

Intelligentní volné chlazení



 UNIFLAIR™

Inteligentní volné chlazení

Redundance: „N+1“

Při projektování systémů, u nichž musí být zaručen nepřetržitý chod, je zásadně důležitá spolehlivost.

U technologických pracovišť, tj. místností s technologickým vybavením, a/nebo konkrétních procesů nepřetržitě vyžadujících zaručené optimální provozní podmínky, a také u řady průmyslových procesů, jsou náklady v případě odstávky v mnoha případech vyšší, než je cena samotného zařízení.

Při návrhu spolehlivého systému je proto nutné vybrat jednotku, která je už v principu spolehlivá, tj. je navržena a vyrobena tak, aby zaručovala extrémně nízkou pravděpodobnost poruchy a neefektivního fungování, a také měla dostatečné rezervy: systém je rozšířen o jednu či více záložních jednotek, a proto hovoříme o logice „n+1“, což zaručuje možnost vystřídání jednotek v případě, že má systém z jakéhokoli důvodu potíže.



Volné chlazení

Pokud systém chladí technologické systémy nebo průmyslové procesy, které jsou provozovány trvale po celý rok, tedy i při nízkých venkovních teplotách, je z hlediska spotřeby energie výhodné použít systémy, které jsou navrženy tak, aby těchto provozních podmínek využívaly; typickým řešením jsou chladicí systémy s jednotkou volného chlazení.

Jednotky tohoto typu dokážou, pokud je venková teplota dostatečně nízká, pracovat s nižším výkonem „chladicí“ části, nebo ji zcela vypnout. Právě kompresory jsou přitom tou součástí chladicího systému, která spotřebovává nejvíce energie. Chlazení pak zajišťují tepelné výměníky vzduch/voda, které jsou nedílnou součástí jednotky.

Chladná voda je zajištěna díky venkovnímu vzduchu a na spotřebě energie se podílejí jen ventilátory.

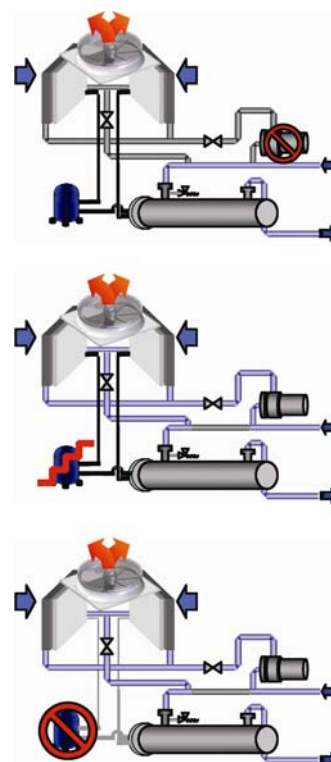
Chladná voda tak je k dispozici prakticky zadarmo!

Vzhledem k tomu, že z analýzy teplotních profilů ve velkých evropských městech vyplývá, že nejběžnější venkovní teplota bývá 0 až 15 °C, je nutno při návrhu volného chlazení navrhnout metody, které nejúčinněji fungují v tomto teplotním pásmu.

Jednotky Uniflair využívající volné chlazení jsou proto vybaveny režimem, který využije nízkou venkovní teplotu i v případě, že nedokáže pokrýt celou tepelnou zátěž, ale jen její část. Tento režim nazýváme smíšený – chladicí jednotka využívá vnější vzduch k předběžnému zchlazení vody v systému, takže pak kompresory mají méně práce a šetří elektrickou energii. Tepelná zátěž, kterou musí rozptýlit výparník, je menší než u standardních chladičů provozovaných za stejných podmínek.

Existují proto tři provozní režimy:

- Mechanické chlazení: při teplotách nad 15 °C funguje jednotka s volným chlazením stejně jako standardní chladič, tepelná zátěž je pokryta výparníkem pomocí kompresorů (pracují ventilátory i kompresory).
- Smíšené chlazení: při teplotách 5 až 15 °C stačí venkovní vzduch odvádět jen část tepelné zátěže. Při poklesu venkovní teploty na 15 °C spustí řídicí systém čerpadlo volného chlazení a voda prochází tepelnými výměníky vzduch/voda, umístěnými sériově s výparníkem, takže se snižuje jeho tepelná zátěž (pracují ventilátory, čerpadlo volného chlazení a kompresory, ale jen částečně).
- Volné chlazení: pokud je venkovní teplota dostatečně nízká, dokáží tepelné výměníky vzduch/voda odvést celou tepelnou zátěž, aniž by musely běžet kompresory (pracují ventilátory a čerpadlo volného chlazení).



Intelligentní volné chlazení

Kombinací výše uvedených principů v aplikacích vyžadujících nepřetržitý provoz dokáží jednotky vybavené funkcí volného chlazení realizovat redundantní logiku, kdy je část dostupného chladicího výkonu v záloze.

Totéž se dá říct o dostupné kapacitě volného chlazení.

Principem *intelligentního volného chlazení* je to, že se při dostatečně nízkých venkovních teplotách využívají tepelné výměníky vzduch/voda i těch jednotek, které jsou v záloze.

Propojením všech výměníků vzduch/voda se získává možnost průtoku vody, která má být chlazená, všemi dostupnými výměníky volného chlazení.

Díky tomu, že u jednotek Uniflair s volným chlazením je voda do výměníků volného chlazení hnána čerpadlem a není jen přepnuta třicestným ventilem, lze využít i výměníky jednotek, které jsou v záloze, zvýšit tak dostupný chladicí výkon, a tím i rozšířit jeho využívání – s jasnými přínosy v oblasti úspor energie.

Hydraulické propojení

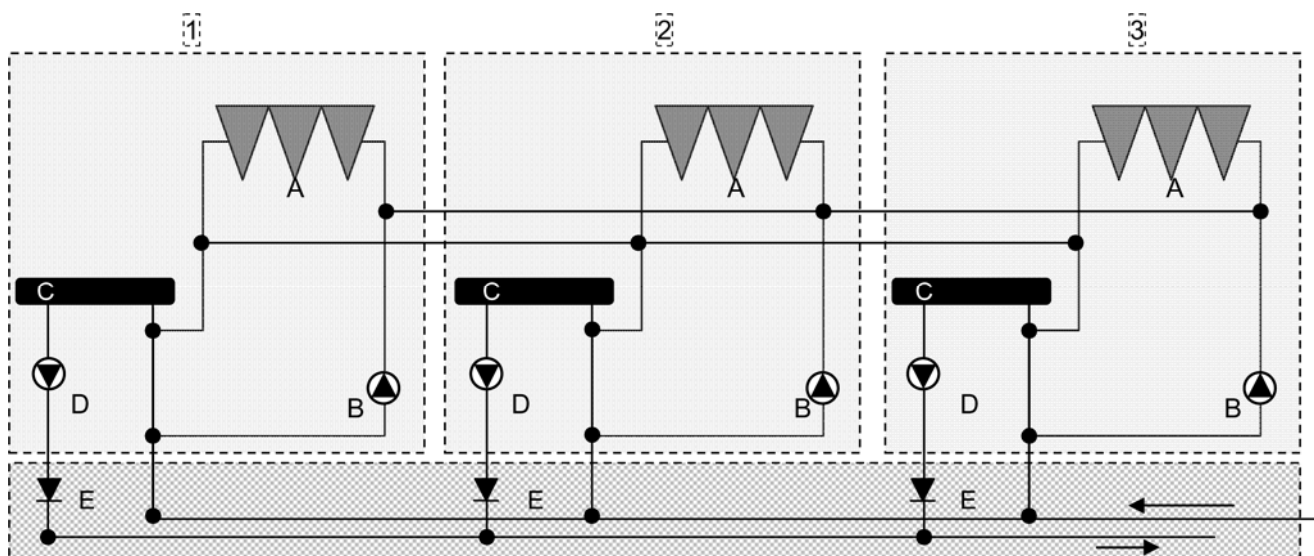
Při hydraulickém propojení tepelných výměníků vzduch/voda je nutno rozlišovat dva odlišné případy:

- Jednotky se zabudovaným čerpadlem primárního okruhu
- Instalace, které mají primární čerpadlo mimo chladicí jednotky (na straně sání nebo výstupu)

Návrh systému se v uvedených případech liší.

