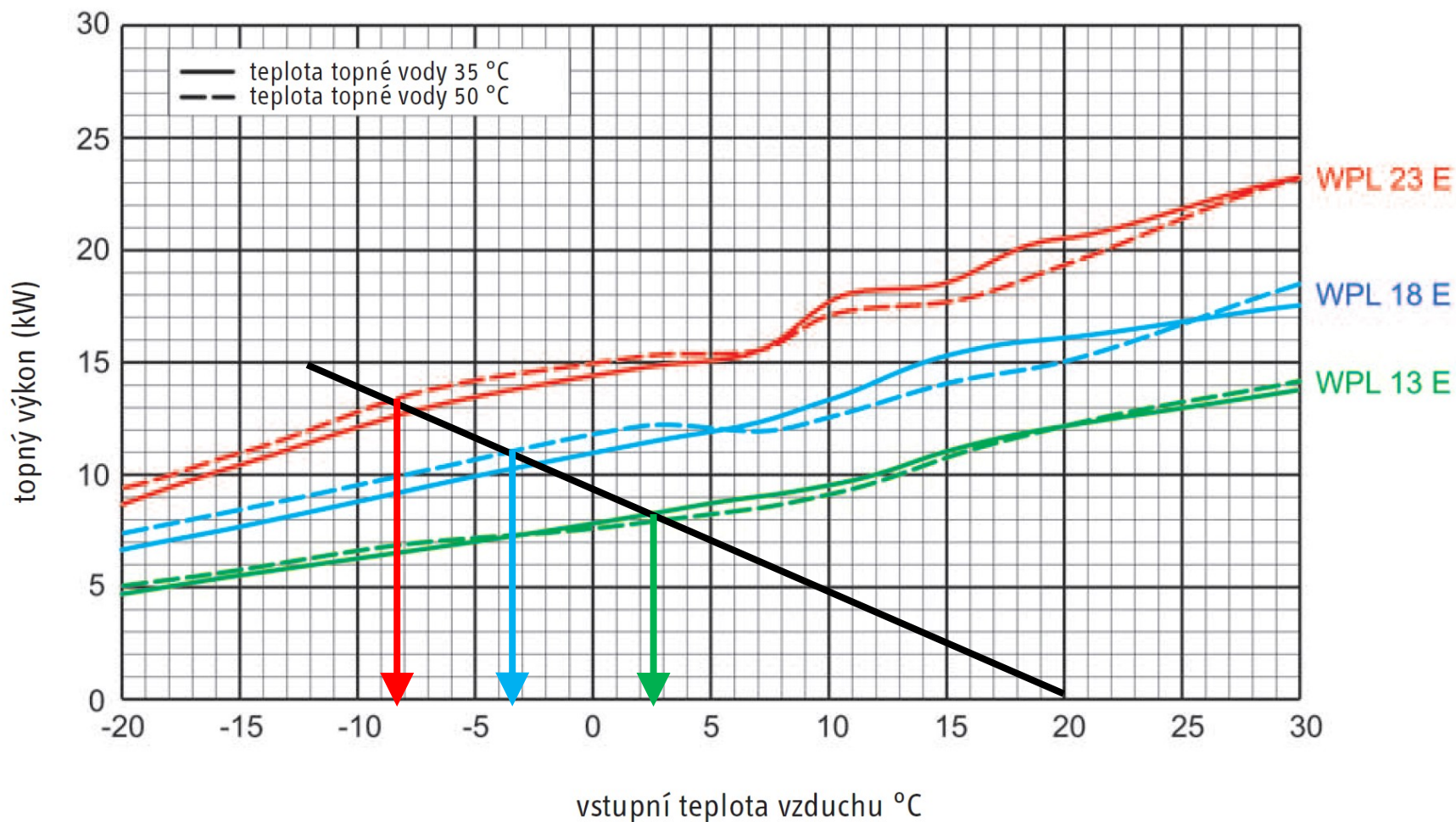
Output diagram for heat pump WPL 18





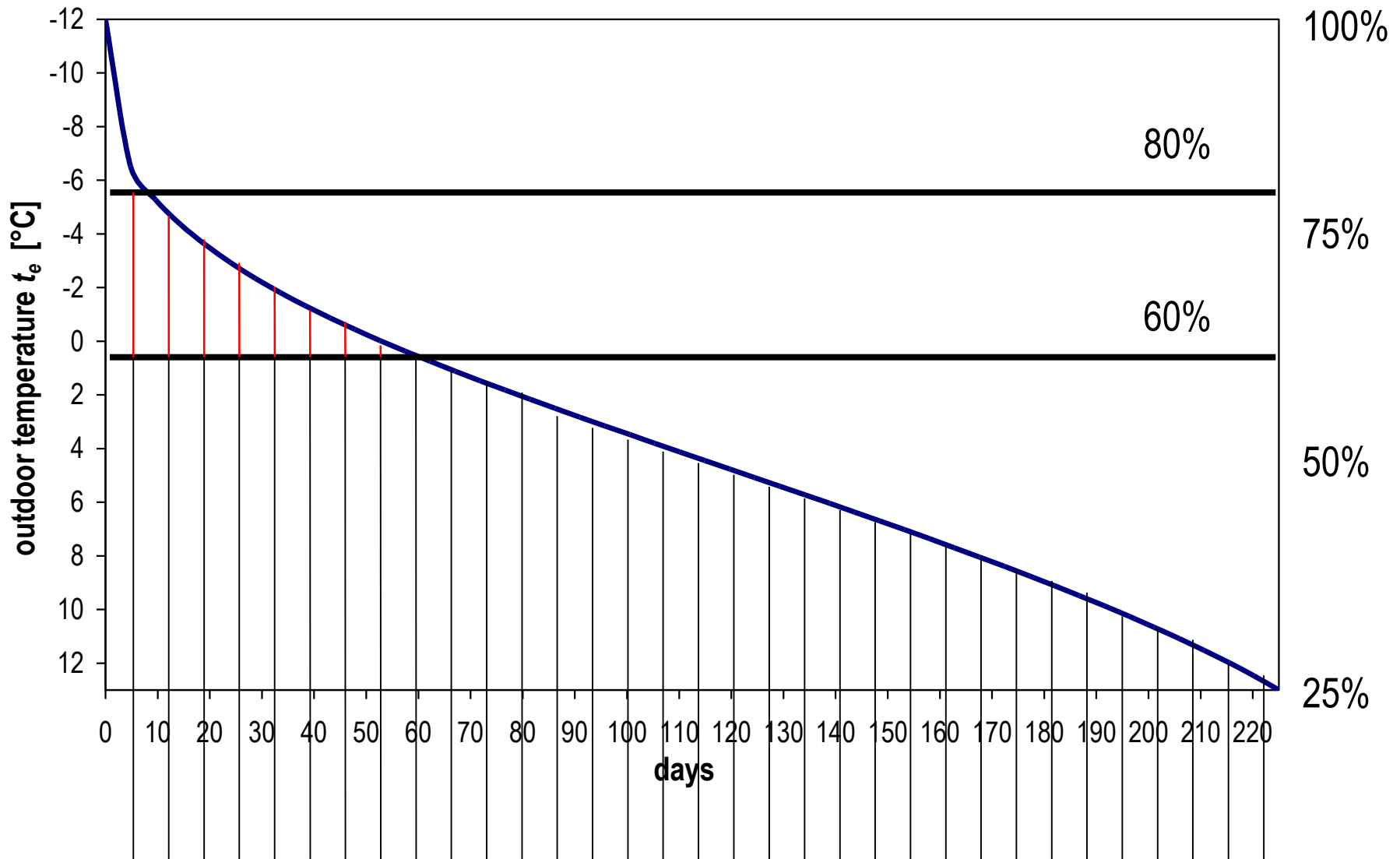
Teplota bivalence podle výkonu

rodinný dům 15 kW při $t_{e,N} -12\text{ °C}$, $t_{i,N} = 20\text{ °C}$



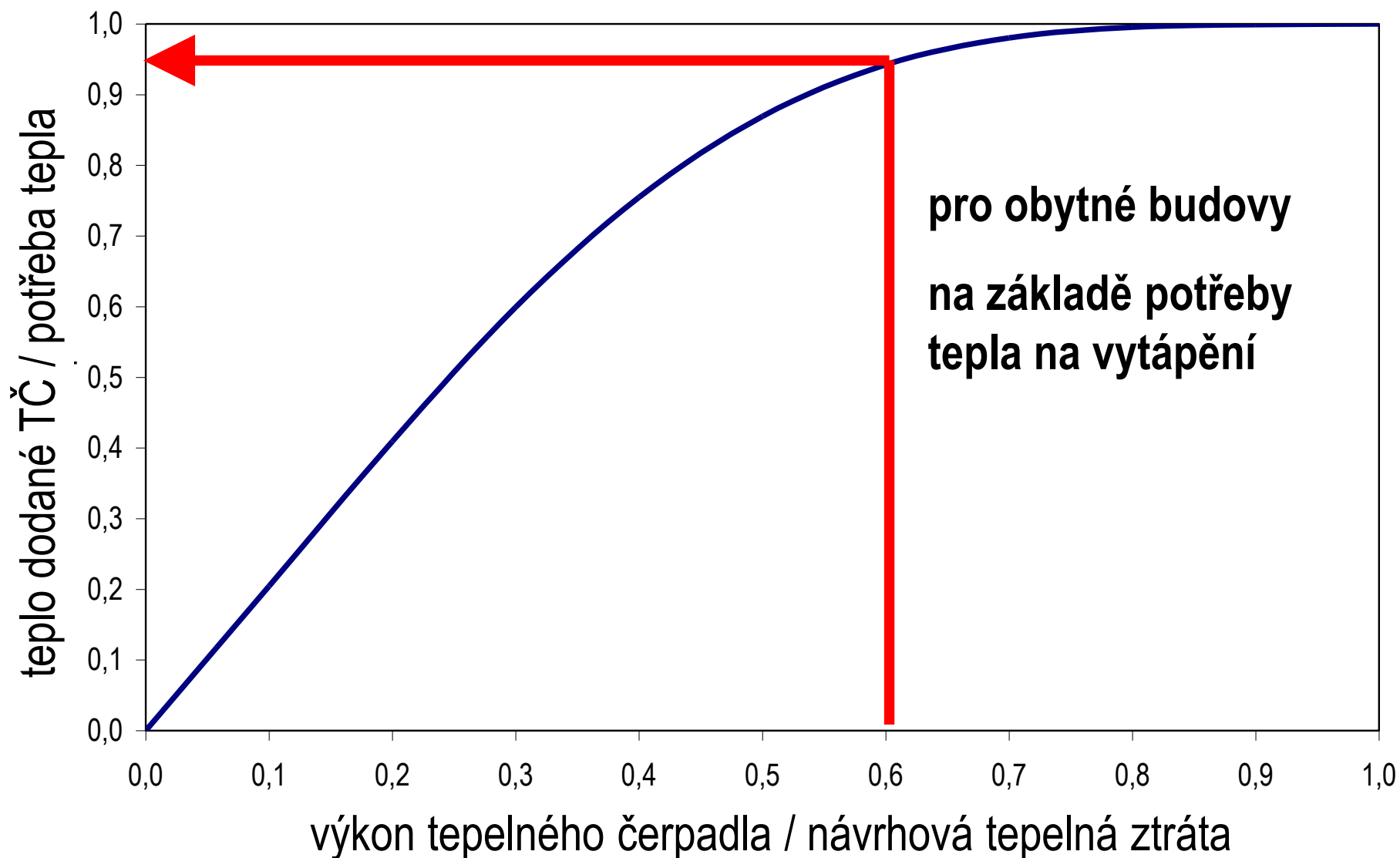


Návrh výkonu – pokrytí potřeby tepla





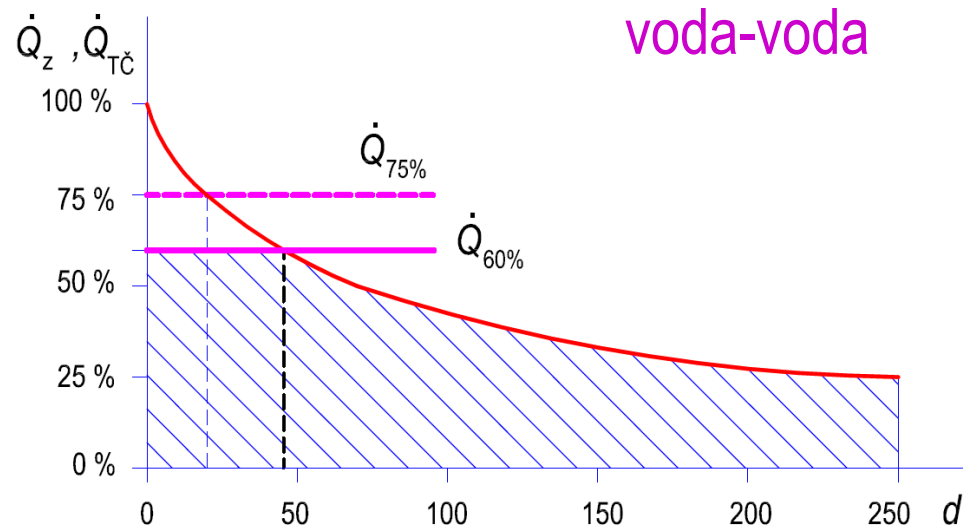
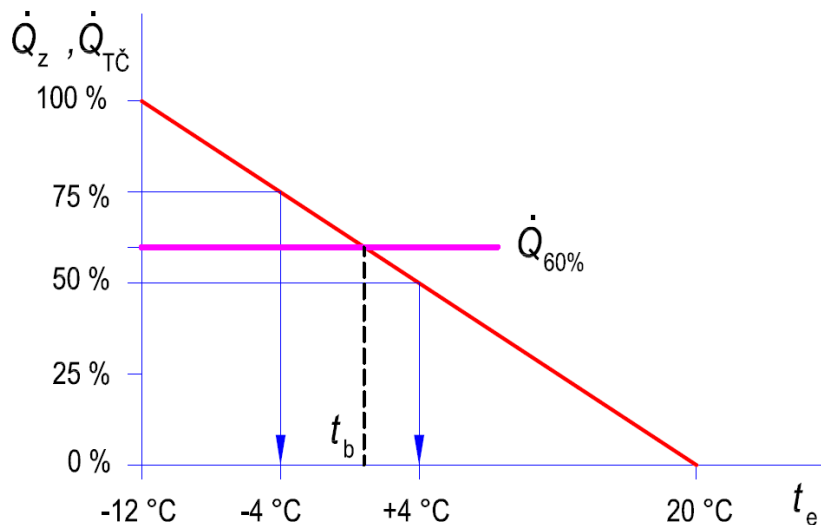
Návrh výkonu – pokrytí potřeby tepla





Navrhování tepelných čerpadel

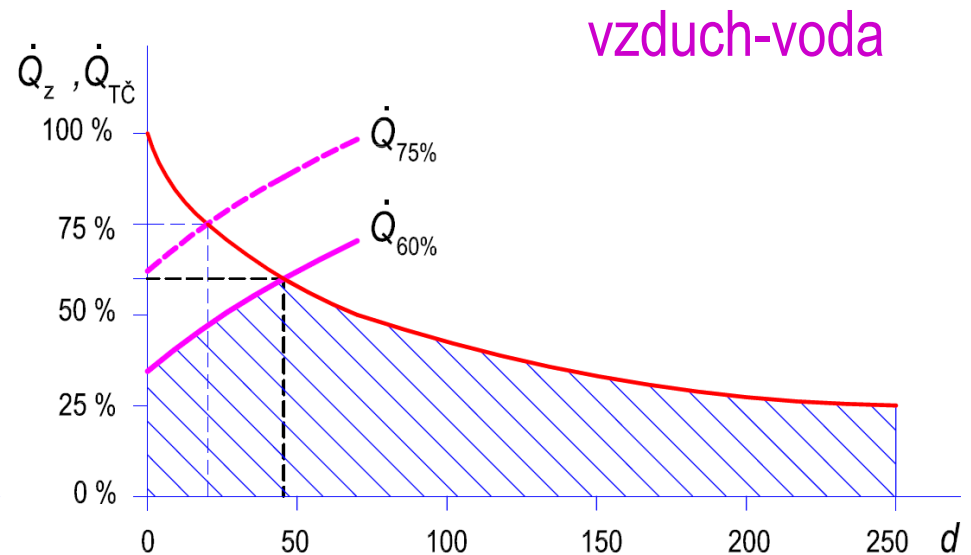
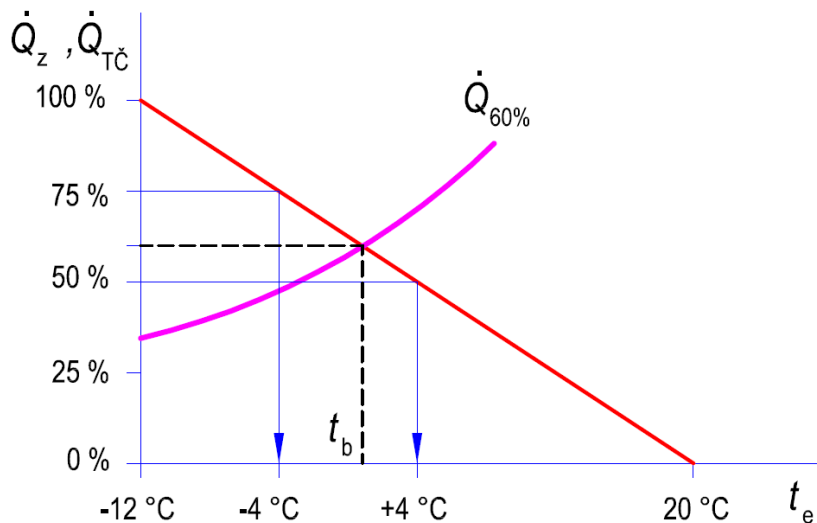
- návrh zdroje tepla (výkon nezávislý na venkovních podmínkách)
 - 50 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 85 % potřeby tepla
 - 60 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 93 % potřeby tepla
 - 70 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 97 % potřeby tepla





Navrhování tepelných čerpadel

- **návrh zdroje tepla (výkon závislý na venkovních podmínkách)**
 - 50 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 75 % potřeby tepla
 - 60 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 85 % potřeby tepla
 - 70 % tepelné ztráty objektu - pokrytí 92 % potřeby tepla