Jednotky se zabudovaným čerpadlem

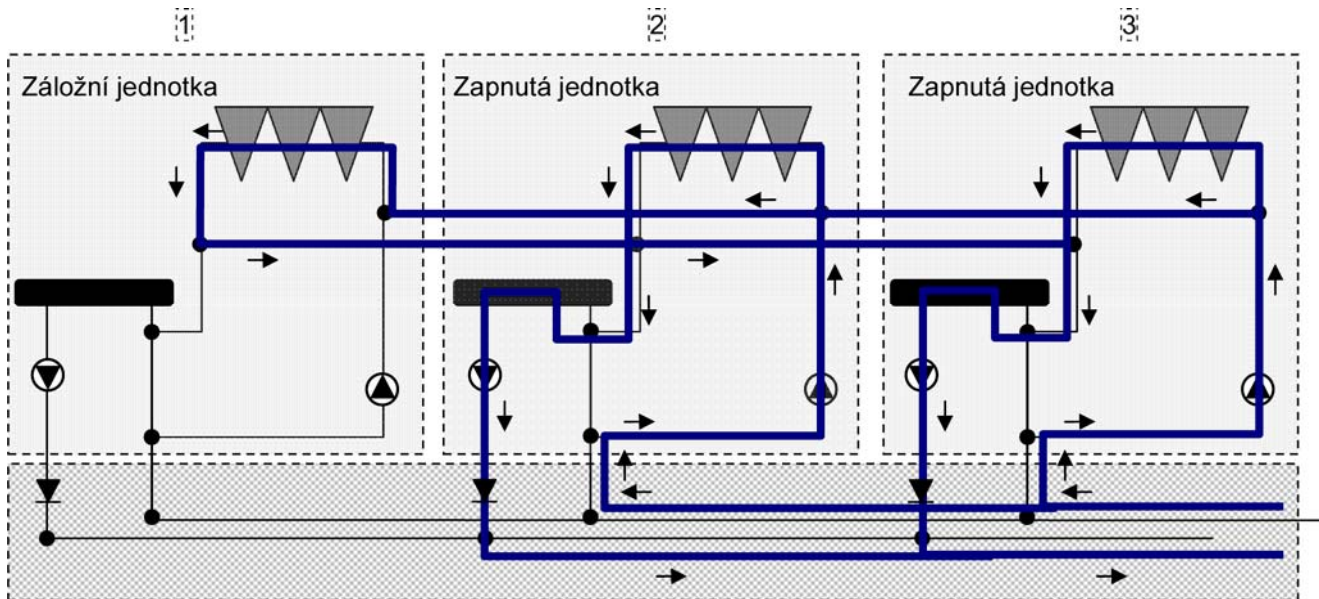
Pokud je chladicí jednotce zabudováno čerpadlo primárního okruhu, je celkové schéma řešení jako na obrázku.



A	Výměník volného chlazení	D	Hlavní čerpadlo
B	Čerpadlo volného chlazení	E	Zpětný ventil
C	Výparník		
	Dodává Uniflair		Nedodává Uniflair

Z analýzy například níže uvedené situace, kdy je jednotka 1 v záloze, jednotky 2 a 3 jsou zapnuté a všechny tři jednotky jsou propojeny do systému *inteligentního volného chlazení*, přičemž venkovní teplota je dostatečně nízká na to, aby se volné chlazení aktivovalo, vyplývá, že řídicí jednotka aktivuje ventilátory záložní jednotky (1) a čerpadlo volného chlazení (B) jednotek 2 a 3; tak je voda ze systému, která má být chlazená, proháněna všemi dostupnými výměníky volného chlazení.

Ve skutečnosti voda díky tomu, že je připojena i záložní jednotka, prochází ze systému i jejími tepelnými výměníky vzduch/voda (viz následující schéma).

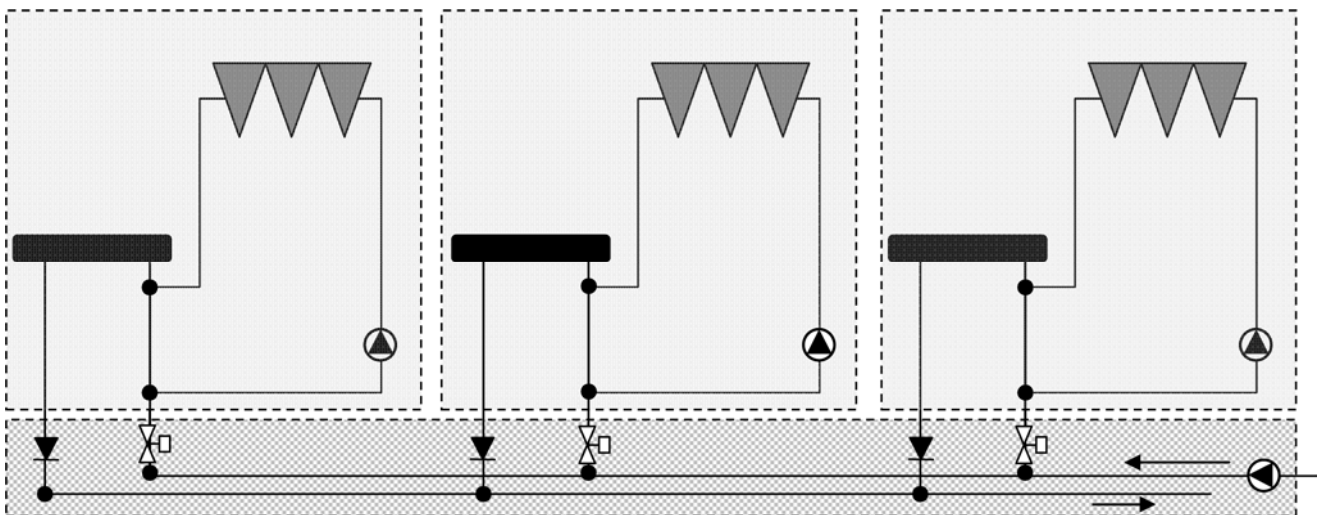


Tlakový rozdíl, který nastává v důsledku toho, že čerpadlo zabudované v záložní jednotce (1) je vypnuto, brání tomu, aby voda výparník této jednotky obtékala.

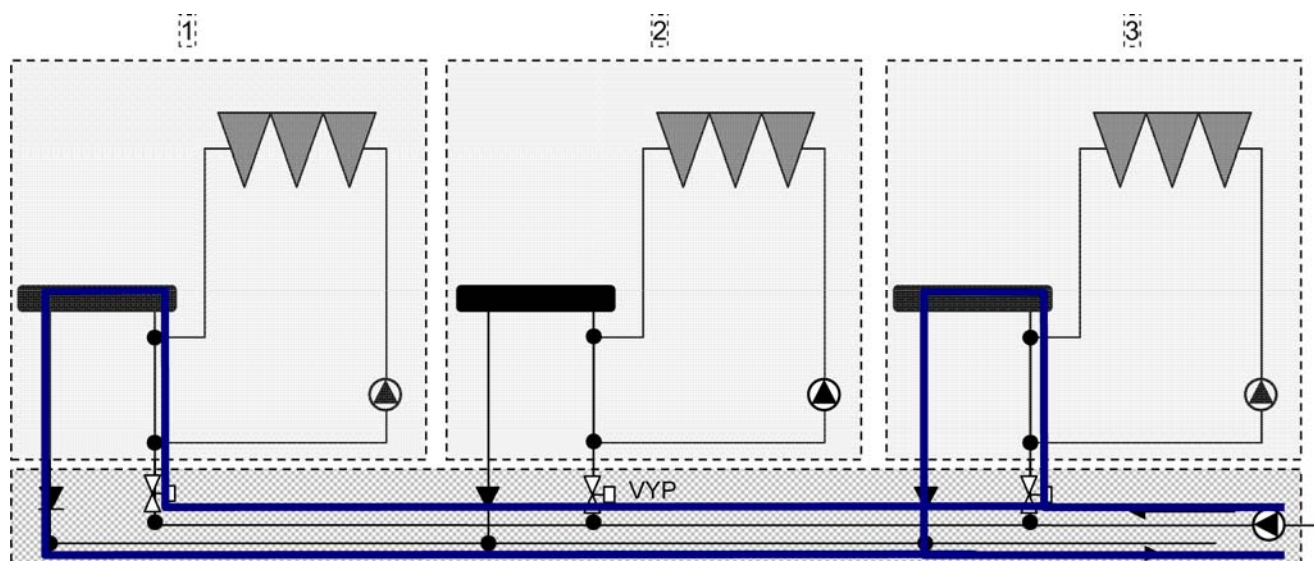
Instalace, které mají primární čerpadlo mimo chladicí jednotky

Pokud čerpadlo není v chladicí jednotce, ale je umístěno před nebo za chladicími jednotkami, je nutno instalovat zařízení, která záložní jednotku oddělí od okruhu.

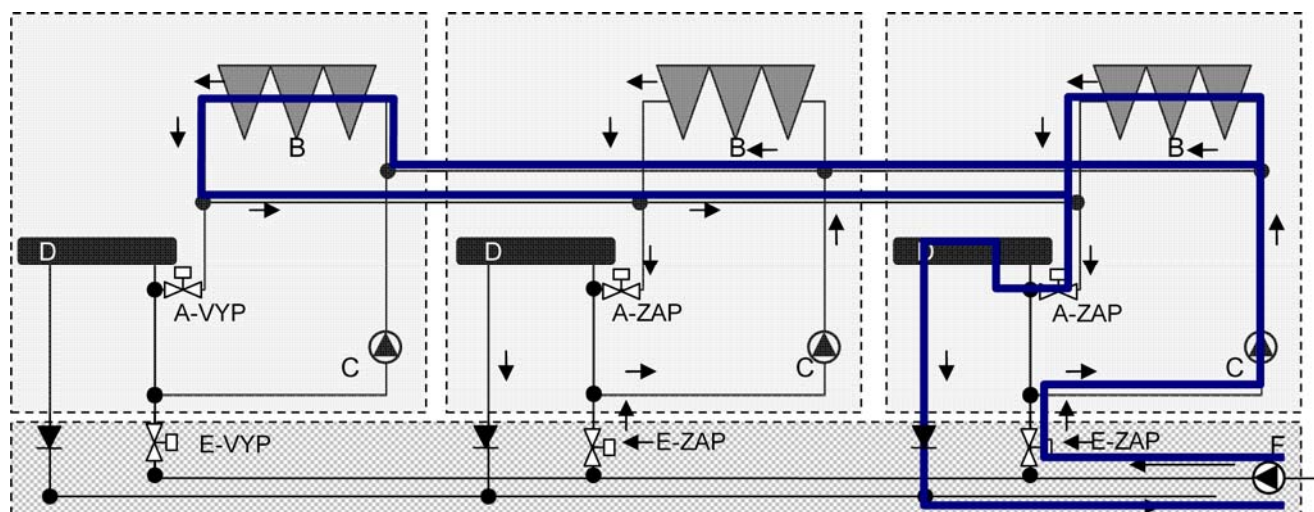
K tomuto účelu se obvykle využívá motoricky ovládaný ventil na vstupu a zpětný ventil na výstupu (viz následující schéma).



Za chodu systému je záložní jednotka oddělena motoricky ovládaným ventilem na vstupu a zpětným ventilem na výstupu. Následující obrázek zachycuje situaci za chodu jednotek 1 a 3 s tím, že jednotka 2 je v záloze.



Pokud uvažujeme o řešení *intelligentního volného chlazení* v instalacích tohoto typu, musí být jednotky vybaveny dalším zabudovaným motoricky ovládaným ventilem, aby voda neobtékala výparníkem záložní jednotky.



A	Motoricky ovládaný ventil	E	Motoricky ovládaný ventil
B	Výměník volného chlazení	F	Hlavní čerpadlo
C	Čerpadlo volného chlazení		Dodává Uniflair
D	Výparník		Nedodává Uniflair

Srovnávací analýza

S cílem ověřit ekonomickou výhodnost řešení *inteligentního volného chlazení* porovnáme dvě různá řešení využívající jednotky Uniflair BRAF 1306A.

Tato jednotka má následující parametry:

- Chladicí výkon: přibližně 300 kW
- Stupně výkonu: 6 (jednotka je vybavena 6-ti Scroll kompresory)
- Počet ventilátorů: 6

Vybrali jsme dva nejběžnější typy instalace a porovnáváme tedy tato řešení:

- Instalace Typ A: tři jednotky, jedna z nich záložní
 - 2 jednotky fungují samostatně
 - 2+1 jednotka v režimu *inteligentního volného chlazení*
- Instalace Typ B: dvě jednotky provozované střídavě
 - 2 jednotky fungují samostatně
 - 1+1 jednotka v režimu *inteligentního volného chlazení*

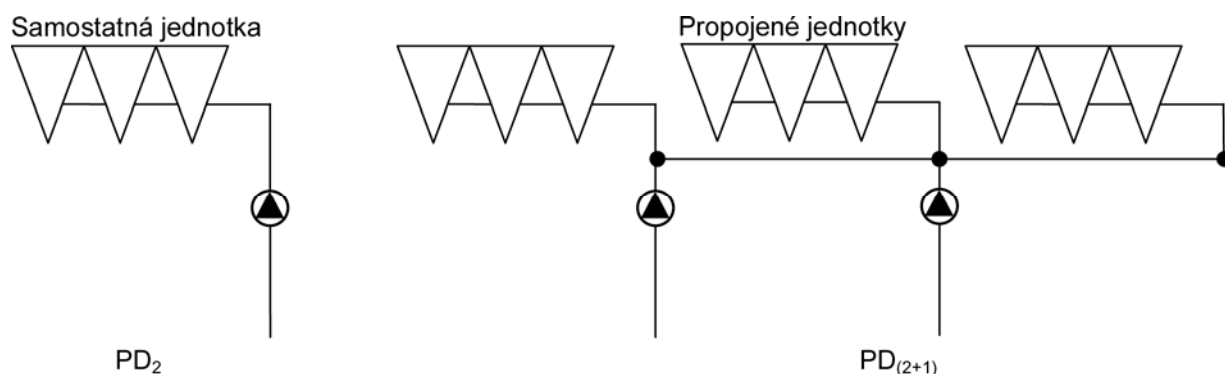
V obou typech instalace se při inteligentním volném chlazení propojením jednotek získá podstatně vyšší kapacita přenosu tepla než u nepropojených jednotek. Toto zvýšení kapacity přenosu tepla přináší ve srovnání s tradičním volným chlazením roční úsporu elektriny ve výši 3 až 7%, v závislosti na diametrickém (průměrovém) profilu. V porovnání s tradiční instalací bez volného chlazení lze ušetřit až 50% energie.

Instalace Typ A

Nyní budeme podrobně analyzovat instalaci Typ A.

Tlaková ztráta

Při srovnávání obou zmíněných situací je nutno nejprve provést analýzu zaměřenou na rozdíly v průtoku vody.



Vzhledem k tomu, že propojením výměníků volného chlazení se zvýší průřez potrubí, kterým voda protéká, na $\frac{3}{2}$ průřezu, se kterým pracuje čerpadlo samostatné jednotky, sníží se tlaková ztráta, kterou musí čerpadla pokrýt, na polovinu.

Ve skutečnosti platí:

- Tlaková ztráta je přímo úměrná mocnině rychlosti: $PD \propto V^{1,8}$ (1)
- Rychlost toku vody je nepřímo úměrná průřezu potrubí: $V \propto^{-1} \text{Průřez}$ (2)

takže platí:

$$PD \propto^{-1} (\text{Průřez})^{1,8} \quad (3)$$

$$\frac{PD_{(2+1)}}{PD_2} = \left(\frac{\text{Průřez}_2}{\text{Průřez}_{(2+1)}} \right)^{1,8} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1,8} \quad (4)$$

Průřez potrubí stoupne na $\frac{3}{2}$ původní hodnoty, a proto platí:
z čehož plyne, že se tlaková ztráta na výměnících sníží na polovinu.

$$\frac{PD_{(2+1)}}{PD_2} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1,8} = 0,48 \Rightarrow PD_{(2+1)} \cong \frac{PD_2}{2} \quad (5)$$