Navrhování tepelných čerpadel

- **monovalentní (100 %) x bivalentní provoz (např. 70 %)**
 - monovalentní provoz země-voda: pro pokrytí potřeby tepla o 3 % vyšší (97 % na 100 %) je nutné:
 - zvýšit výkon TČ na cca 140 %
 - příp. zvýšit ve stejném poměru zdroj NPT na 140 % (hloubka vrtů)
 - monovalentní provoz vzduch-voda
 - vysoké výkony v letním období, výměník v zásobníku TV nepředá výkon

monovalentní řešení je ekonomicky méně efektivní

zvýšení investice není vyváženo malým navýšením úspory energie



Regulace výkonu

- **běžná tepelná čerpadla**

- start-stop režim
- cyklování = snížení životnosti kompresoru
- zamezení cyklování
 - poddimenzování
 - akumulace tepla – návrh akumulátoru pro minimální dobu chodu tepelného čerpadla

- **tepelná čerpadla s regulací výkonu**

- **inverter** - frekvenční měnič
- digital scroll
- vliv na úsporu: **řádově procenta (!)**



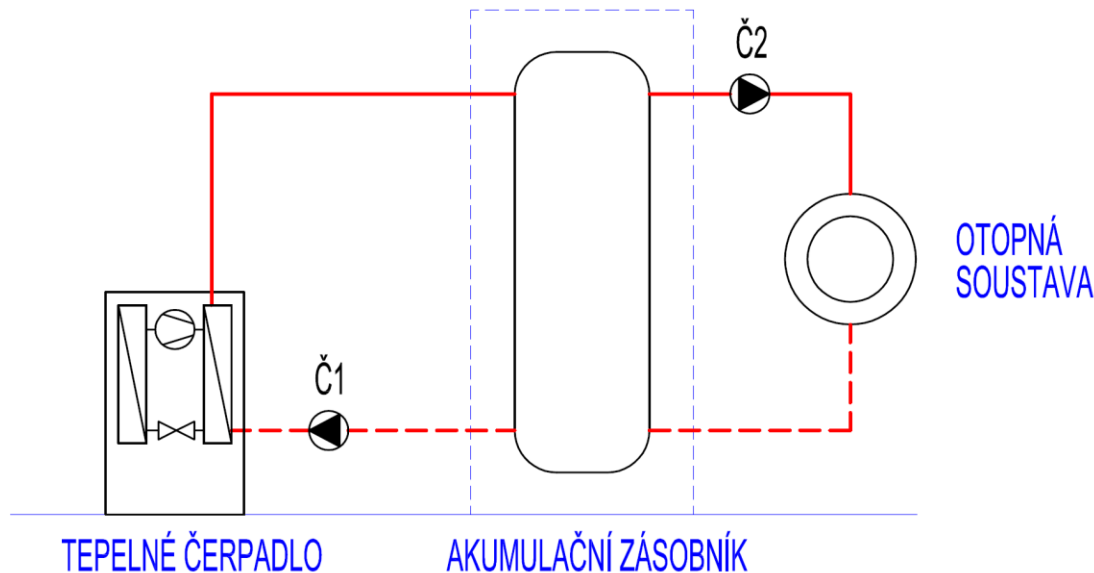
Akumulace tepla pro TČ

- **předimenzovaný zdroj** po většinu otopného období
 - vyrovnaní souladu mezi výkonem TČ a potřebou vytápění
- **snížení četnosti spínání kompresoru** (1 x 10 min)
 - prodloužení životnosti kompresoru
- **překlenutí doby blokace chodu** (22 + 2 hod/den)
- **zdroj tepla pro venkovní jednotky** (vzduch-voda)
 - ochrana proti zamrznutí



Akumulace tepla pro TČ

- **hydraulické oddělení okruhu zdroje tepla od okruhu spotřeby**
 - hydraulický zkrat
 - otopná soustava neovlivňuje okruh TČ
 - zajištění požadovaných průtoků na kondenzátoru TČ





Návrh objemu akumulátoru

- **balance** pro omezení četnosti spínání
 - minimální doba chodu tepelného čerpadla $\Delta \tau$
 - během chodu TČ do akumulátoru se teplota zvýší o Δt
- akumulované teplo během chodu TČ

$$Q_{aku} = \Phi_{TČ} \cdot \Delta \tau = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t$$



Návrh objemu akumulátoru

dimenzování objemu

$$\frac{V}{\Phi_{TČ}} = \frac{1000 \cdot \Delta \tau}{\rho \cdot c \cdot \Delta t}$$

$\Delta \tau$ [s] minimální doba chodu: 10 min

Δt [K] ohřev zásobníku: 3 až 5 K nad požadovanou
teplotu otopné vody

běžné velikosti **15 až 30 l/kW**

čím setrvačnější otopná soustava, tím menší požadavek na objem



Efektivita provozu TČ

- jmenovitý topný faktor
- roční topný faktor tepelného čerpadla
- sezónní topný faktor a štítkování tepelných čerpadel
- sezónní topný faktor pro konkrétní instalaci



Topný faktor

- **topný faktor zařízení COP**
 - pro konkrétní zařízení (jednotku)
 - jako výsledek testu: hodnota COP pro konkrétní kombinaci teplotních podmínek t_{v1} / t_{k2}
- **roční provozní topný faktor zařízení COP_{rok}**
 - zohledňuje vliv proměnlivých provozních podmínek během roku
 - definován pouze pro zařízení = tepelné čerpadlo
 - provozní hodnota za celé období



Topný faktor

- **sezónní (standardní) topný faktor *SCOP***
 - pro konkrétní zařízení, včetně záložního zdroje, včetně pomocných čerpadel = bilancování celého systému
 - zohledňuje vliv proměnlivých provozních podmínek během roku, ale unifikovaných = standardizovaných, **nesouvisejících s konkrétní instalací**
 - srovnávání tepelných čerpadel za konkrétních podmínek (štítky)
- **sezónní topný faktor *SPF* (seasonal performance factor)**
 - bilancování reálného provozu systému s tepelným čerpadlem v reálné instalaci
 - výpočet: intervalová metoda, simulační nástroje
 - měření: nasazení provozního monitoringu



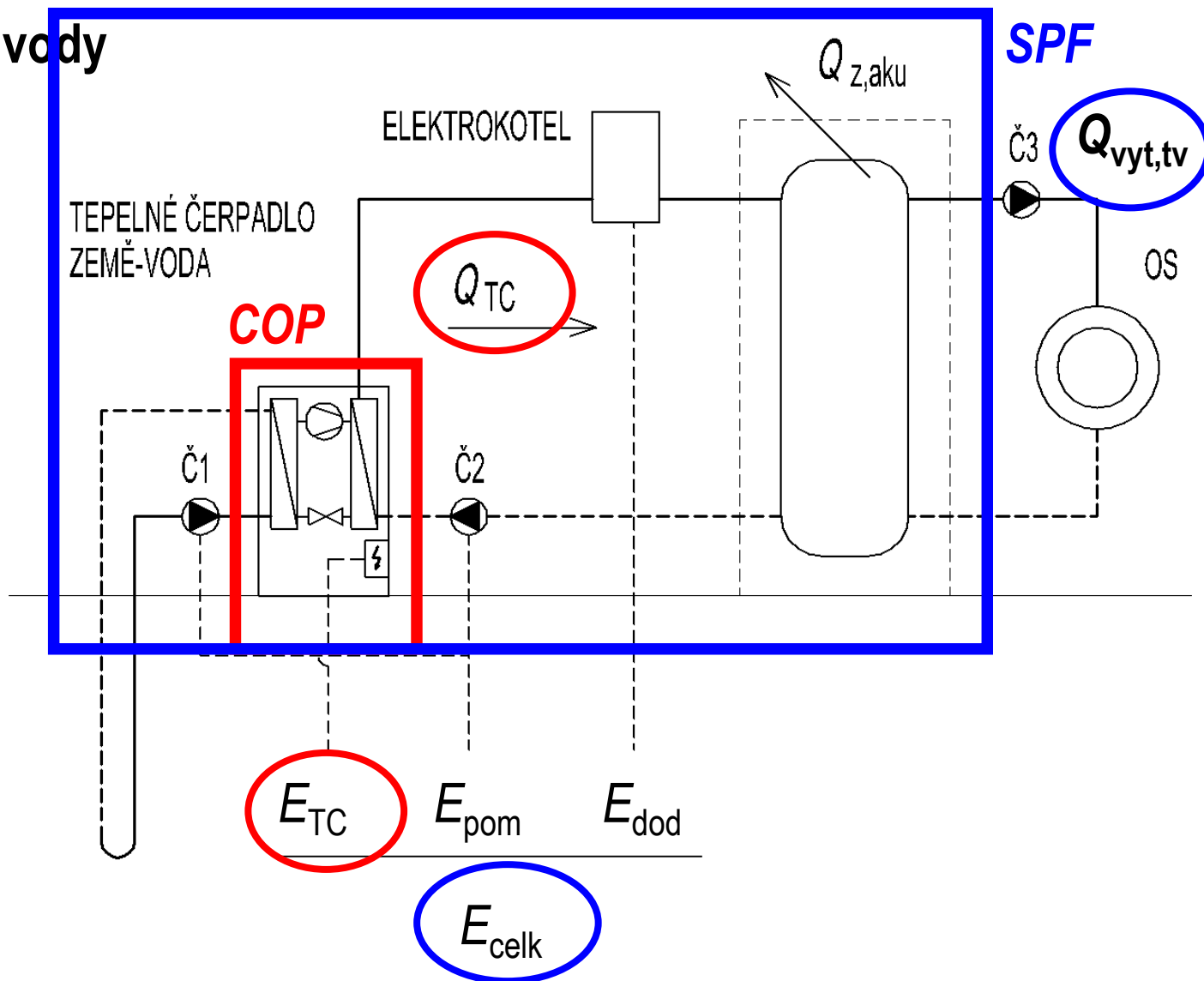
Sezónní topný faktor

příprava teplé vody

vytápění

$$COP = \frac{Q_{TČ}}{E_{TČ}}$$

$$SPF = \frac{Q_{vyt, tv}}{E_{celk}}$$





Jmenovitý topný faktor

- **protokol ze zkušební laboratoře**
 - zkouška v souladu ČSN EN 14511
 - jednotlivé body pro kombinaci podmínek výparník / kondenzátor
 - nejčastěji se uvádí COP pro jmenovité podmínky

- **požadavky NZÚ na efektivitu tepelných čerpadel**

- minimální COP
- vzduch-voda A2/W35 **COP > 3.1**
- země-voda B0/W35 **COP > 4.3**
- voda-voda W10/W35 **COP > 5.1**



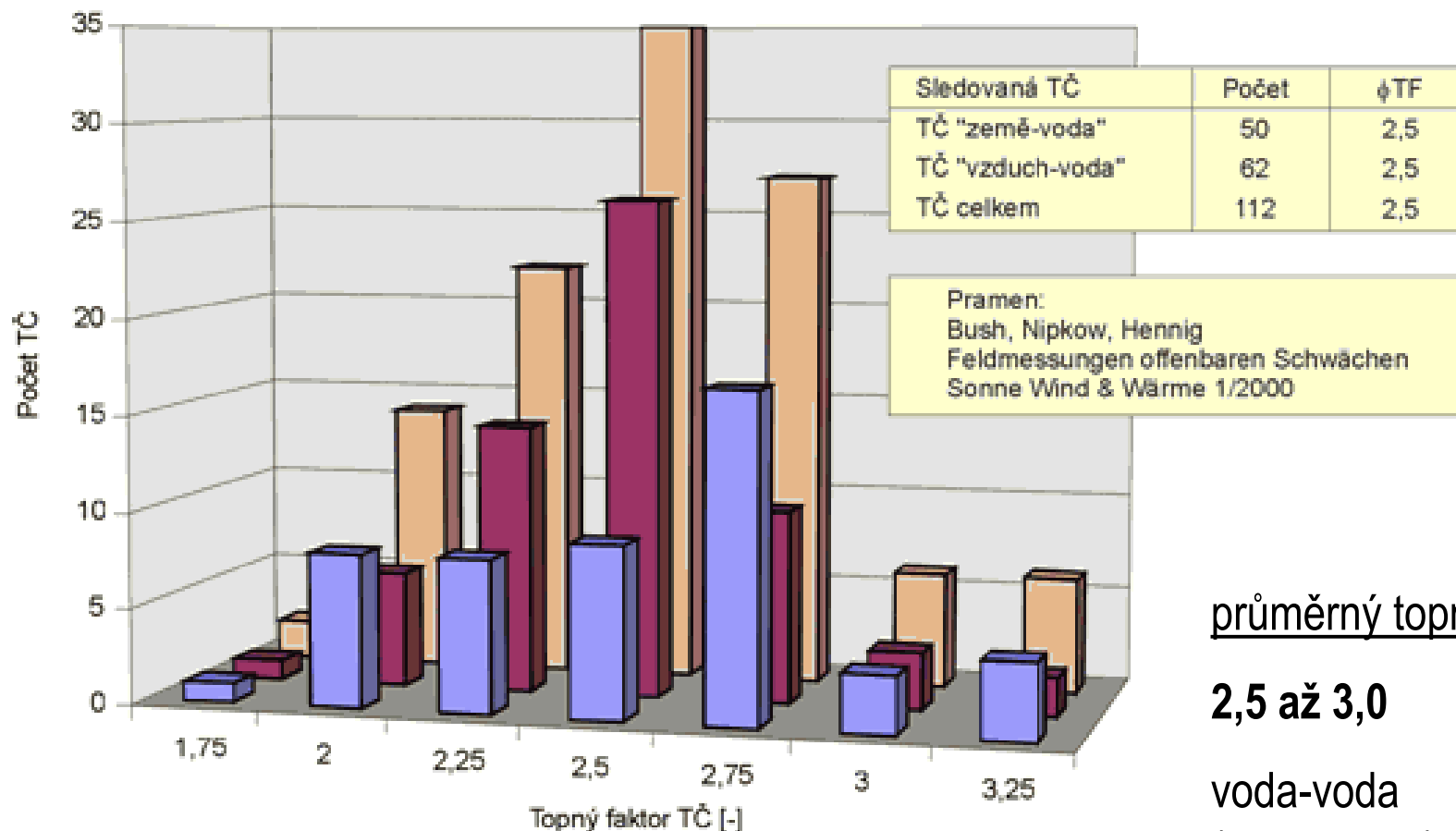


Reálný (průměrný) topný faktor

- údaj výrobce pro výrobek x reálný roční topný faktor systému
- topný faktor se mění v závislosti na podmínkách
 - proměnlivá teplota NZT (vzduch, povrchová voda)
 - přibližně konstantní teplota NZT (studniční voda, země)
 - proměnlivá teplota otopné vody (ekvitermní regulace)
 - příkon čerpadel pro dopravu teplonosných látek
 - příprava teplé vody – **ohřev na 55 °C**, významně sníží celoroční topný faktor, zvláště u objektů s nízkoteplotním vytápěním (NED)
 - bivalentní zdroj tepla (elektrická vložka), ztráty akumulátoru



Reálný (průměrný) topný faktor



	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25
■ TČ "země-voda"	1	8	8	9	17	3	4
■ TČ "vzduch-voda"	1	6	14	26	10	3	2
■ Všechna sledovaná TČ	2	14	22	35	27	6	6

průměrný topný faktor:

2,5 až 3,0

voda-voda
(neuvedena)

až **3,5** (minimum
instalací)



Optimální topný faktor

- úspora energie není přímo úměrná topnému faktoru !

$$Q_u = Q_{TC} - E_{TC} = Q_{TC} - \frac{Q_{TC}}{COP_{rok}} = Q_{TC} \left(1 - \frac{1}{COP_{rok}} \right)$$

- úspora energie narůstá pomalu (hyperbola)
- 2násobný topný faktor $\neq$ 2násobná úspora = **1,25**násobná úspora
- zvyšování topného faktoru nad 3,0 nemá velký přínos **v úspoře**
 - nezáleží zda země-voda nebo vzduch-voda
- čím horší výchozí topný faktor, tím větší dopad má jeho zvýšení
 - analogie se zateplením domu
 - zásadní pro úsporu je **spolehlivé tepelné čerpadlo**



Minimální topný faktor TČ

- **minimální sezónní topný faktor COP_{rok} tepelného čerpadla pro nahrazení primárního paliva**
- **tepelné (spalovací) zařízení:** přeměna primárního paliva s účinností η_k
(např. plynový kotel)

$$Q_{p1} = \frac{Q_d}{\eta_k}$$

- **tepelné čerpadlo:** přeměna primárního paliva na elektrickou energii s účinností η_e – přeměna elektrické energie (mechanická práce) na teplo z tepelného čerpadla (využití **obnovitelné** části z prostředí) s topným faktorem **COP**

$$Q_{p2} = \frac{E_{TC}}{\eta_e} = \frac{Q_d}{COP_{rok}} \cdot \frac{1}{\eta_e}$$



Minimální topný faktor TČ

- minimální topný faktor tepelného čerpadla pro nahrazení primárního paliva (včetně ztrát akumulace)

$$Q_{p2} < Q_{p1}$$

$$COP_{rok} > \frac{\eta_k}{\eta_e}$$

- **plynový kotel** $\eta_k = 0.76$ (**provozní účinnost dle TNI 73 0331**), účinnost elektrárny (0.35) + ztráty v rozvodech $\eta_e = 0.30$

minimální sezónní topný faktor **$COP_{rok} > 2,5$**

- **plynový kondenzační kotel** $\eta_k = 0.90$, účinnost produkce el. energie $\eta_e = 0.30$

minimální sezónní topný faktor **$COP_{rok} > 3.0$**

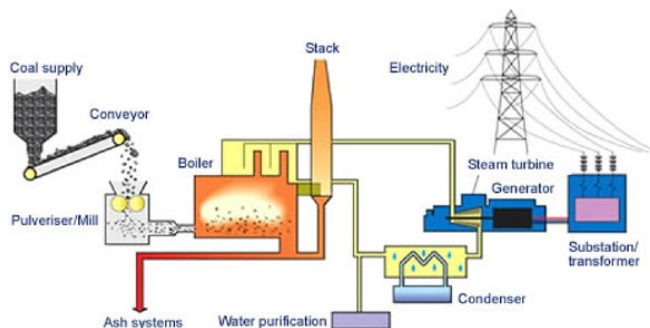


Minimální topný faktor TČ

primární palivo
100%



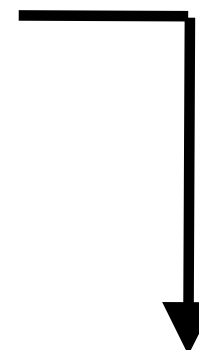
elektrárna, $\eta_e = 35\%$



vyrobená elektřina
35 %

ztráty
-5 %

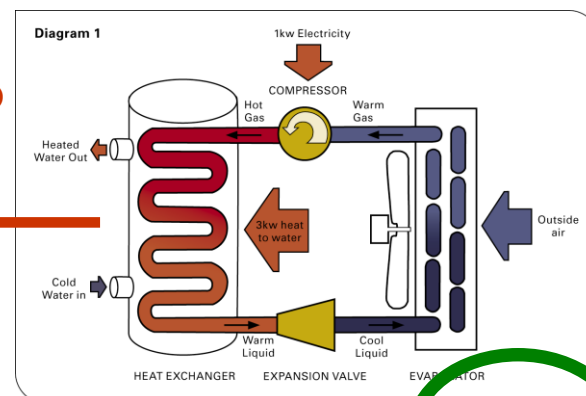
dodaná elektřina
30 %



dodané teplo
90 %



dodané teplo
90 %



tepelné čerpadlo, $COP_{pk} = 3.0$

plynový kotel, $\eta = 90\%$



Roční topný faktor tepelného čerpadla?