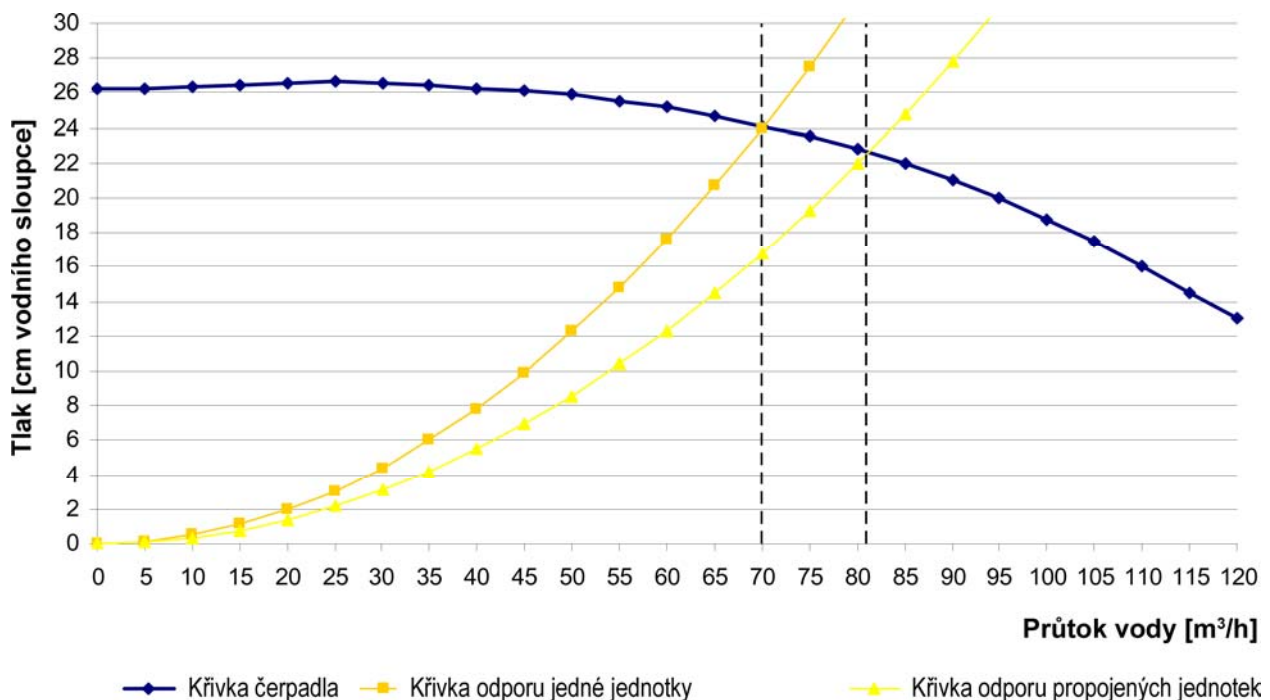
V případě propojených jednotek je ale nutno započítat i tlakovou ztrátu způsobenou propojenými kolektory. Tuto tlakovou ztrátu lze odhadnout na přibližně 20% celkové tlakové ztráty, a tak dostáváme výsledek:

$$PD_{(2+1)} \cong \frac{PD_2}{2} + 20\%(PD_2) \quad (6)$$

Nižší tlaková ztráta znamená vyšší průtok vody a nyní je tedy nutno porovnat průtok vody v obou případech.

Průtok vody

Analyzované jednotky využívají čerpadla Calpeda, model NM65/16 DE, s oběžným kolem typu D, jejichž charakteristická křivka je znázorněna v následujícím schématu:



Předpokládejme, že průtok vody při jmenovitých podmínkách je $70 \text{ m}^3/\text{h}$, a s uvažováním snížení tlakové ztráty (která se změní ze $24_{w.c.m}$ na $\frac{24}{2} + 20\%(24) = 16,8_{w.c.m}$) získáme novou křivku odporu, a tím i novou hodnotu průtoku vody propojenými jednotkami, která bude přibližně $80\text{--}81 \text{ m}^3/\text{h}$.

Průtok vody každou skupinou cívek volného chlazení bude:
$$\dot{V} = \frac{81 \cdot 2}{3} = 54 \text{ m}^3 / \text{h} \quad (7)$$

Tím dojde ke snížení průtoku každou skupinou výměníků volného chlazení z hodnoty $70 \text{ m}^3/\text{h}$ na $54 \text{ m}^3/\text{h}$, což znamená snížení o přibližně 23%.

Kapacita výměny tepla

Nyní je nutno analyzovat, jak změna průtoku vody ovlivní kapacitu výměny tepla na výměnících volného chlazení.

Vycházíme z toho, že kapacita výměny tepla na výměnících volného chlazení je: $C = K \cdot S$ (8),

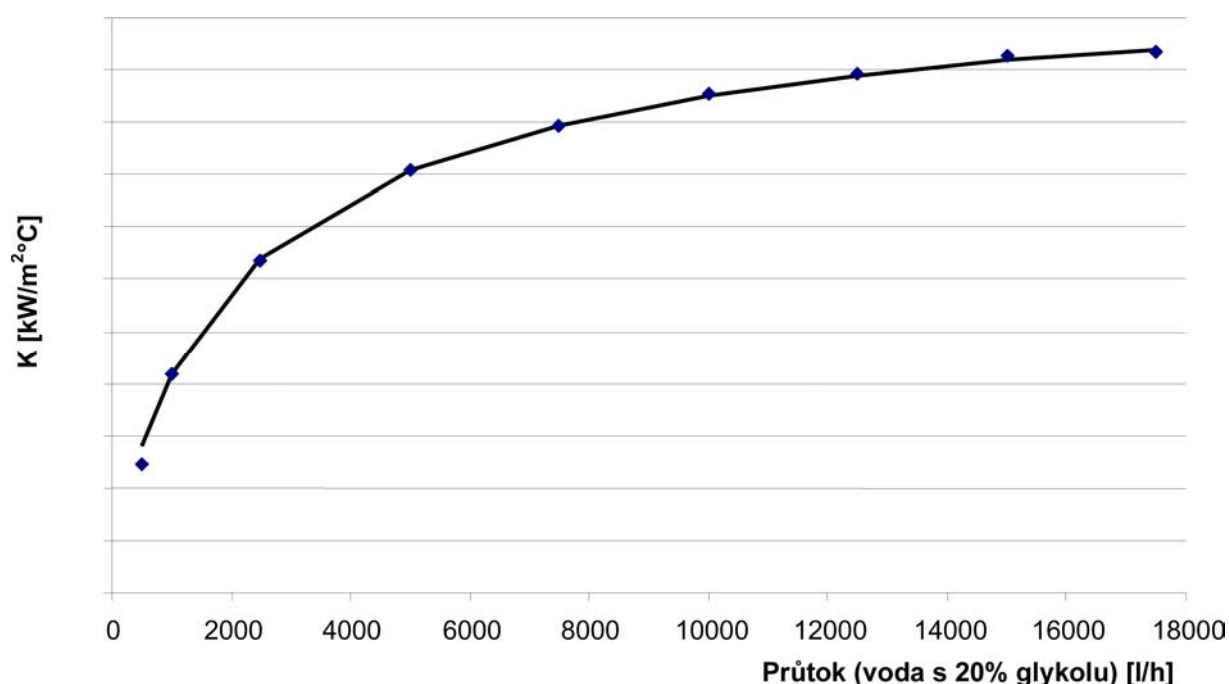
kde S je plocha a K je koeficient přestupu tepla, který závisí na fyzických rozměrech a konstrukci výměníku, a dá se

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (9)$$

vyjádřit vzorcem:

kde α_i je koeficient vnitřního přestupu tepla a α_e je koeficient vnějšího přestupu tepla.

Tepelné výměníky vzduch/voda jednotek BRAF se vyznačují závislostí koeficientu přestupu tepla (K) na průtoku vody podle následujícího grafu (platí při jmenovitém průtoku vzduchu a ventilátorech běžících na maximum):



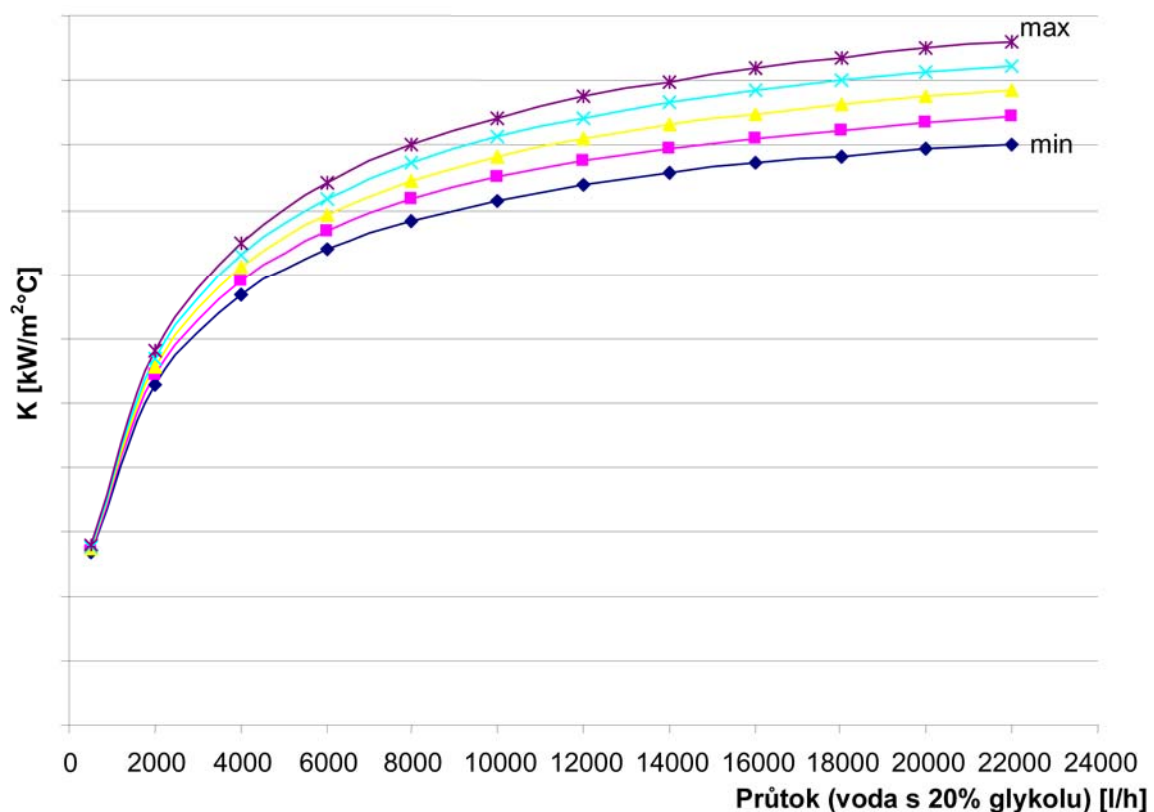
Interpolací hodnot bodů lze získat analytický vzorec pro závislost faktoru K na průtoku vody:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\chi_w \cdot \left(\frac{\dot{V}_w}{N}\right)^{0,8}} + \kappa} \quad (10)$$

Opakováním tohoto postupu pro různé hodnoty průtoku vody lze získat celkový vzorec pro závislost hodnoty faktoru K na průtoku vody a vzduchu, který má tvar:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\chi_w \cdot \left(\frac{\dot{V}_w}{N}\right)^{0,8}} + \frac{1}{\chi_a \cdot \left(\frac{\dot{V}_a}{N}\right)^{0,6}}} \quad (11)$$

kde $\dot{V}_w$ je průtok vody v l/h, $\dot{V}_a$ je průtok vzduchu v m³/h a χ_w a χ_a jsou parametry výměníků vzduch/voda.



Pokud do vzorce (11) dosadíme jmenovitý průtok vzduchu a N (počet výměníků volného chlazení) je 6, dostáváme stejnou hodnotu jako podle vzorce (10).

S uvážením průtoků vody v obou případech:

- 1) samostatné jednotky, průtok vody = 70 000 l/h
- 2) propojené jednotky, průtok vody = 70 000 l/h -23% => 53 900 l/h

získáváme hodnotu koeficientu přestupu tepla ve dvou uvedených případech, kterou můžeme srovnat s (12) a vypočítat, k jakému zvýšení chladicího výkonu dojde:

$$\frac{C_{(2+1)}}{C_2} = \frac{K_{(2+1)} \cdot S_{(2+1)}}{K_2 \cdot S_2} = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{\chi_w \cdot \left(\frac{70000}{6} \right)^{0,8} + \kappa} \cdot \frac{3}{2} \cdot S_2} \right)}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\chi_w \cdot \left(\frac{53900}{6} \right)^{0,8} + \kappa} \cdot S_2} \right)} = 1,43 \quad (12)$$

z čehož plyne: $C_{(2+1)} = 1,43 \cdot C_2$ (13)

Platí tedy, že propojením výměníku jednotek volného chlazení lze dosáhnout teoretického zvýšení chladicího výkonu až o 40%.

Přestup tepla

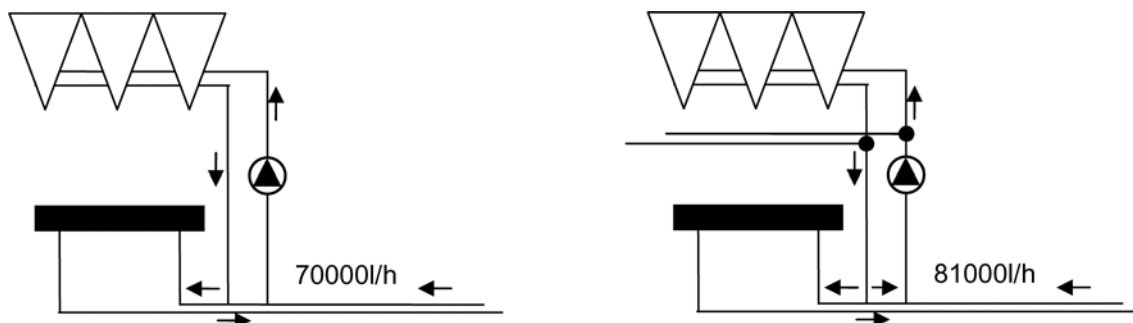
Nyní se zaměříme na velikost přestupu tepla zajištěného výměníky volného chlazení. Platí:

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_{\text{voda / vzduch}} \quad (13)$$

Jak je vidět, přestup tepla závisí nejen na hodnotě $K \cdot S$, ale i na rozdílu mezi teplotou vody na vstupu a teplotou okolního vzduchu.

Vzhledem k tomu, že je systém dimenzován na průtok vody za jmenovitých podmínek, v případě zvýšení průtoku dochází k obtoku.

Na základě údaje jmenovitého průtoku 70 000 l/h a toho, že právě na tento průtok je systém dimenzován, platí, že při zvýšení průtoku nad tuto hodnotu bude část vody recirkulována (viz následující schéma).



Při předpokládané venkovní teplotě 5 °C (teplota pro úplné volné chlazení) a teplotě vody 15 °C ($\Delta T = 5$ °C s nastavovacím bodem 10 °C) lze teplotu před čerpadlem volného chlazení vypočítat poměrem:

$$T_{in} = \frac{10^{\circ}\text{C} \cdot 11\text{l/h} + 15^{\circ}\text{C} \cdot 70\text{l/h}}{81\text{l/h}} = 14,3^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

Poměr přenosu tepla v obou uvažovaných případech je tedy:

$$\frac{Q_{(2+1)}}{Q_2} = \frac{(K_{(2+1)} \cdot S_{(2+1)}) \cdot (\Delta T_{\text{voda/vzduch}})_{(2+1)}}{(K_2 \cdot S_2) \cdot (\Delta T_{\text{voda/vzduch}})_2} = 1,43 \cdot 0,93 = 1,33 \longrightarrow Q_{(2+1)} = 1,33 \cdot Q_2 \quad (15)$$

Propojením výměníků volného chlazení lze přestup tepla zvýšit o 33%.

Energetická účinnost

Při porovnání příkonu obou soustav v režimu volného chlazení je nejprve nutno analýzu rozdělit na dva režimy provozu: úplné volné chlazení a smíšené volné chlazení.

K tomu potřebujeme hypotetický chladicí výkon, který systém zajišťuje; ten lze rozumně určit jako chladicí výkon dvou jednotek při těchto podmínkách:

- venkovní teplota: 5 °C
- teplota vody na vstupu: 15 °C

a výsledek je tedy $2 \times 284 \text{ kW} = 568 \text{ kW}$.

Pokud použijeme referenční hodnotu 568 kW, můžeme určit, při jakých venkovních teplotách dokáží jednotky tento chladicí výkon zajistit jen pomocí výměníků volného chlazení, a kdy bude nutno částečně zapnout chladicí okruh.