- **zjednodušeně podle TNI 73 0331**
- definuje průměrné účinnosti zdrojů a technických systémů pro hodnocení energetické náročnosti budov podle vyhlášky 78/2013 Sb.
- **pomocný dokument, nezávazný**
- stanovení ročního provozního $SCOP$ z hodnoty jmenovité při

A2/W35

B0/W35

W10/W35

- pro vytápění $COP_{H,rok} = f_{H,COP} * COP_N$
- pro přípravu teplé vody $COP_{W,rok} = f_{W,COP} * COP_N$
- na základě **skutečné předpokládané teplotní úrovně**



Činitele pro stanovení ročního *COP*

Návrhová výstupní teplota otopné vody [°C]	Vzduch-voda	Země-voda	Voda-voda
	$f_{H,COP} (-)$		
35	1,02	1,07	1,00
45	0,93	0,94	0,89
55	0,83	0,81	0,76

Požadovaná teplota teplé vody [°C]	Vzduch-voda	Země-voda	Voda-voda
	$f_{W,COP} (-)$		
40	0,94	0,86	0,80
50	0,77	0,66	0,61
60	0,60	0,45	0,42



Standardní sezónní topný faktor **SCOP**

- **podrobný výpočet v souladu s ČSN EN 14 825**
- **sezónní topný faktor** (samotného) tepelného čerpadla **SCOP**
- výpočet pro sezónu na základě podrobných údajů ze zkoušky EN 14511 pro dostatečný počet kombinací t_{v1} / t_{k2}
- pro standardní klimatické podmínky (četnost venkovních teplot)
- pro standardní odběr tepla ve standardní otopné soustavě (na základě definované tepelné ztráty)
- podklad pro **štitkování** tepelných čerpadel podle směrnice o Ecodesignu



Sezónní účinnost zdrojů tepla

- pro zdroje tepla na vytápění
- sezónní energetická účinnost zdroje pro vytápění η_s
- kotle, tepelná čerpadla – srovnání z pohledu primární energie
- pro tepelná čerpadla je sezónní energetická účinnost definována jako

$$\eta_s = \frac{SCOP}{PEF}$$

PEF faktor primární energie
pro elektřinu $PEF = 2.5$

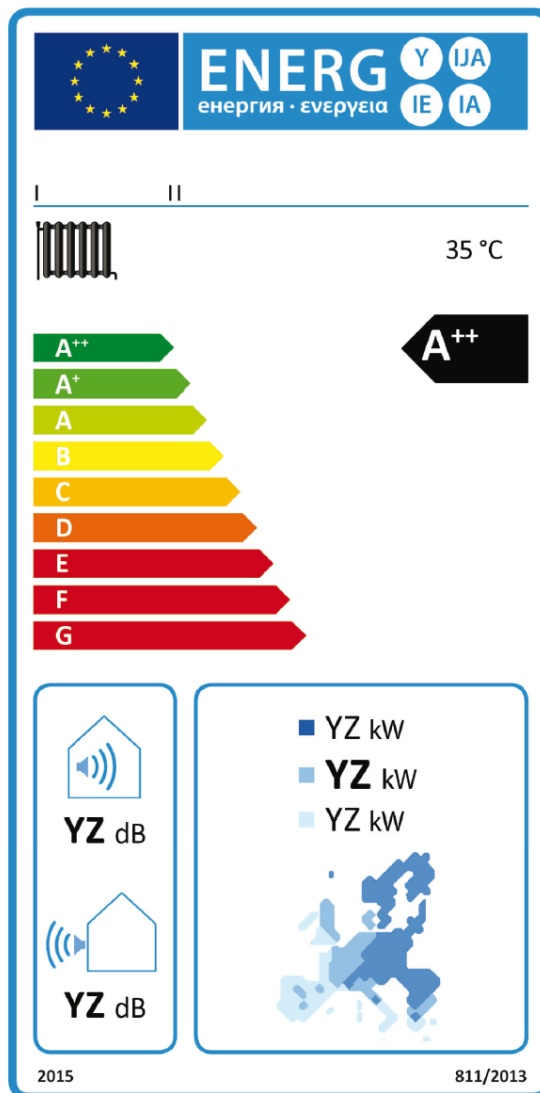
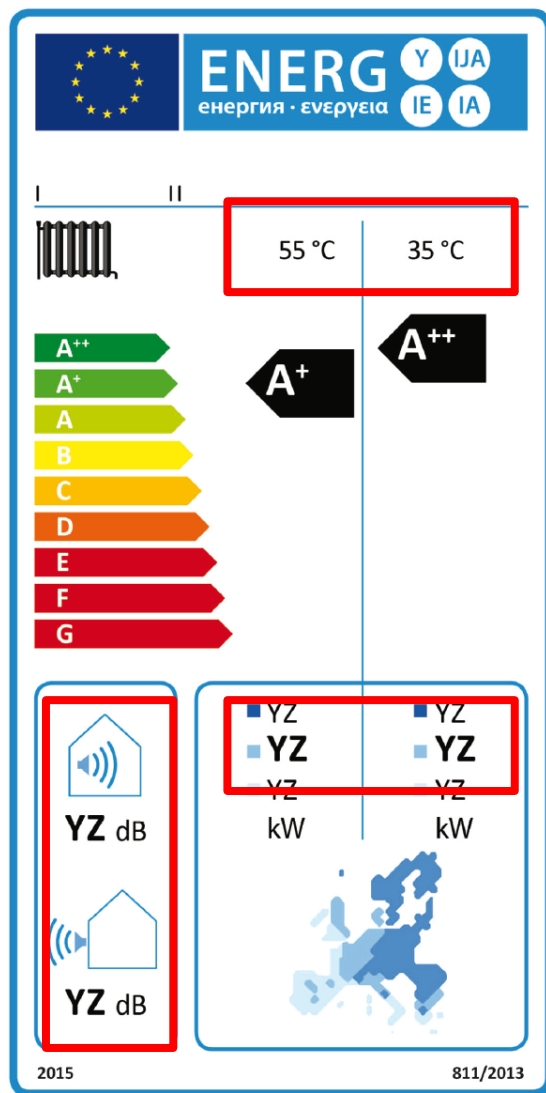


Požadavek na účinnost (EC 813/2013)

- **minimální sezónní energetická účinnost zdroje pro vytápění η_s**
- **od 26.9.2015**
 - $\eta_s \geq 100 \%$ (vysokoteplotní soustavy nad 35 °C)
 - $\eta_s \geq 115 \%$ (nizkoteplotní soustavy do 35 °C)
- **od 26.9.2017**
 - $\eta_s \geq 110 \%$ (vysokoteplotní soustavy nad 35 °C)
 - $\eta_s \geq 125 \%$ (nizkoteplotní soustavy do 35 °C)

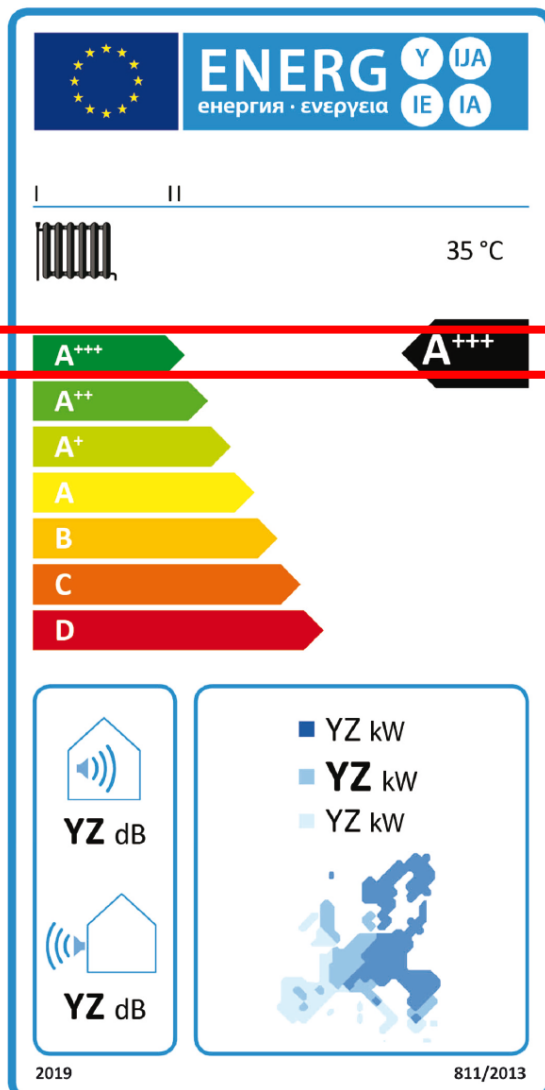
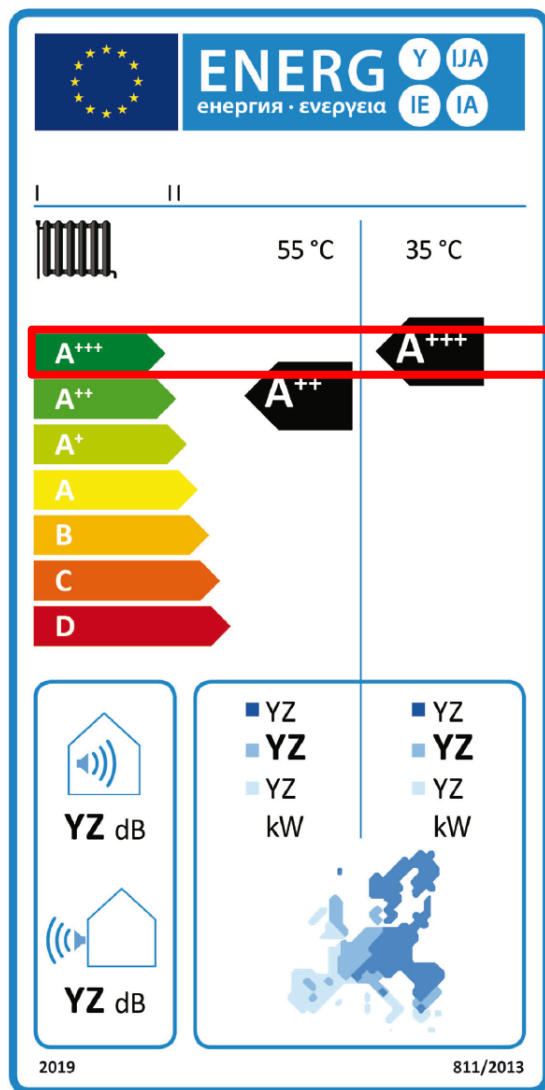


Štítky pro TČ od 26. 9. 2015





Štítky pro TČ od 26. 9. 2019





Význam SCOP

- **SCOP** a účinnost η_s je vztažena pouze k tepelnému čerpadlu
- za standardních podmínek (klíma, odběr, otopná soustava)
- slouží pro porovnání tepelných čerpadel v režimu celoročního provozu
- umožňuje vybrat tepelné čerpadlo přímo podle návrhového výkonu

- tepelné čerpadlo instalované v konkrétním místě (**klíma**) do konkrétní budovy (**odběr tepla**) s konkrétní otopnou soustavou (**teplotní úroveň odběru**) a konkrétním provedeným nízkopotenciálním zdrojem tepla (**teplotní úroveň zdroje**)

bude vykazovat jiný SCOP



Bilancování provozu tepelných čerpadel

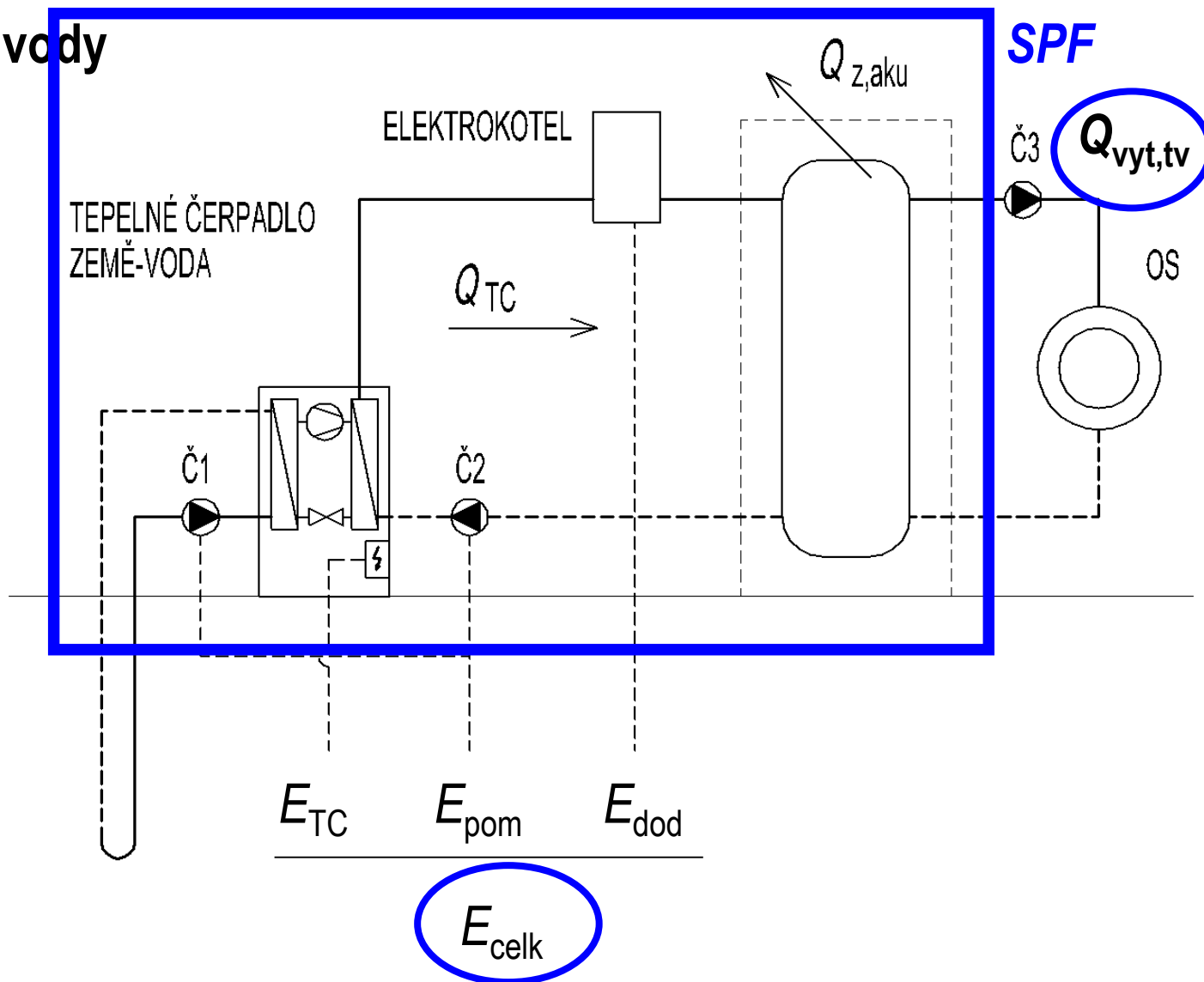
- sezónní topný faktor *SPF* soustavy s TČ
- bilancování – intervalová metoda
- vliv provozních podmínek v dané instalaci



Sezónní topný faktor **systemu**

příprava teplé vody

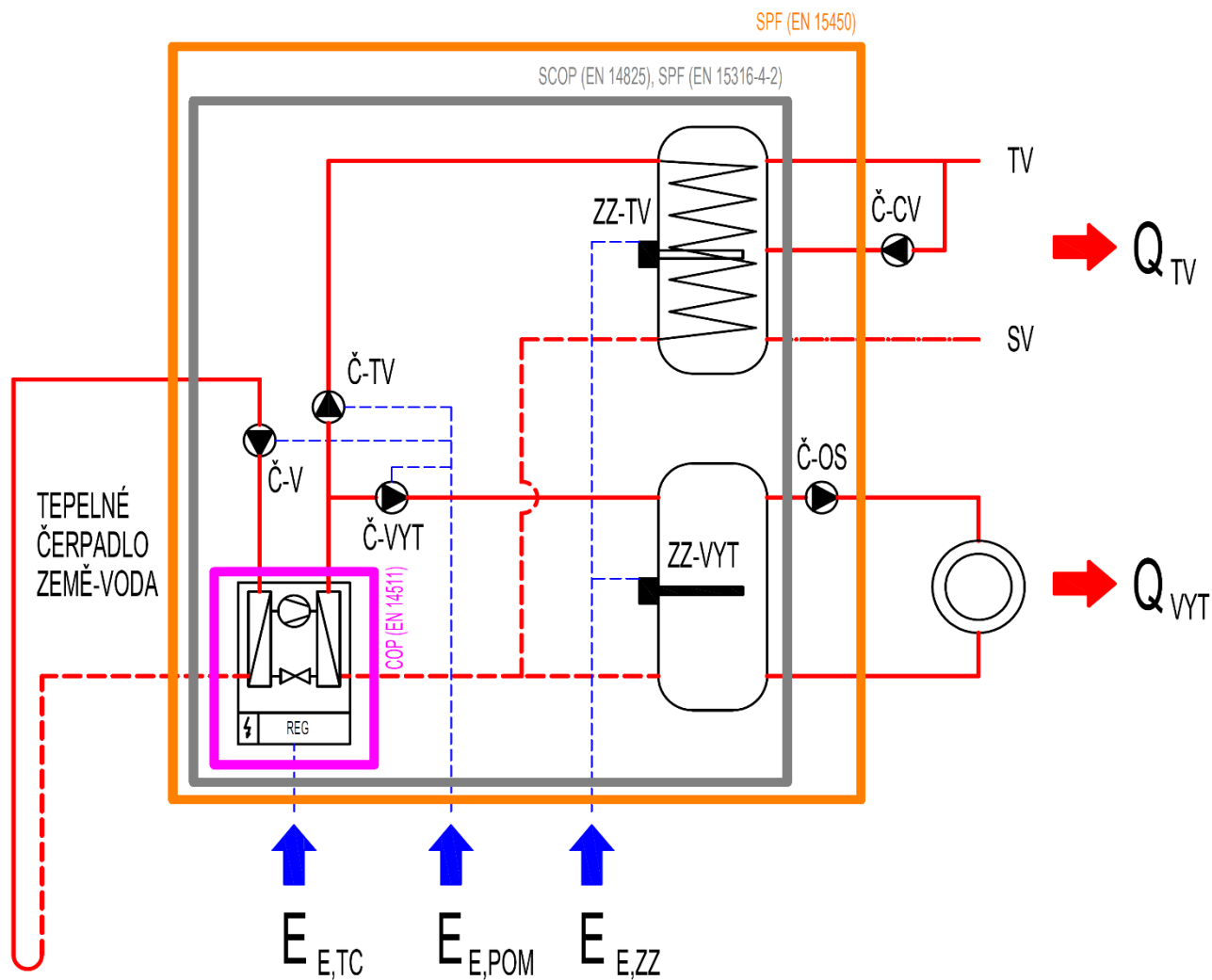
vytápění



$$SPF = \frac{Q_{vyt,tv}}{E_{celk}}$$



Sezónní topný faktor *SPF*





Požadavek na *SPF*

- EU směrnice 2009/28/EC o podpoře využití energie z obnovitelných zdrojů
 - soustavu s tepelným čerpadlem lze považovat za OZE pokud

$$SPF > 1,15 \frac{1}{\eta_e}$$

- | | | | |
|----------------------|--------------------|----------------------------------|---------------|
| ■ průměr EU | $\eta_e = 40 \%$ | $SPF > 2,875$ | (2009/28/EC) |
| ■ nařízení EU | $\eta_e = 45.5 \%$ | $SPF > 2,5$ | (2013/114/EC) |



využití pro účely statistik: **$SPF = SCOP$**



ČSN EN 15450 – příloha C (informativní)

Tabulka C.1 – Normové minimální a cílové hodnoty *SPF* pro soustavy s tepelnými čerpadly využitými pro vytápění a přípravu teplé vody v renovacích (typické pro střední Evropu)

Zdroj energie/odvod	Minimální hodnoty <i>SPF</i>	Cílové hodnoty <i>SPF</i>
vzduch/voda	2,7	3,0
zemský masiv/voda	3,5	4,0
voda/voda	3,8	4,5

Tabulka C.2 – Normové minimální a cílové hodnoty *SPF* pro soustavy s tepelnými čerpadly využitými pro vytápění a přípravu teplé vody v novostavbách (typické pro střední Evropu)

Zdroj energie/odvod	Minimální hodnoty <i>SPF</i>	Cílové hodnoty <i>SPF</i>
vzduch/voda	2,5	2,8
zemský masiv/voda	3,3	3,7
voda/voda	3,5	4,2

Tabulka C.3 – Normové minimální a cílové hodnoty *SPF* pro soustavy s tepelnými čerpadly využitými pro samotnou přípravu teplé vody (typické pro střední Evropu)

Zdroj energie/odvod	Minimální hodnoty <i>SPF</i>	Cílové hodnoty <i>SPF</i>
vzduch/voda	2,3	2,8
zemský masiv/voda	3,0	3,5
voda/voda	3,2	3,8



Studie Fraunhofer ISE

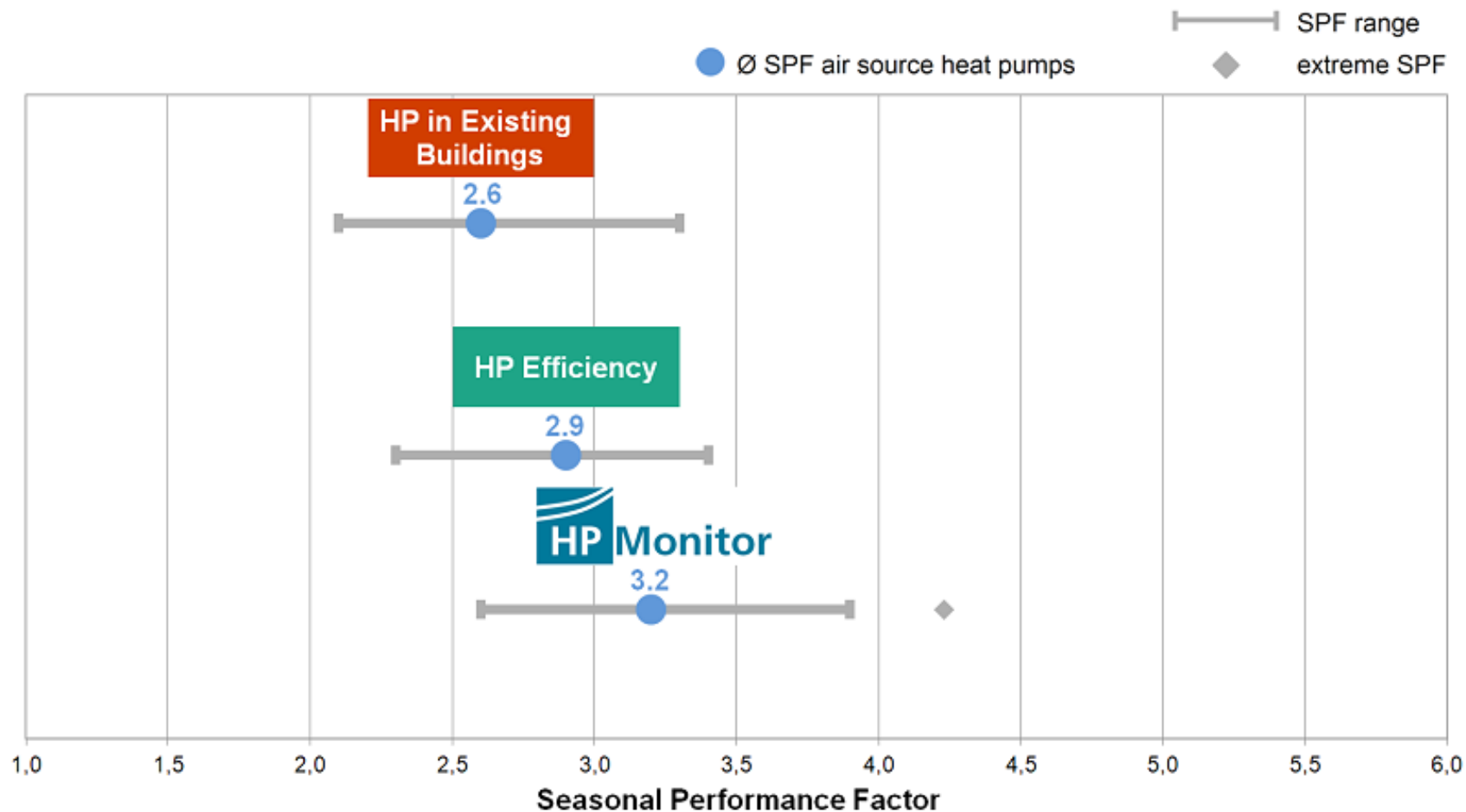
- měření na reálných instalacích, vyhodnocení *SPF*
 - rodinné domy
 - různé stáří, poměr vytápění / teplá voda, klimatické oblasti, roky

<https://wp-monitor.ise.fraunhofer.de>

	Typ budov	Počet instalací	Realizace
HP in Existing Buildings	stávající	80	2006 - 2009
HP Efficiency	novostavby	100	2005 - 2010
HP Monitor	novostavby	90	2009 - 2013

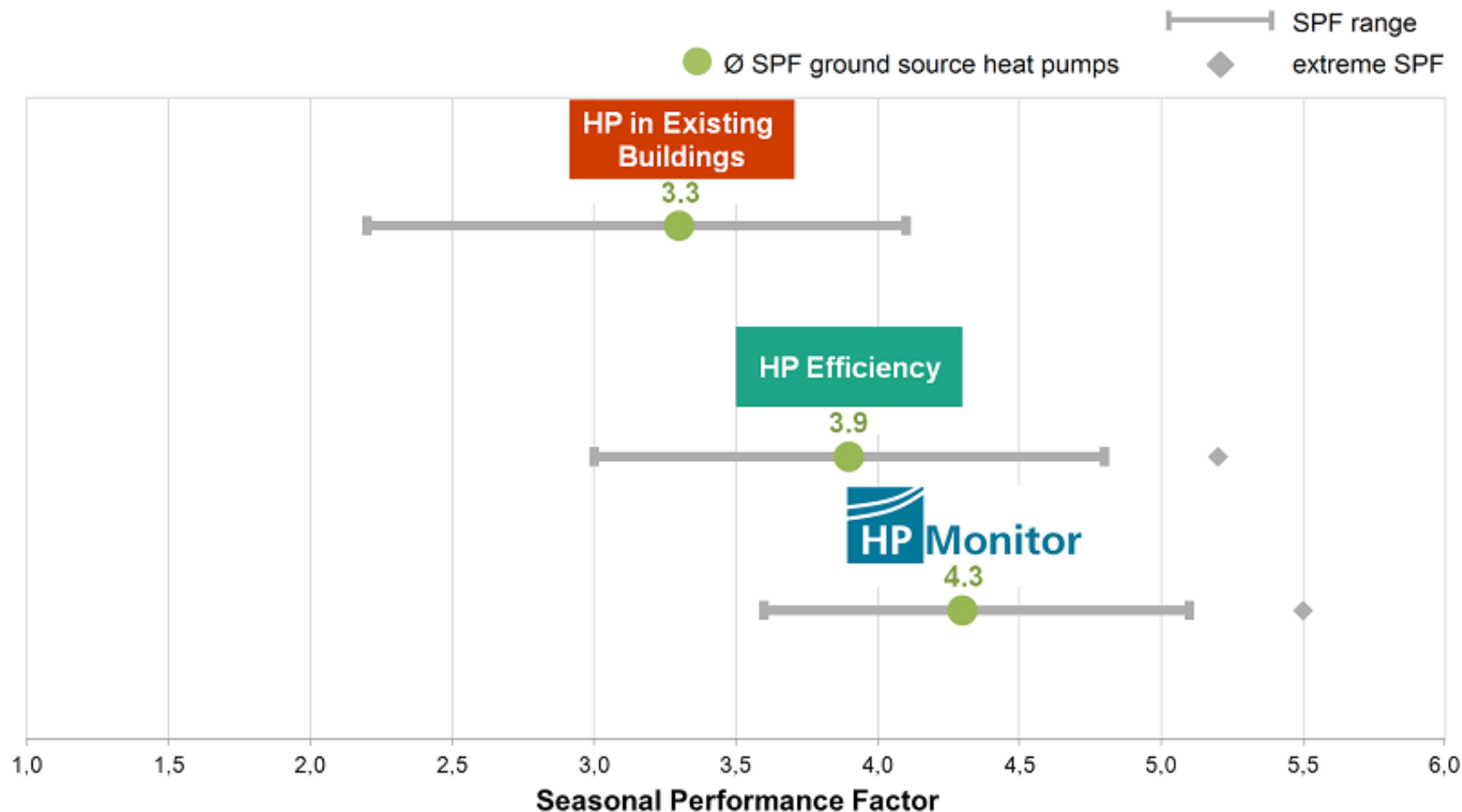


TČ vzduch-voda





TČ země-voda





Bilancování provozu TČ

- **účel bilancování**

- provozní topný faktor samotného tepelného čerpadla *SCOP*
- sezónní topný faktor soustavy s tepelným čerpadlem *SPF*
- skutečná spotřeba el. energie tepelným čerpadlem
- skutečná spotřeba energie dodatkovým zdrojem tepla

- **jednoduchý výpočtový postup**

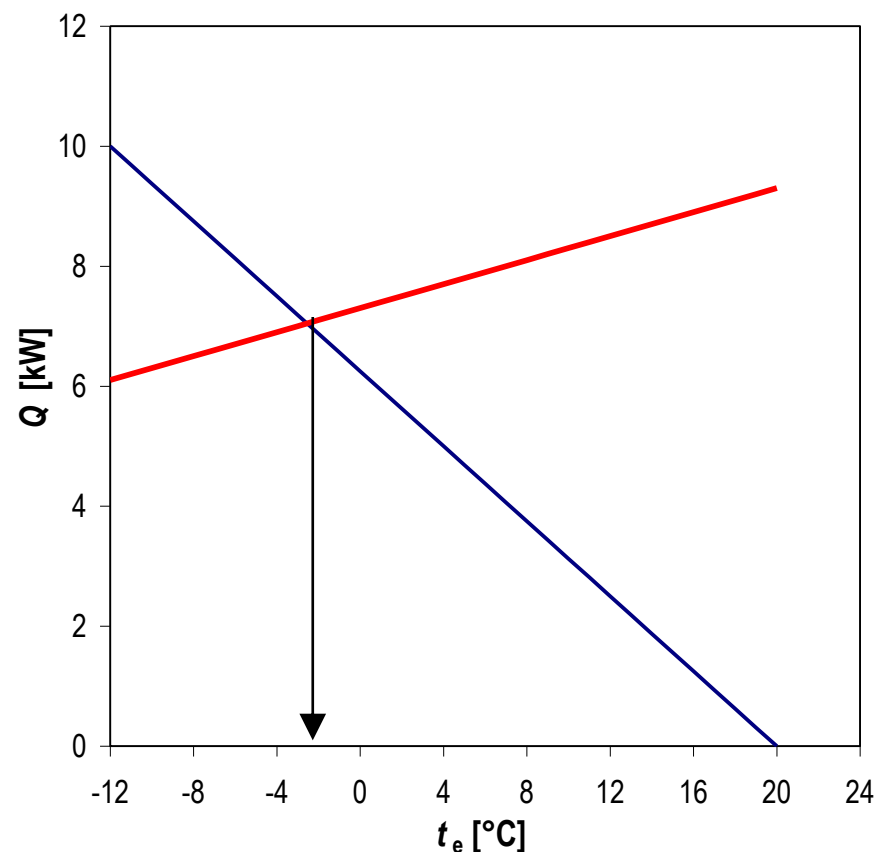
- jednoduchý výpočet s použitím tabulkového procesoru (Excel)
- standardizované klimatické parametry (křivka trvání teplot pro danou lokalitu, histogram teplot)



Bilancování provozu TČ

- **nelze použít měsíční metodu (!)**
 - průměrné měsíční teploty zřídka pod teplotou bivalence

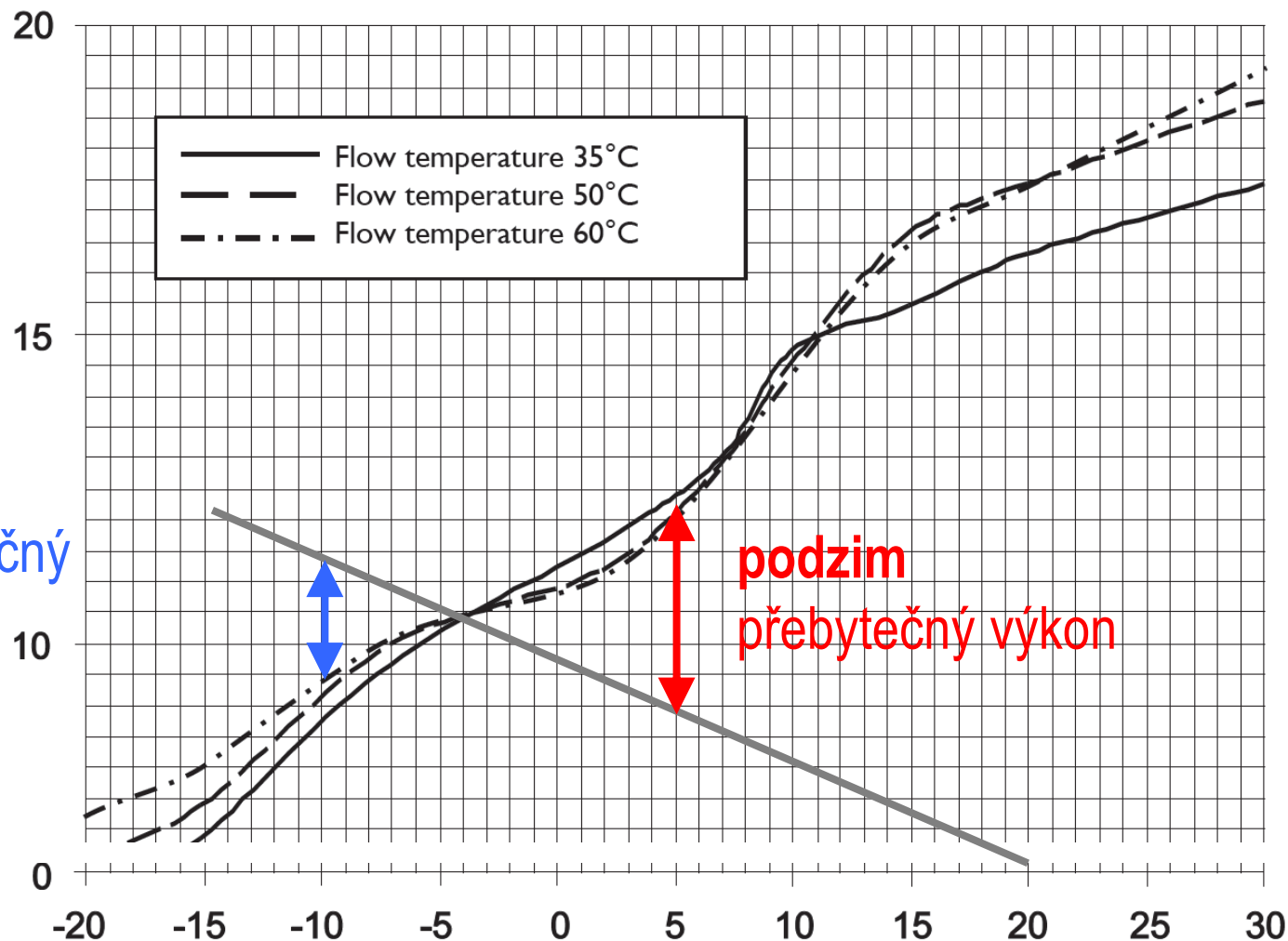
	Praha	České Budějovice	Hradec Králové	Brno
I	-1,5	-2	-2,1	-2
II	0	-0,9	-1	-0,6
III	3,2	3	2,7	3,7
IV	8,8	7,4	7,4	8,7
V	13,6	12,7	12,8	14,1
VI	17,3	15,7	15,6	16,9
VII	19,2	17,5	17,4	18,8
VIII	18,6	16,6	16,8	17,8
IX	14,9	12,9	13,5	14
X	9,4	7,7	8,3	8,7
XI	3,2	2,8	3,1	3,6
XII	-0,2	-0,4	-0,4	-0,2