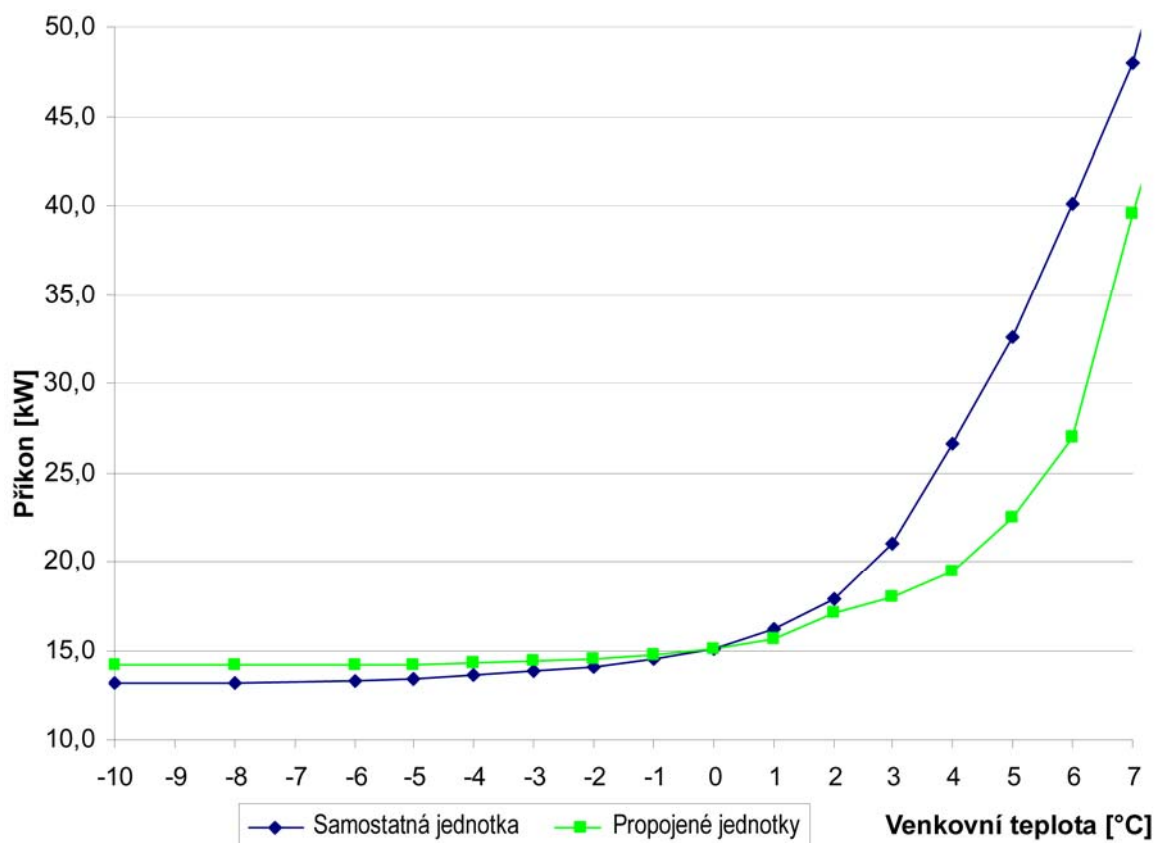
Z tohoto porovnání vyplyne, že při použití dvou samostatných jednotek bude samozřejmě možno využít úplné volné chlazení při teplotě $T_{\text{ext}} \leq 5$ °C, zatímco při použití tří propojených jednotek to platí při $T_{\text{ext}} \leq 7$ °C.

Ve skutečnosti, jak vyplývá ze vzorce (13), je chladicí výkon propojených jednotek s *inteligentním volným chlazením* o 33% vyšší.

Vnější teplota [°C]	Chladicí výkon propojených jednotek [kW]
7	574
6	564
5	572

Při venkovní teplotě do 5 °C v případě samostatných jednotek a do 7 °C v případě propojených jednotek dokáží výměníky volného chlazení odvést celou tepelnou zátěž (kterou předpokládáme konstantní) a teplota vody v okruhu je řízena regulací otáček ventilátorů. Při porovnání spotřeby elektřiny jednotlivými řešeními je proto nutné posoudit:

- otáčky a tedy i příkon ventilátorů
- příkon čerpadla volného chlazení, s uvažováním rozdílných průtoků, a tím i rozdílného příkonu ve dvou uvedených řešeních.



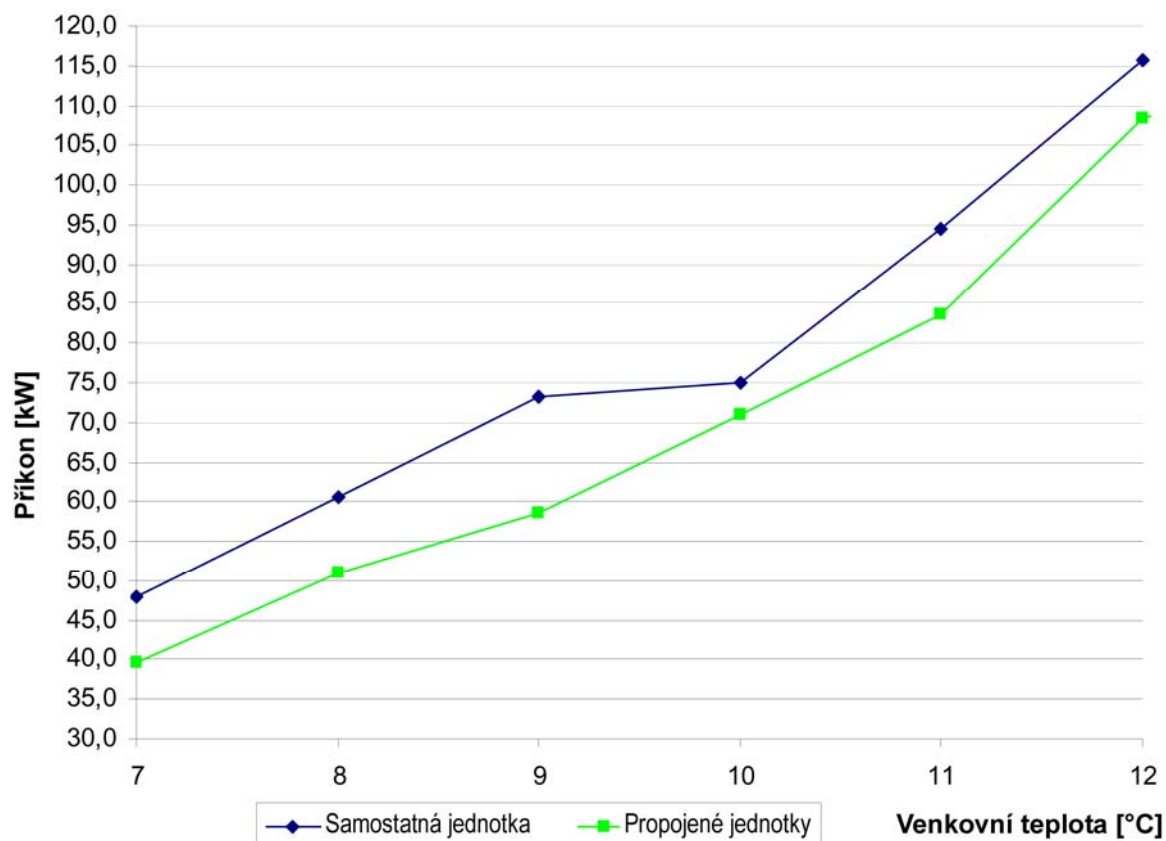
Z výše uvedeného grafu vyplývá, že propojené jednotky s *inteligentním volným chlazením* mají při venkovní teplotě nad 0 °C nižší příkon než samostatná jednotka, a to ze dvou důvodů:

- 1) v rozmezí venkovních teplot 7 až 5 °C není nutno zapínat kompresory
- 2) při venkovní teplotě do 5 °C lze snížit otáčky ventilátorů (oproti samostatné jednotce).