Je potřeba použít detailní výpočet

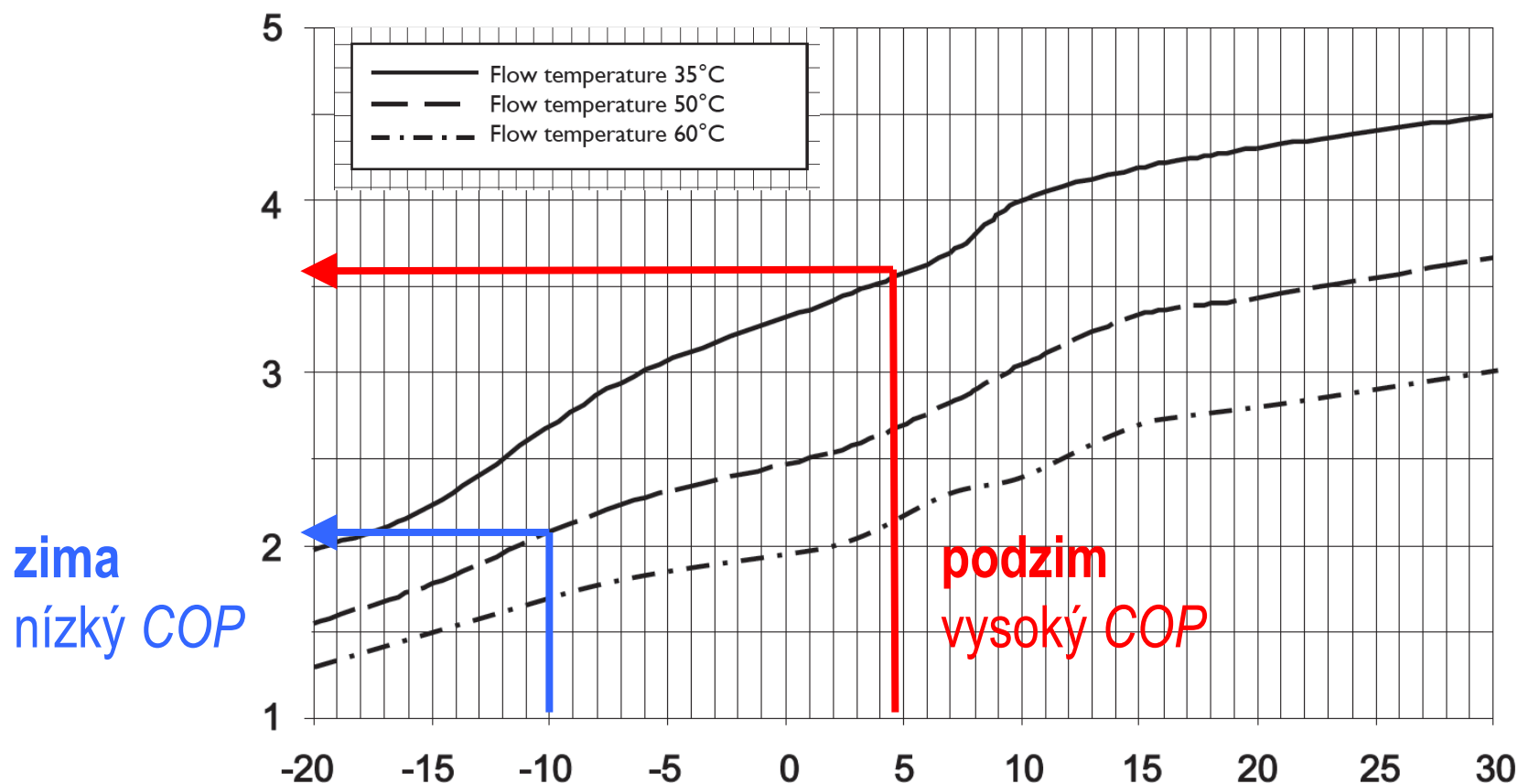
různý výkon tepelného čerpadla v různých obdobích roku





Je potřeba použít detailní výpočet

různý COP tepelného čerpadla v různých obdobích roku





Výpočtová metoda

- **metoda teplotních intervalů, intervalová metoda, (bin method)**
 - normalizovaná v ČSN EN 15316-4-2, velice detailní
 - použití histogramu venkovních teplot pro otopnou sezónu nebo pro celý rok
 - rozlišení intervalů 1 K

- každý **teplotní interval** je charakterizován:
 - horní teplotou – dolní teplotou venkovního vzduchu
 - střední teplotou vzduchu t_j
 - trváním (hodiny) τ_j



Výpočtová metoda

- **TNI 73 0351 - zjednodušení**

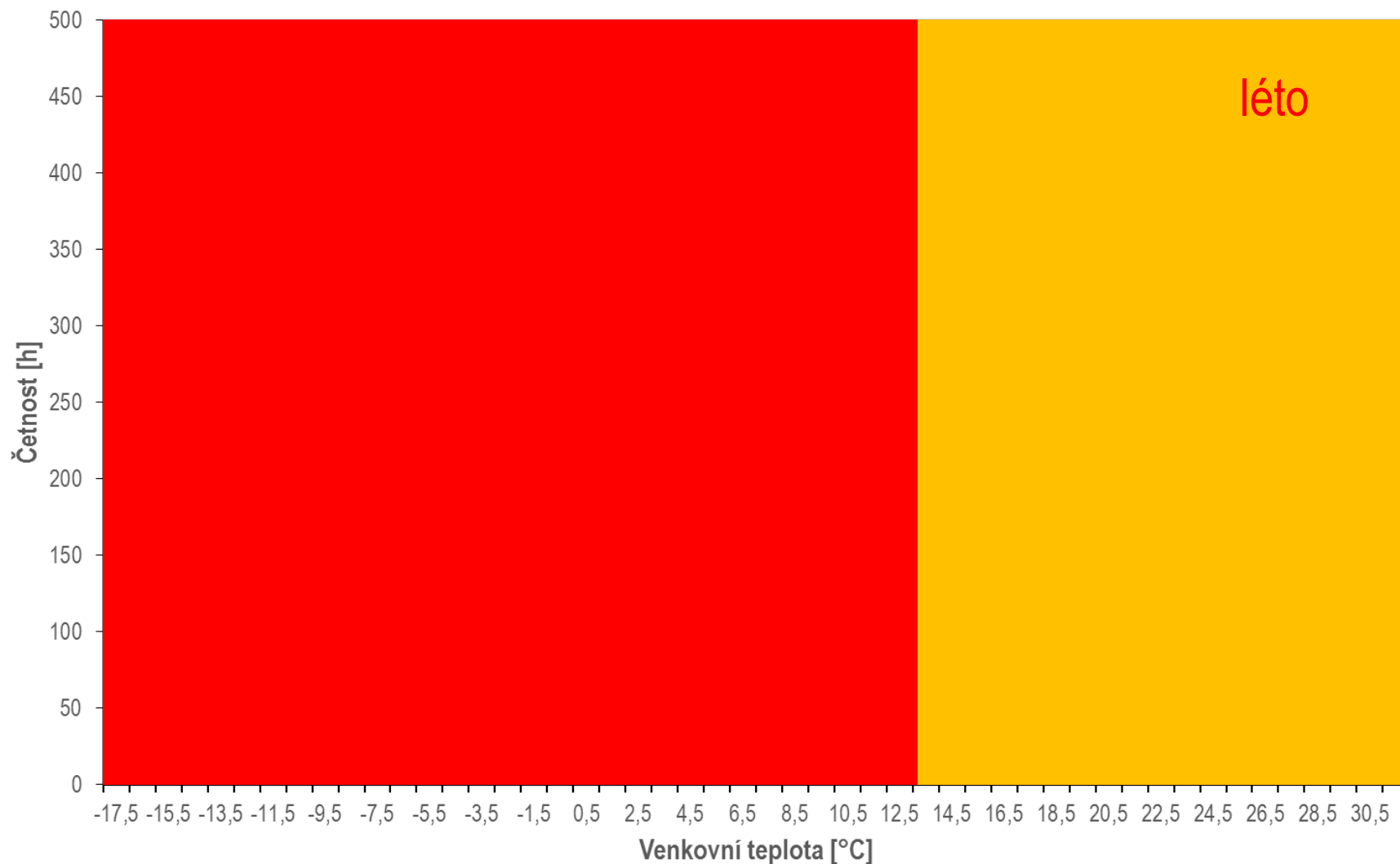
- intervalová metoda – využití četnosti teplot pro otopné období, celý rok, jednotlivé měsíce, údaje v souladu s TNI 73 0331
- nejčastější aplikace: priorita přípravy TV, tepelná čerpadla bilancována v provozu na plný výkon v kombinaci se zásobníkem
- nezohledňuje blokaci ve vysokém tarifu

- **přehledná metoda**

- 15 stran
- vyjasnění podstaty metody
- jiné (přirozené) značení veličin

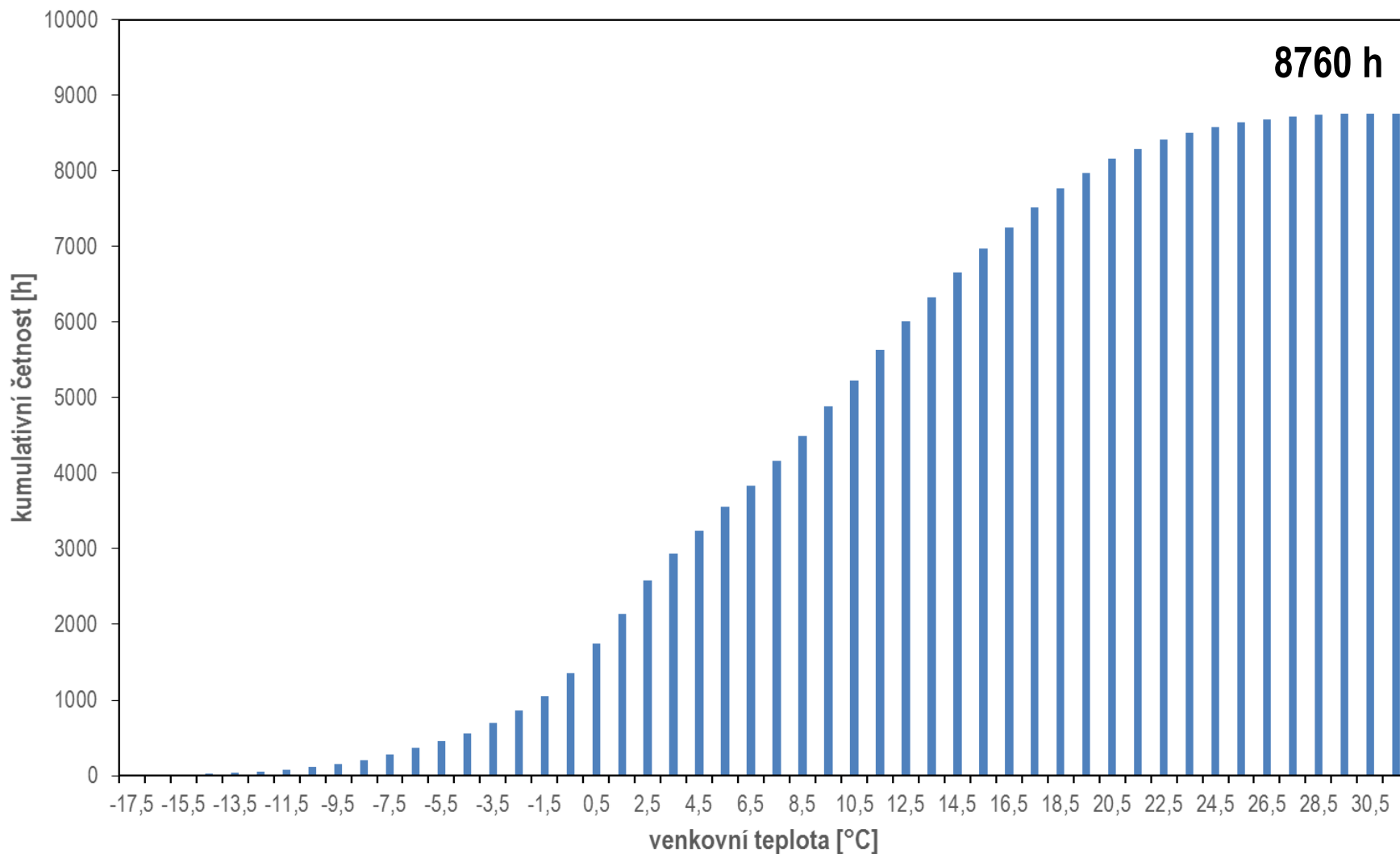


Roční teplotní histogram pro Prahu





Roční teplotní histogram pro Prahu



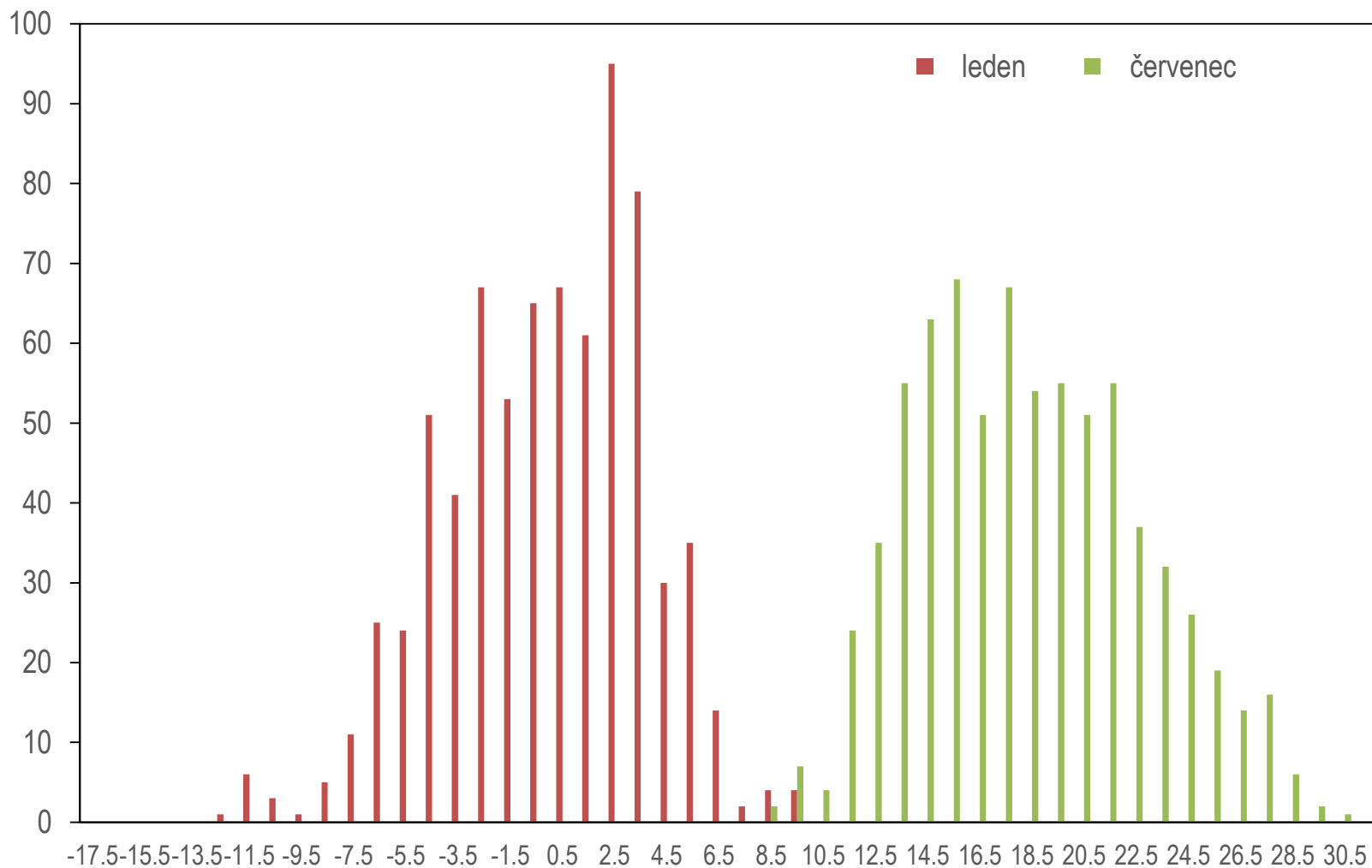


Roční teplotní histogram pro Prahu

$t_{ed,j}$	$t_{eh,j}$	$t_{em,j}$	τ_j	$\tau_{kum,j}$	$DH_{20/13,j}$	$DH_{20/13,kum,j}$
°C	°C	°C	h	h	Kh	Kh
			8760			



Měsíční teplotní histogramy





Energetická bilance

- pro každý teplotní interval se stanoví (pro střední teplotu $t_{e,j}$)
 - potřeba tepla budovy
 - podmínky provozu tepelného čerpadla (t_{v1} , t_{k2})
 - výkon Φ a COP tepelného čerpadla
 - dostupná energie $Q_{TC,dis}$ z TČ
 - energie dodaná $Q_{TC,dod}$ z TČ pro krytí potřeby tepla budovy
 - potřeba elektřiny E_{TC} pro TČ
 - potřeba dodatkového tepla Q_{ZZ} ze záložního zdroje (elektřina E_{ZZ})
 - provozní doba τ_{TC} tepelného čerpadla
 - potřeba pomocné elektřiny E_{pom} (čerpadla)



Potřeba tepla

- potřeba tepla na vytápění – rozdělení do intervalů
 - zjednodušená metoda založená na hodinostupních DH_j v teplotním intervalu
 - předpoklad:

celková potřeba tepla na vytápění $Q_{VYT} \sim DH$ v daném období

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT} \frac{DH_j}{DH} = Q_{VYT} \frac{(t_i - t_{e,j}) \cdot \tau_j}{\sum_j DH_j} = Q_{VYT} \cdot f_{VYT}$$

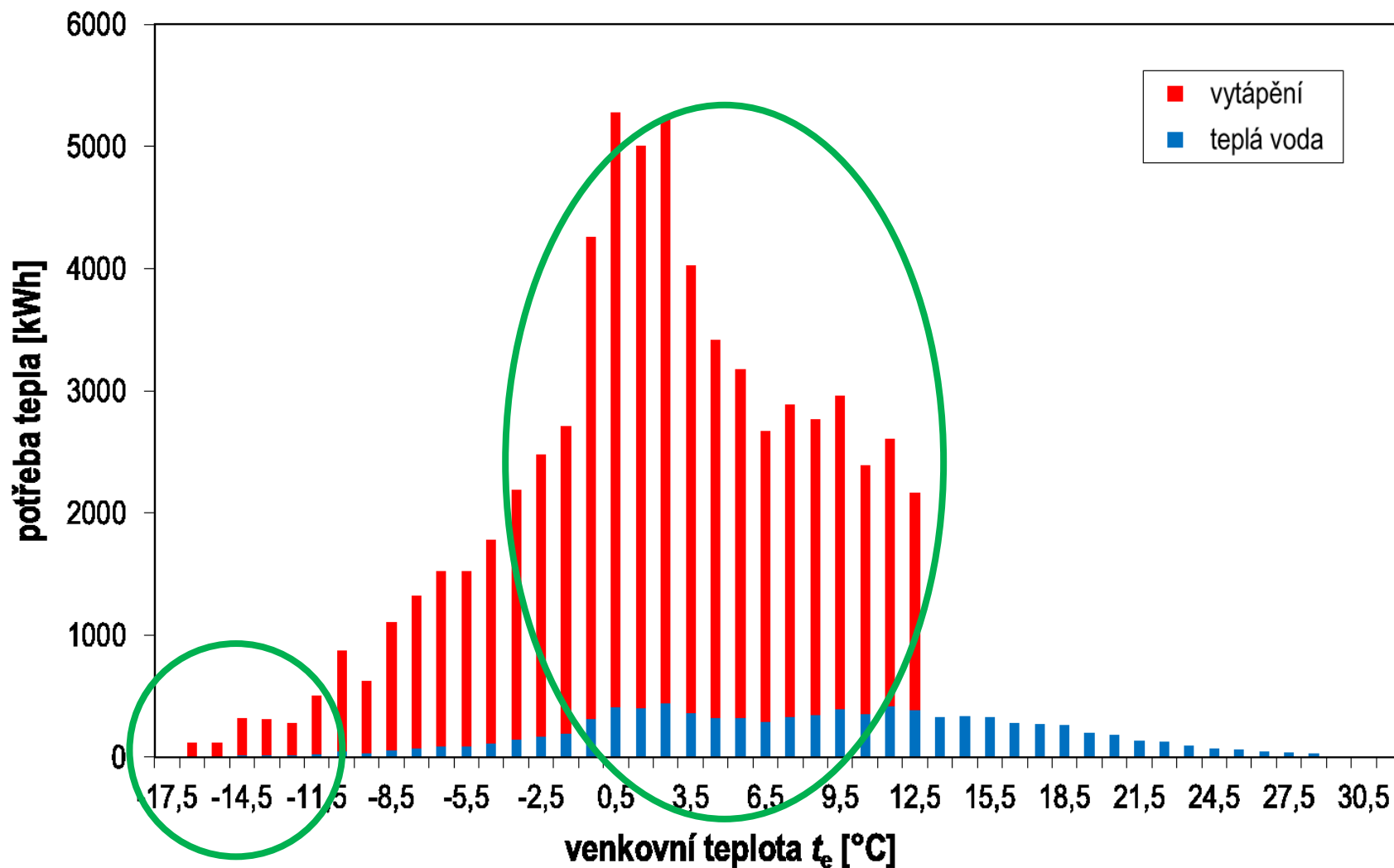


Potřeba tepla

- potřeba tepla na přípravu TV – rozdělení do intervalů
 - na základě trvání intervalů - počtu hodin H_j v intervalu
 - celková potřeba tepla na TV $Q_{TV} \sim H$ v roce (= 8760 h)

$$Q_{TV,j} = Q_{TV} \frac{H_j}{H} = Q_{TV} \frac{H_j}{\sum_j H_j} = Q_{TV} \cdot f_{TV}$$

Rozpočet potřeby tepla do intervalů





Parametry tepelného čerpadla

- **topný výkon Q_k [kW]** – výkon odebíraný z kondenzátoru
 - **topný faktor COP [-]**
-

při jasně definovaných podmínkách t_{v1} a t_{k2}

- **elektrický příkon P_{el} [kW]**

- **charakteristiky**

- využití lineárních nebo kvadratických interpolací a extrapolací
charakteristik (bodů) pro jiné provozní podmínky

Brir Hea	$\dot{Q}_{TC} = A + B \cdot t_{v1} + C \cdot t_{k2} + D \cdot t_{v1}^2 + E \cdot t_{k2}^2 + F \cdot t_{v1} \cdot t_{k2}$								
Heat source temp. °C	35 °C	50 °C	60 °C	35 °C	50 °C	60 °C	35 °C	50 °C	60 °C
									
	$COP = a + b \cdot t_{v1} + c \cdot t_{k2} + d \cdot t_{v1}^2 + e \cdot t_{k2}^2 + f \cdot t_{v1} \cdot t_{k2}$								
-5	ε								
0	2.2								
+5	2.6								
+10	24.8	23.3	22.4	4.5	6.4	7.8	5.5	3.7	2.9
+15	28.1	26.2	25.0	4.6	6.4	7.8	6.1	4.1	3.2
+20	31.7	29.5	28.0	4.7	6.5	7.9	6.7	4.6	3.6



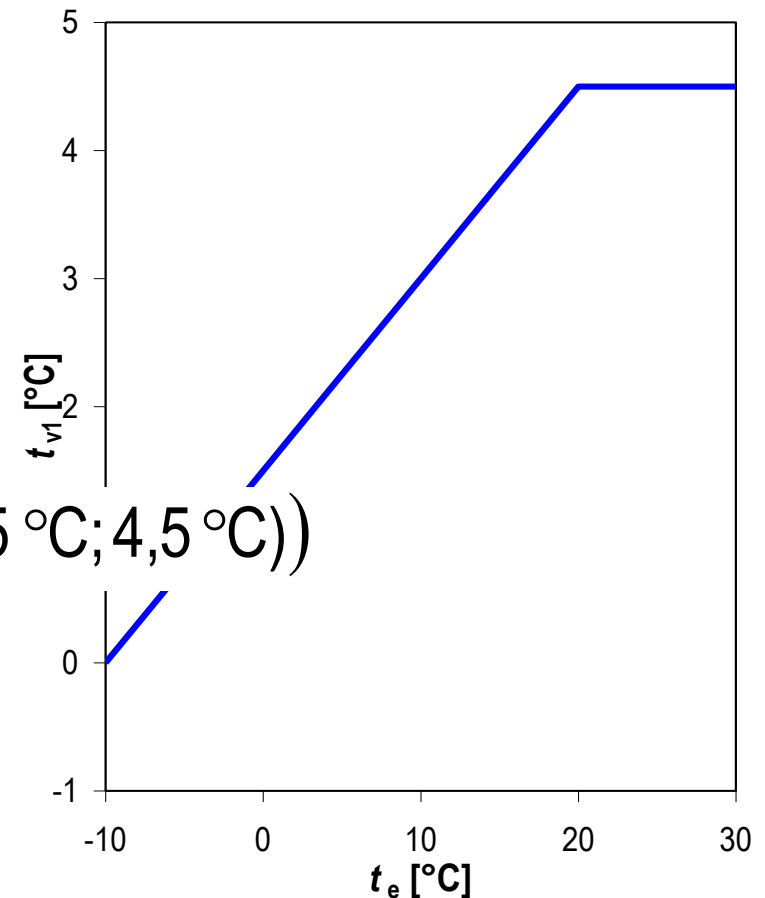
Teplota NPT zdroje

- **teplota zdroje NPT** = teplota na vstupu do výparníku t_{v1}

- vzduch-voda: $t_{v1} = t_e$
- voda-voda: $t_{v1} = 10\text{ °C}$
- země-voda. $t_{v1} = f(t_e)$

EN 15316-4-2:

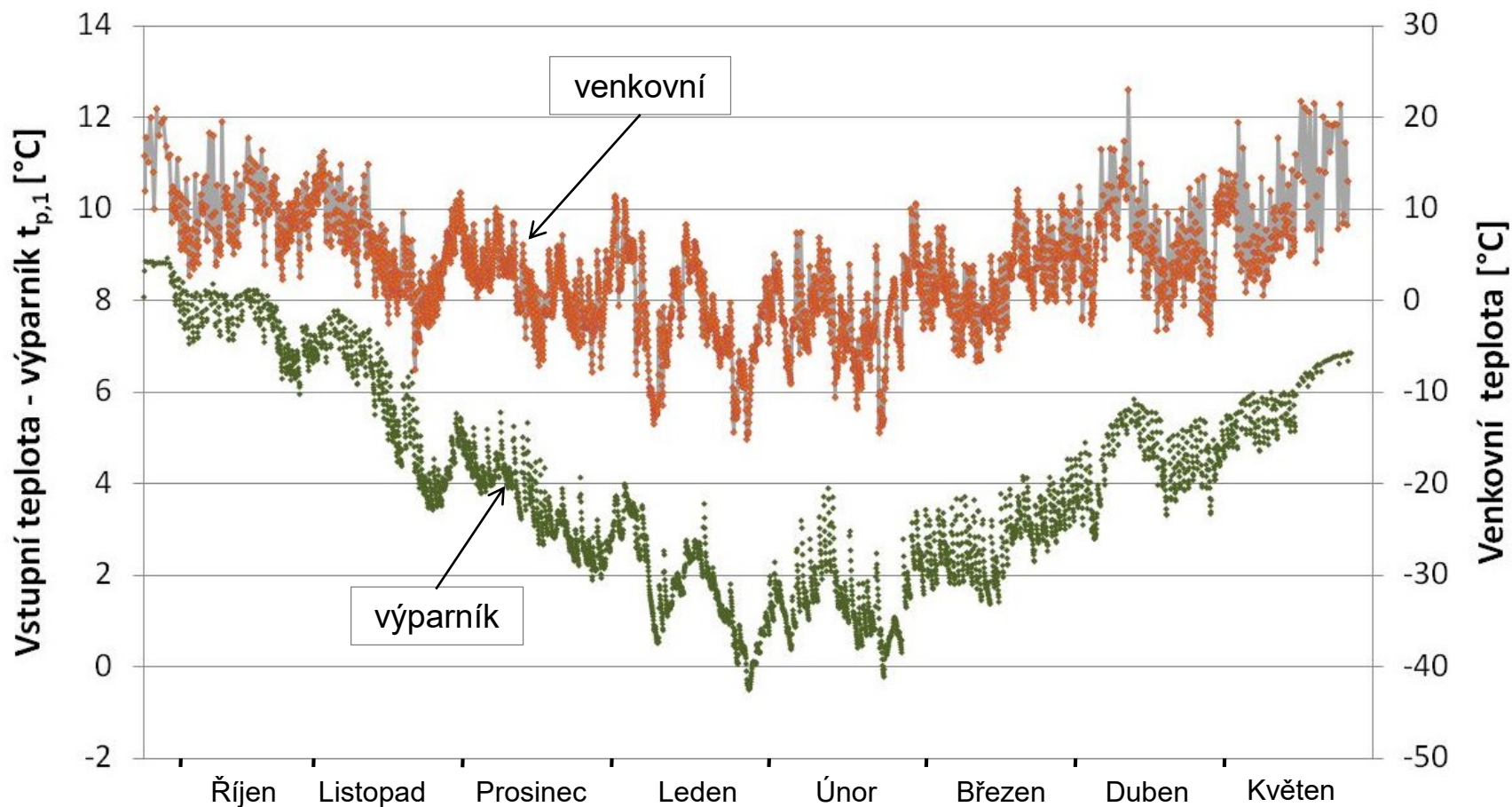
$$t_{v1} = \max(0\text{ °C}; \min(0,15 \cdot t_e + 1,5\text{ °C}; 4,5\text{ °C}))$$





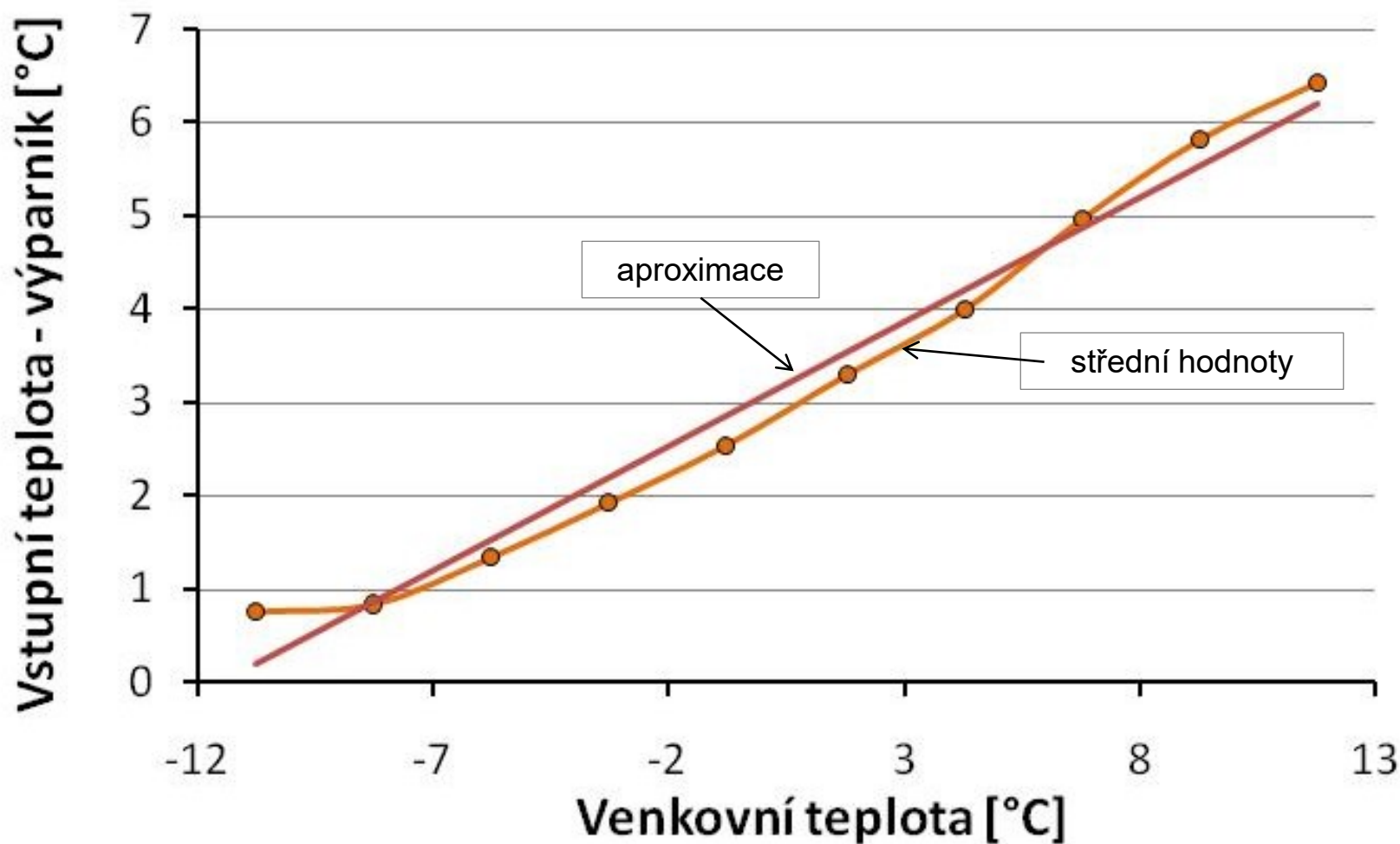
Teplota zdroje NPT (země)

měření na vrtu FS, ČVUT v Praze





Teplota zdroje NPT (země)





Otopná soustava – teplota vody

- **teplota otopné vody = $f(t_e)$**
 - ekvitemní teplota **přívodní** otopné vody t_{w1} $t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_w$
 - návrhový teplotní spád otopné vody $t_{w1,N} / t_{w2,N}$
 - výpočtová venkovní teplota $t_{e,N}$
 - výpočtová vnitřní teplota $t_{i,N}$ = průměrná vnitřní teplota t_i
 - výpočet teploty otopné vody z rovnice pro výkon otopného tělesa

$$\frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z,N}} = \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n$$

$$\frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z,N}} = \frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_N$$



Ekvitermní teplota otopné vody

$$\dot{m} = \dot{m}_N \longrightarrow \frac{\dot{Q}}{c(t_{w1} - t_{w2})} = \frac{\dot{Q}_N}{c(t_{w1,N} - t_{w2,N})}$$

$$\frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1,N} - t_{w2,N}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_N} = \frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}}$$

$$t_{w1} - t_{w2} = (t_{w1,N} - t_{w2,N}) \frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}}$$