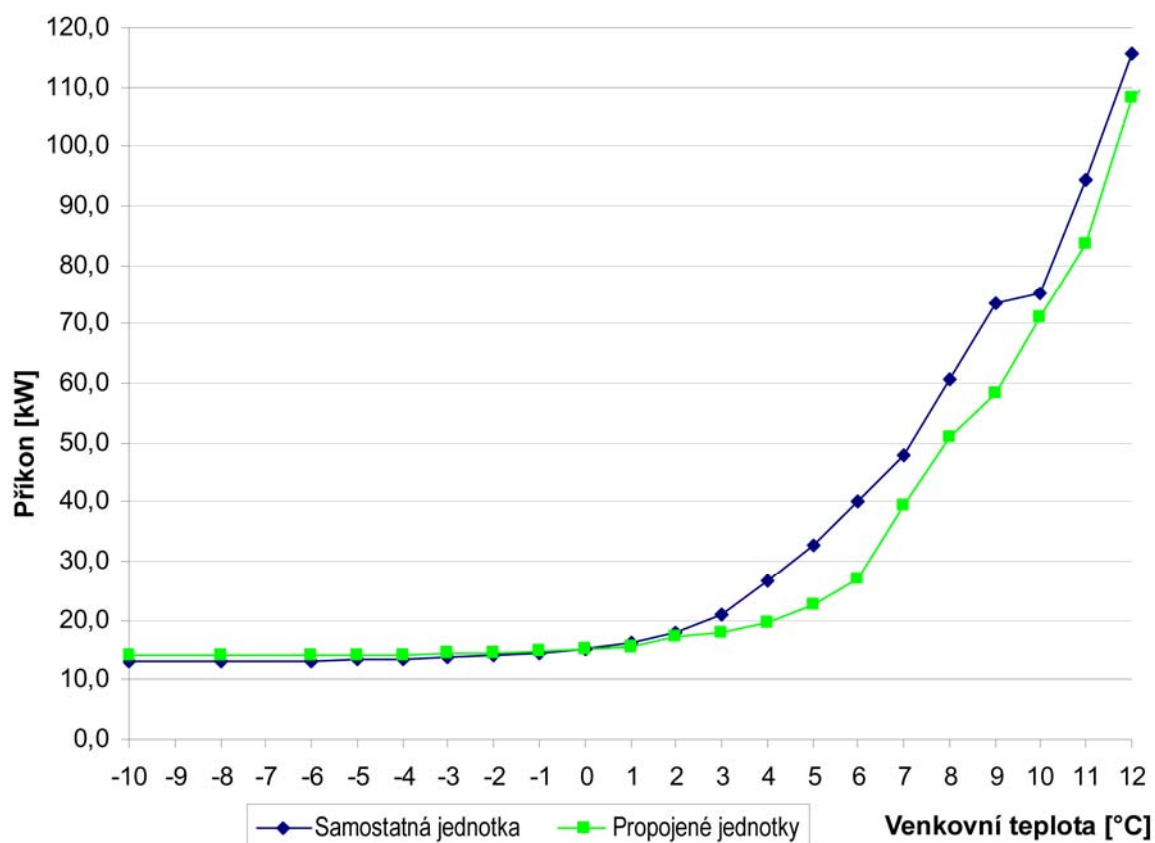
Vnější teplota [°C]	Otáčky ventilátoru samostatných jednotek [ot./min]	Otáčky ventilátoru propojených jednotek [ot./min]
5	880	580
4	780	500
3	652	450
2	554	415
1	479	333
0	418	290

Při venkovní teplotě pod 0 °C mají obě řešení velmi podobný příkon, protože otáčky ventilátoru – a tím i jejich příkon – jsou díky přirozené konvenci na výměnících volného chlazení minimální a jediné zvýšení příkonu nastává na čerpadle volného chlazení, které musí prohánět vodu propojenými jednotkami (7 kW místo 6,5 kW).

Při venkovních teplotách nad 5 °C u samostatných jednotek a nad 7°C u propojených jednotek nestačí výměník(y) volného chlazení pokrýt celou tepelnou zátěž (kterou předpokládáme konstantní), a proto je nutno využít část výkonu kompresorů. I v tomto případě je však výhodou, že díky zvýšení výkonu pomocí volného chlazení, může příkon kompresorů být menší.

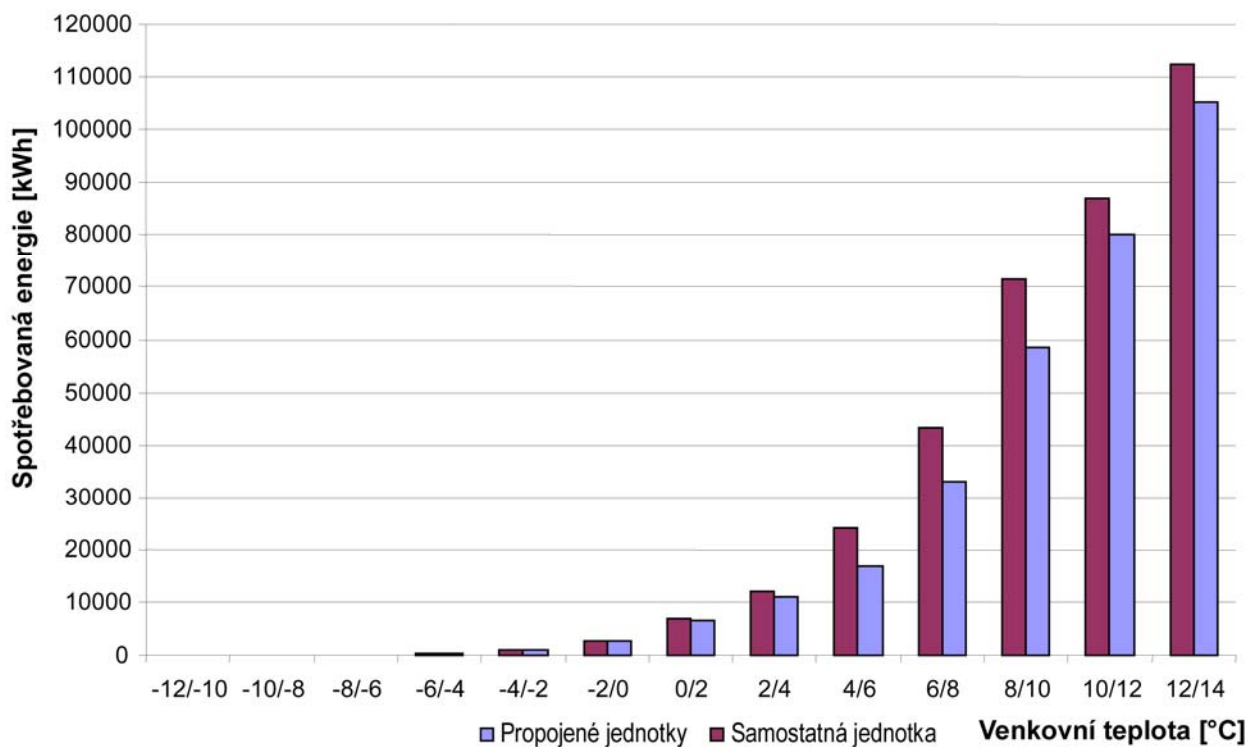
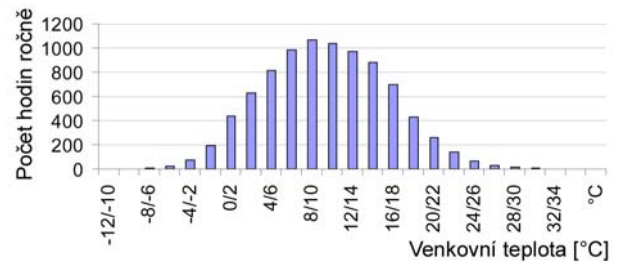


Porovnáním celkového příkonu obou řešení získáme tyto výsledky:



Rozdílný elektrický příkon znamená zásadní úsporu energie, zejména s ohledem na to, že už instalace jednotky s volným chlazením přináší velkou úsporu energie.

Příklad klimatického profilu města jako je Londýn ukazuje, že jednotka s inteligentním volným chlazením spotřebuje o 6% méně energie než běžná jednotka s volným chlazením (bez propojení výměníků volného chlazení).