Ekvitemní teplota otopné vody

$$\frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z,N}} = \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n = \left(\frac{\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_i}{\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_{i,N}} \right)^n = \frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}}$$

$$\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_i = \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_{i,N} \right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\boxed{t_{w1} + t_{w2}} = 2 \cdot t_i + 2 \cdot \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_{i,N} \right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

n ... teplotní exponent

$n = 1,3$ otopná tělesa

$n = 1,1$ podlahové
vytápění



Teplota otopné vody

- **režim vytápění (otopná tělesa)**

- jmenovité (návrhové) teploty $t_{w1,N} / t_{w2,N}$
- teplotní exponent n

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i \right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} \right)^{1/n}$$

$$t_{k2} = t_{w1} + 2 \text{ K}$$

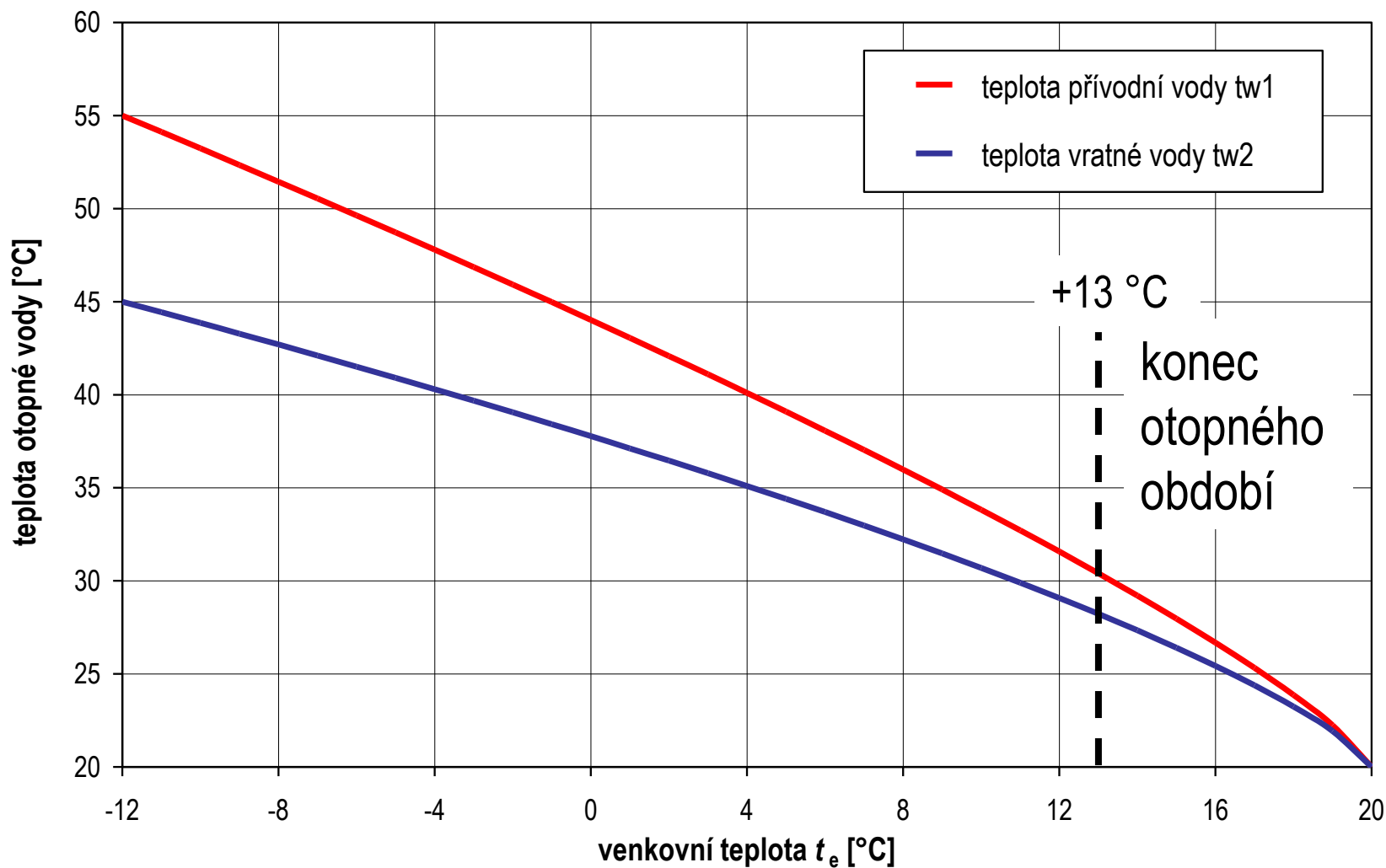
- **režim teplé vody**

- požadavek $t_{TV} = 55 \text{ °C}$

$$t_{k2} = t_{TV} + 5 \text{ K}$$



Ekvitemní teplota otopné vody





Výpočtové vztahy pro intervaly

energie dostupná z TČ [kWh]

$$Q_{TC,dis,j} = \Phi_{TC,j} \cdot \tau_j$$

energie dodaná z TČ pro krytí potřeby [kWh]

$$Q_{TC,dod,j} = \min(Q_{TC,dis}; Q_{VYT,TV})_j$$

potřeba elektřiny pro TČ [kWh]

$$E_{TC,j} = \frac{Q_{TC,dod,j}}{COP_j}$$

energie dodaná záložním zdrojem
potřeba elektrokotle [kWh]

$$E_{ZZ,j} = Q_{VYT,TV,j} - Q_{TC,dod,j}$$



Výpočtové vztahy pro intervaly

doba chodu TČ

$$\tau_{TC,j} = \frac{Q_{TC,dod,j}}{\Phi_{TC,j}}$$

potřeba pomocné energie
(čerpadla, ventily, regulace, atd.)

$$E_{pom,j} = P_{pom} \cdot \tau_{TC,j}$$



Celoroční hodnoty

dodaná energie z TČ

$$Q_{\text{TC,dod}} = \sum_j Q_{\text{TC,dod},j}$$

potřeba elektřiny pro TČ

$$E_{\text{TC}} = \sum_j E_{\text{TC},j}$$

potřeba elektřiny pro záložní zdroj

$$E_{\text{ZZ}} = \sum_j E_{\text{ZZ},j}$$

potřeba pomocné elektřiny

$$E_{\text{pom}} = \sum_j E_{\text{pom},j}$$

doba chodu TČ

$$\tau_{\text{TC}} = \sum_j \tau_{\text{TC},j}$$



Celoroční hodnoty

sezónní topný faktor

$$Q_{VYT} + Q_{TV}$$

$$SPF = \frac{Q_{TC,dod} + Q_{ZZ}}{E_{TC} + E_{ZZ} + E_{pom}}$$



Kombinace vytápění a přípravy TV

- **priorita přípravy teplé vody** - výpočet nejdřív pro přípravu teplé vody

- potřeba tepla $Q_{TV,j}$

- teplo dodané z TČ v režimu teplé vody $Q_{TC,dod,TV,j}$

$$t_{k2} = t_{TV} + \Delta t_{TV}$$

- výpočet doby chodu v režimu TV

$$\tau_{TC,TV,j} = \frac{Q_{TC,dod,TV,j}}{\Phi_{TC,TV,j}}$$

- zbývající doba dostupná pro TČ v režimu vytápění

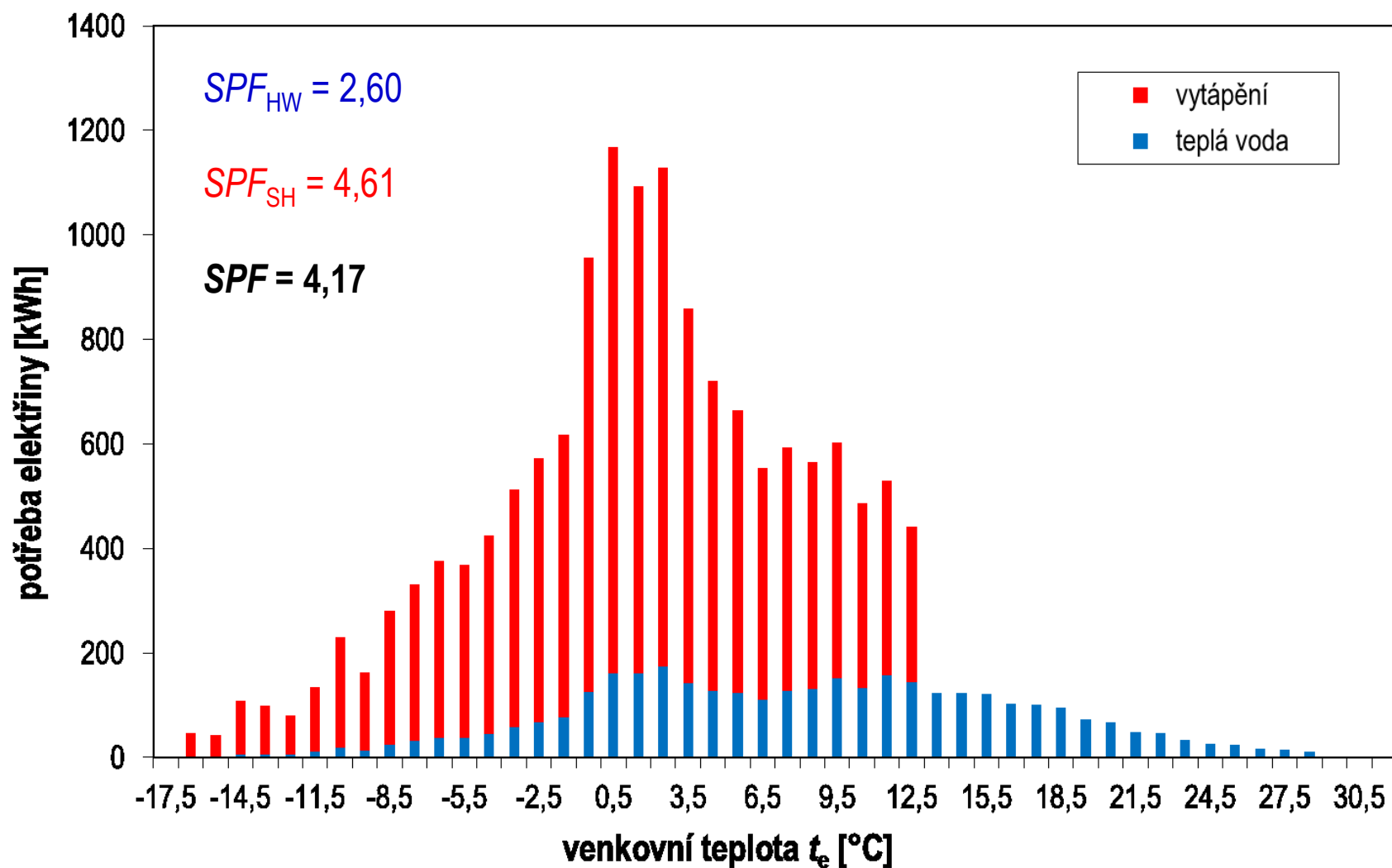
$$\tau_{TC,VYT,dis,j} = \tau_j - \tau_{TC,TV,j}$$

- teplo dostupné (k dispozici) pro režim vytápění

$$Q_{TC,VYT,dis,j} = \tau_{TC,VYT,dis,j} \cdot \Phi_{TC,VYT,j}$$



Celoroční výsledky – příklad





Běžný dům

■ vytápění

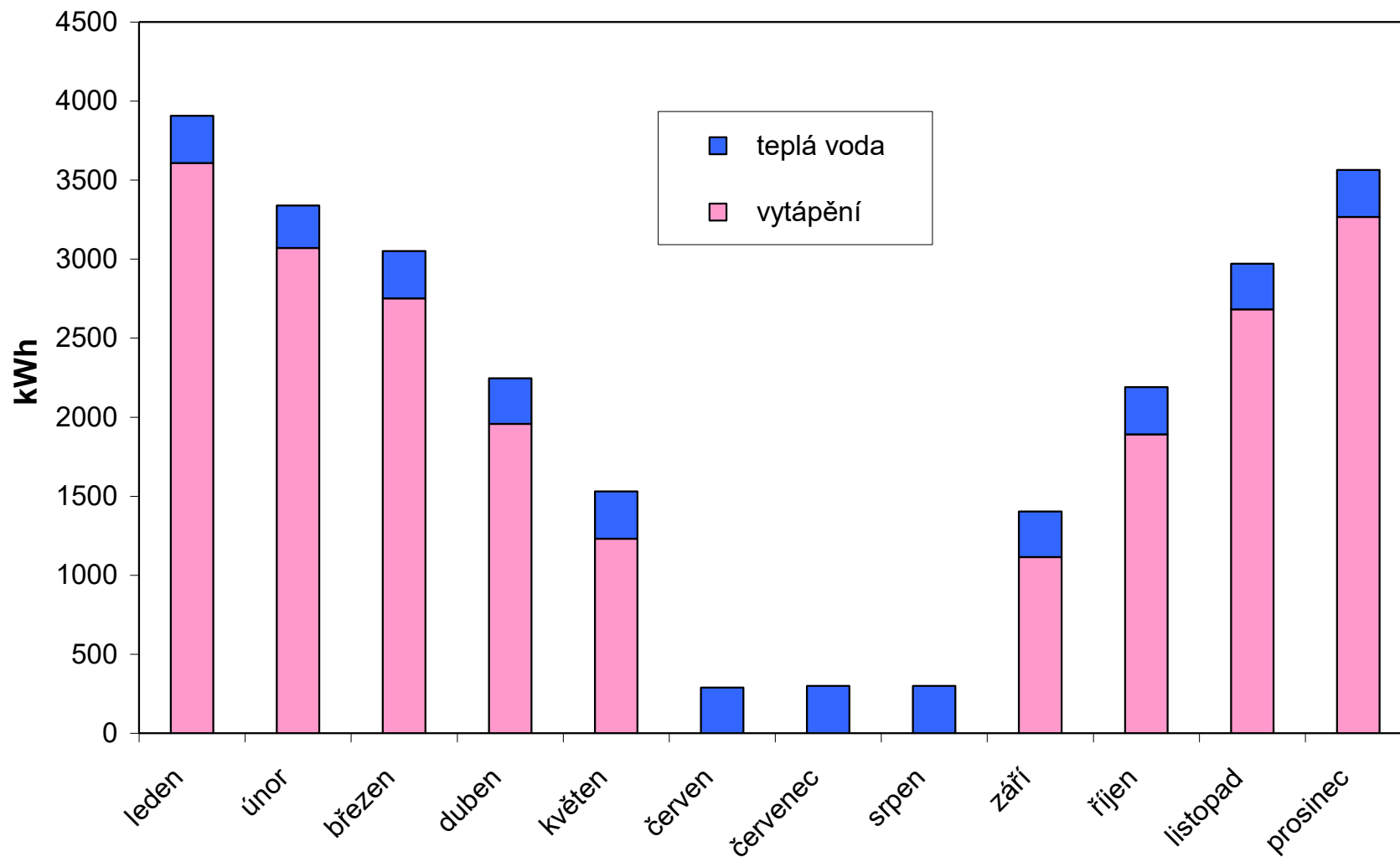
- 160 m²
- tepelná ztráta 10 kW (-12 °C)
- potřeba tepla na vytápění 21 500 kWh/rok (135 kWh/m².rok), TMY Praha
- otopná soustava 50/40 °C 35/30 °C

■ teplá voda

- 4 osoby, 45 l/os.den, tepelné ztráty 15 %
- teplota teplé vody 55 °C, teplota studené vody 15 °C
- potřeba tepla na ohřev vody 3 500 kWh/rok (**14 %** z celkové potřeby)



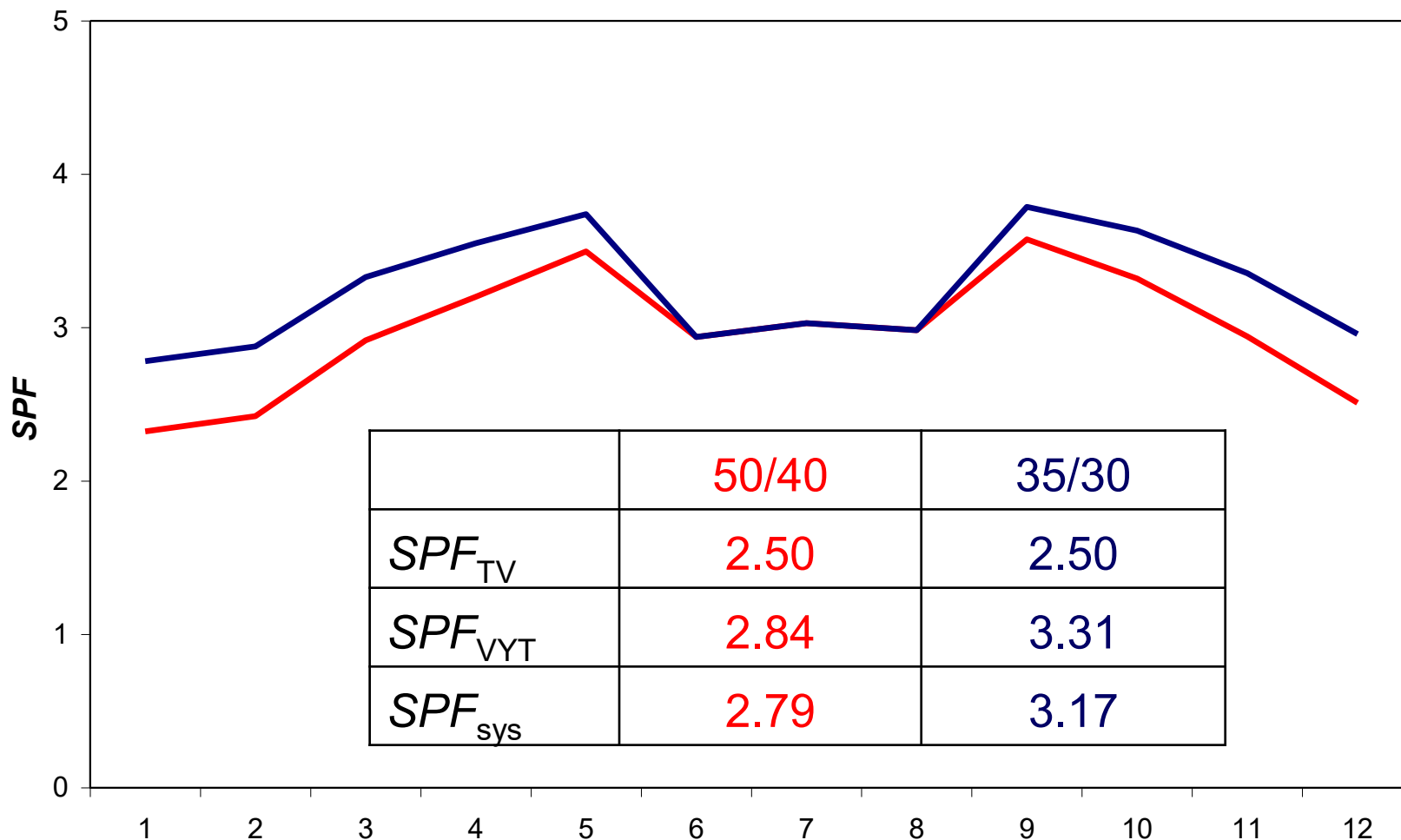
Běžný dům





Tepelné čerpadlo vzduch-voda

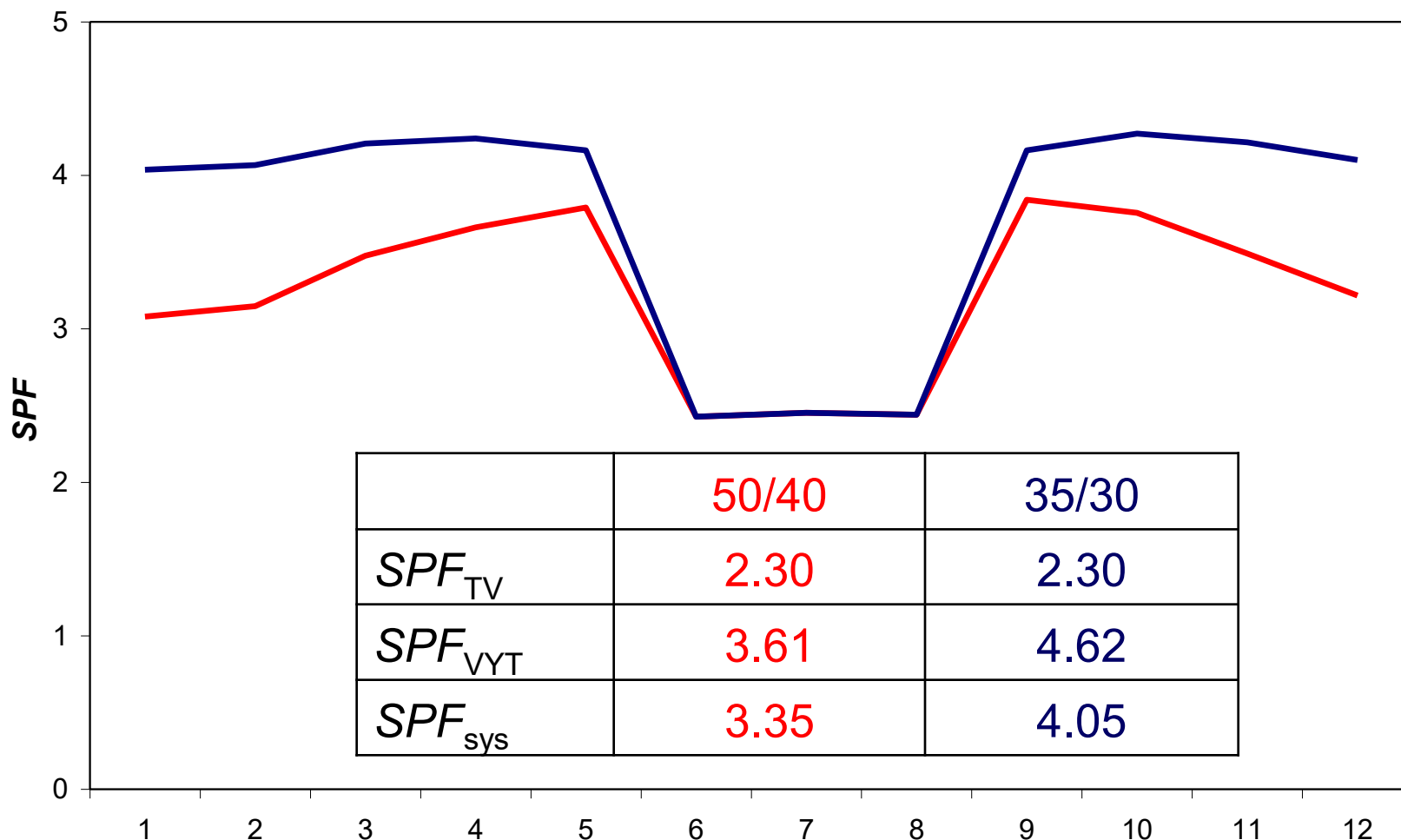
výkon 8,1 kW a $COP = 3,4$ při A2/W35





Tepelné čerpadlo země-voda

výkon 9,9 kW a $COP = 4,5$ při B0/W35





Běžný dům

- požadavky na *SPF* lze splnit
 - velká potřeba tepla na vytápění oproti přípravě teplé vody
 - nízkoteplotní otopná soustava
 - vysoké pokrytí potřeby tepla tepelným čerpadlem (snaha o monovalentní řešení)
 - správně navržený nízkopotenciální zdroj tepla
 - běžná koncepce řešení tepelných čerpadel



Pasivní dům

■ vytápění

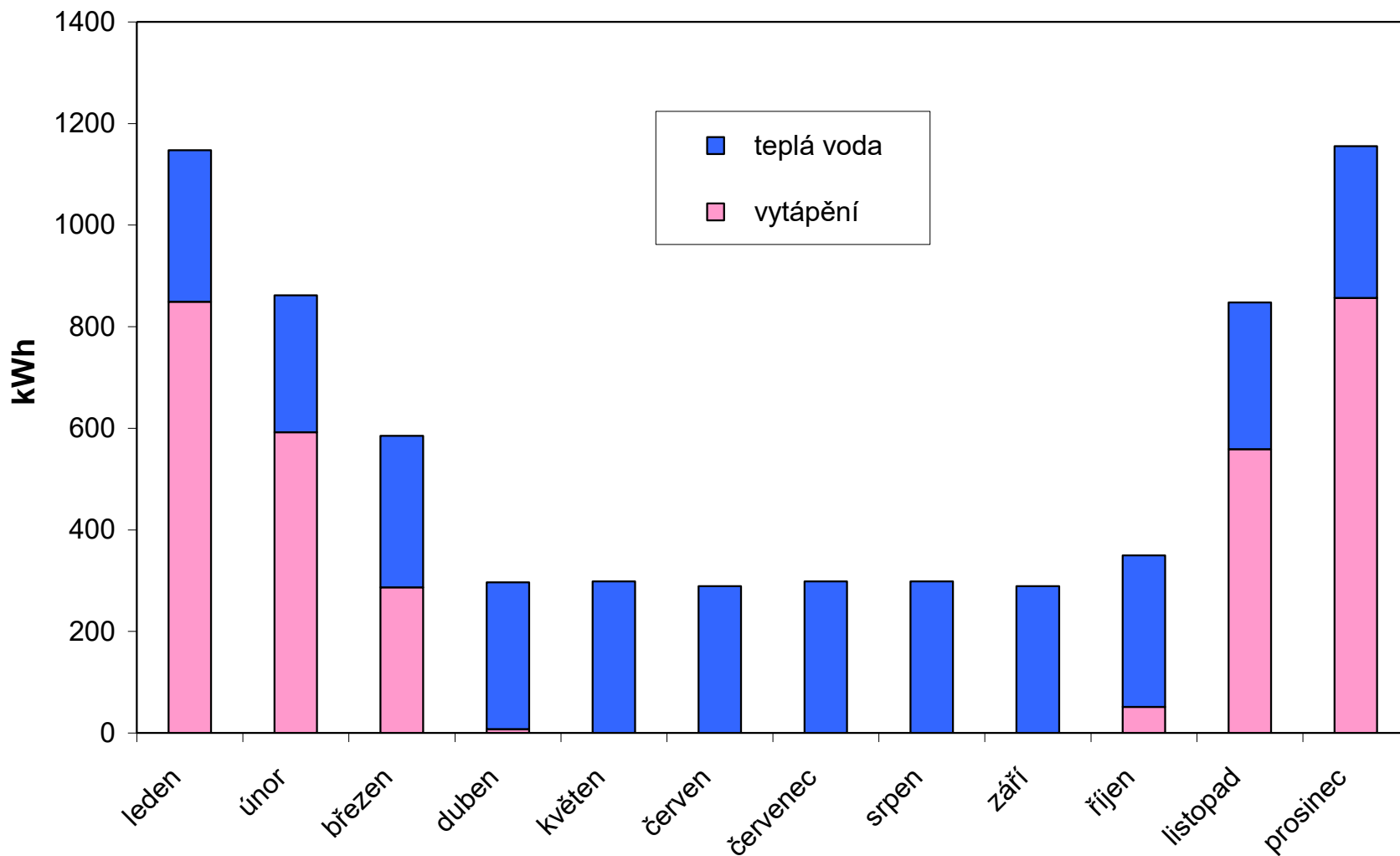
- 160 m²
- tepelná ztráta 2,7 kW (-12 °C)
- potřeba tepla na vytápění 3 200 kWh/rok (20 kWh/m².rok), TMY Praha
- otopná soustava 35/25 °C

■ teplá voda

- 4 osoby, 45 l/os.den, tepelné ztráty 15 %
- teplota teplé vody 55 °C, teplota studené vody 15 °C
- potřeba tepla na ohřev vody 3 500 kWh/rok (**52 %** z celkové potřeby)



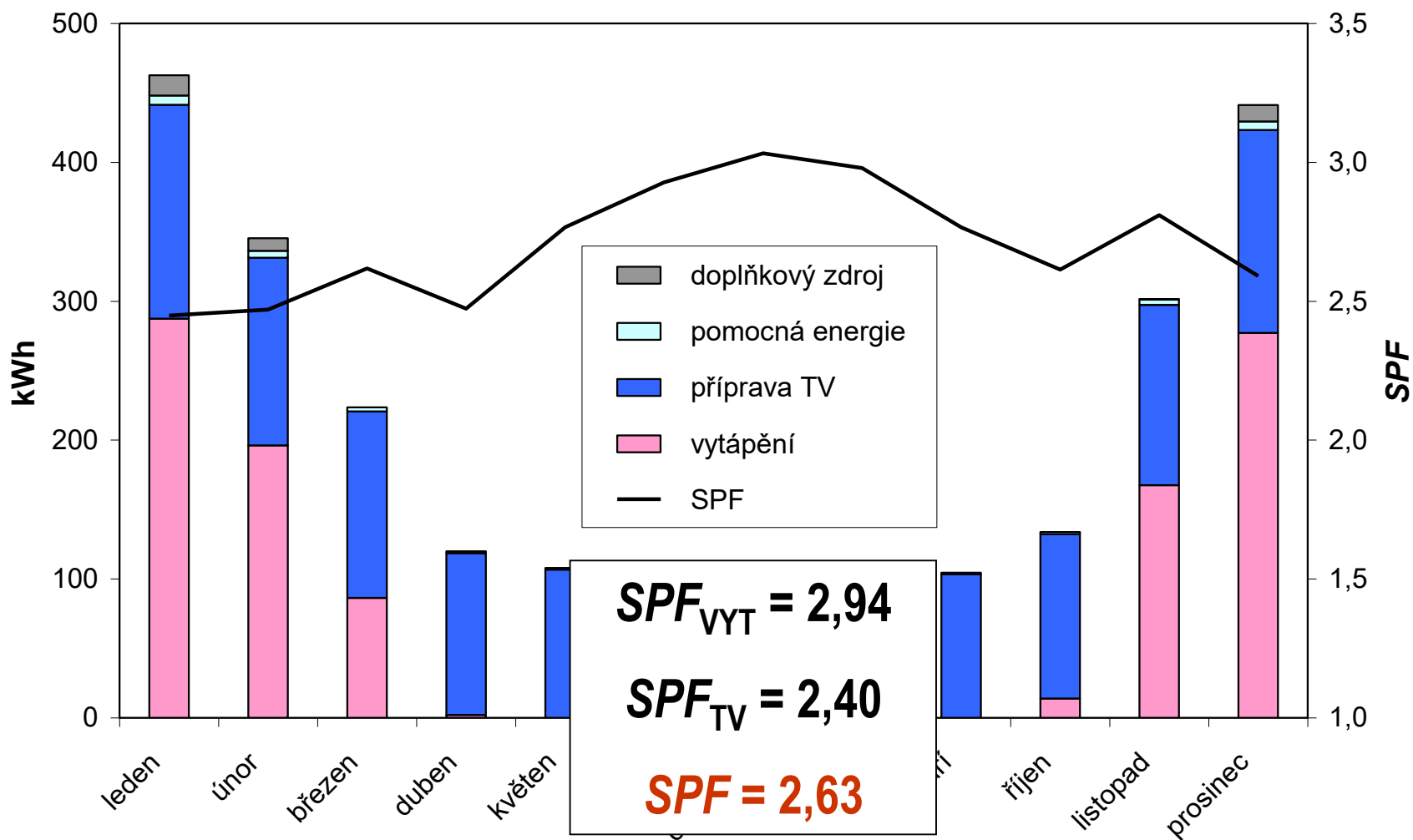
Pasivní dům





Tepelné čerpadlo vzduch-voda

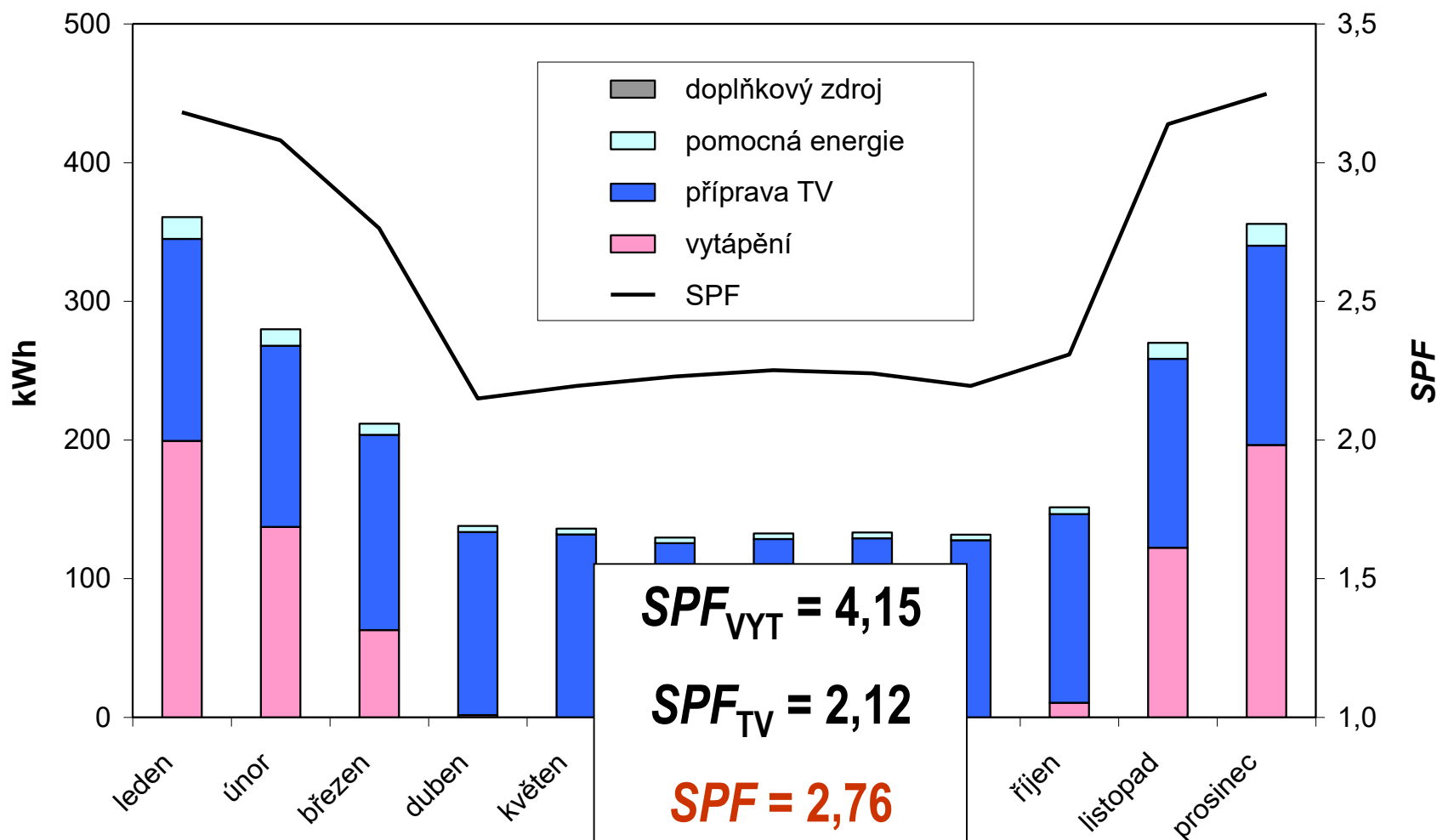
výkon 6,7 kW a $COP = 3,2$ při A2/W35





Tepelné čerpadlo země-voda

výkon 5,8 kW a $COP = 4,3$ při B0/W35





Pasivní dům

- požadavky na **SPF** nelze splnit i přes
 - nízkoteplotní otopnou soustavu
 - monovalentní řešení
 - správně navržený nízkopotenciální zdroj tepla
- avšak při
- běžné koncepci řešení tepelných čerpadel
 - velké potřebě tepla na přípravu teplé vody oproti vytápění kvůli vysoké teplotě
 - **plynový kotel + solární soustava = o 20 až 30 % nižší potřeba primární energie**



Kudy dál v pasivních domech?

- **snížení požadavku teploty teplé vody na 45 °C**
 - snížení tepelného komfortu
 - hygienické požadavky

- **koncepce tepelných čerpadel pro efektivnější ohřev vody**
 - tepelná čerpadla s dochlazovačem chladiva pro předehřev studené vody
 - kaskádový ohřev teplé vody, dva zásobníky v sérii, stratifikovaný ohřev