Při zvážení rozdílů mezi grafy spotřeby si jistě všimnete roční úspory energie 46 000 kWh, což znamená roční úsporu přibližně 5000 €.¹

¹ Při ceně elektřiny 0,11 €/kWh

Podobně lze uvést i úspory v jiných evropských městech:

	Úspora energie [kWh]	Finanční úspora [€]
Frankfurt	34560	5%
Řím	31587	3%
Milán	29132	4%
Manchester	46008	6%
Paříž	36954	4%
Amsterdam	42558	7%
Stockholm	28167	5%
Madrid	36743	4%
Berlín	31525	4%
Londýn	46018	6%
Kodaň	38077	6%

Nyní porovnáme situaci u jednotek bez volného chlazení s následujícími ročními odběry energie. Tato analýza vychází z následujících předpokladů:

- Požadovaný chladicí výkon: 568 kW
- Teplota vody při venkovní teplotě do 15 °C: 15 °C
- Teplota výstupní vody při venkovní teplotě nad 15 °C: 7 °C

	Roční spotřeba [kWh]		
	Standardní chlazení	Volné chlazení	Inteligentní volné chlazení
Frankfurt	1107649	747348	712787
Řím	1245725	1056871	1025284
Milán	1144202	815694	786562
Manchester	1116617	789462	743454
Paříž	1178335	910926	873972
Amsterdam	1062038	651673	609116
Stockholm	1001220	541769	513602
Madrid	1204029	938919	902177
Berlín	1088080	707609	676084
Londýn	1103611	754980	708961
Kodaň	1061950	638006	599928

	Úspora energie			
	Standardní chlazení v porovnání s volným chlazením		Volné chlazení v porovnání s inteligentním volným chlazením	
	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Frankfurt	360302	33%	34560	5%
Řím	188854	15%	31587	3%
Milán	328508	29%	29132	4%
Manchester	327155	29%	46008	6%
Paříž	267409	23%	36954	4%
Amsterdam	410364	39%	42558	7%
Stockholm	459451	46%	28167	5%
Madrid	265110	22%	36743	4%
Berlín	380471	35%	31525	4%
Londýn	348631	32%	46018	6%
Kodaň	423944	40%	38077	6%

Na závěr uvádíme porovnání standardního chlazení s *inteligentním volným chlazením*:

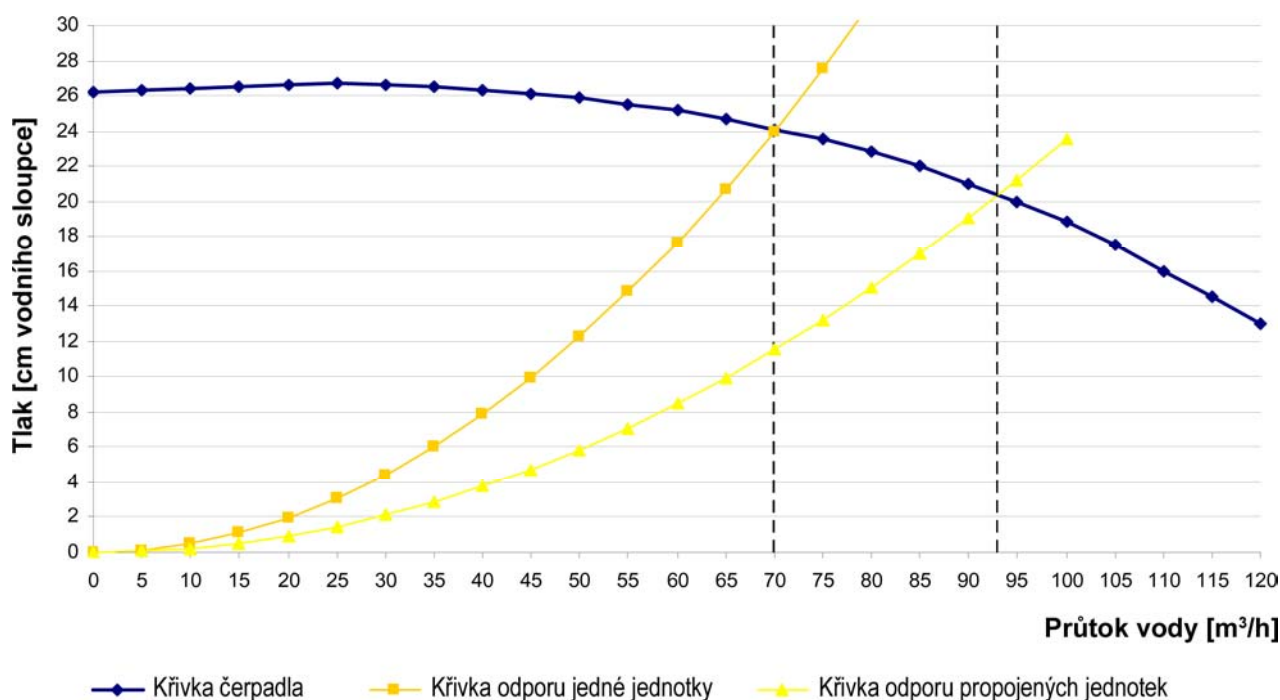
	Úspora energie	
	Standardní chlazení v porovnání s <i>inteligentním volným chlazením</i>	
	[kWh]	[%]
Frankfurt	394862	36%
Řím	220441	18%
Milán	357640	31%
Manchester	373163	33%
Paříž	304363	26%
Amsterdam	452922	43%
Stockholm	487618	49%
Madrid	301852	25%
Berlín	411996	38%
Londýn	394650	36%
Kodaň	462022	44%

Instalace Typ B

Nyní budeme podrobně analyzovat instalaci Typ B, za předpokladu propojení jednotek s volným chlazením, průřezů pro průtok vody a stejným postupem zdůvodnění jako v předchozí sekci. Snížení tlakové ztráty na jednotlivých čerpadlech:

$$\frac{PD_{(l+1)}}{PD_1} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1,8} = 0,28 \Rightarrow PD_{(l+1)} = 0,28 \cdot PD_1$$

Průtok vody se změní ze jmenovité hodnoty 70 m³/h na 93 m³/h a tím pro každou skupinu výměníků volného chlazení platí hodnota 46,5 m³/h.



Z toho vyplývá, že v každé skupině výměníků volného chlazení lze dosáhnout snížení průtoku vody o přibližně 32%. Při analýze, jak se změní **kapacita přestupu tepla**, je nutno vypočítat koeficient přestupu tepla (K), z něhož lze získat následující vzorec pro kapacitu přestupu tepla v obou uvažovaných případech:

$$\frac{C_{(1+1)}}{C_1} = \frac{K_{(1+1)} \cdot S_{(1+1)}}{K_1 \cdot S_1} = 1,82 \Rightarrow C_{(1+1)} = 1,82 \cdot C_1$$

Vidíme, že při propojení výměníků volného chlazení se kapacita přestupu tepla může teoreticky zvýšit na 80%.

Přitom však značně zvýšený průtok vody při propojení jednotek negativně ovlivňuje výpočet přestupu tepla na výměnících volného chlazení.

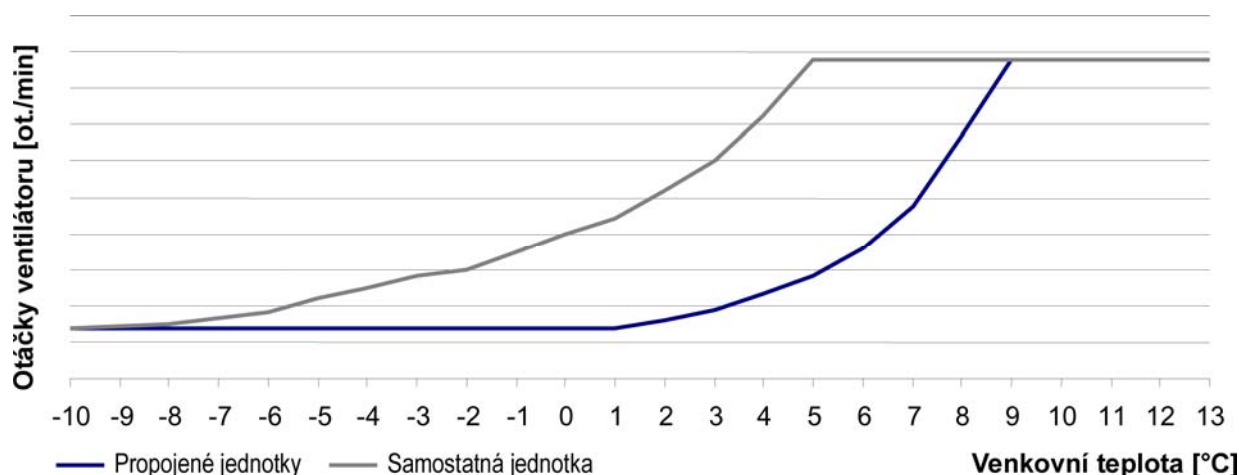
Ve skutečnosti tím, že závisí na $\Delta T_{\text{voda/vzduch}}$ (viz vzorec 13), a to závisí na poměru obtoku, k němuž dochází, dostáváme:

$$\frac{Q_{(1+1)}}{Q_1} = \frac{(K_{(1+1)} \cdot S_{(1+1)})}{(K_1 \cdot S_1)} \cdot \frac{(\Delta T_{\text{voda/vzduch}})_{(1+1)}}{(\Delta T_{\text{voda/vzduch}})_1} = 1,82 \cdot 0,87 = 1,59$$

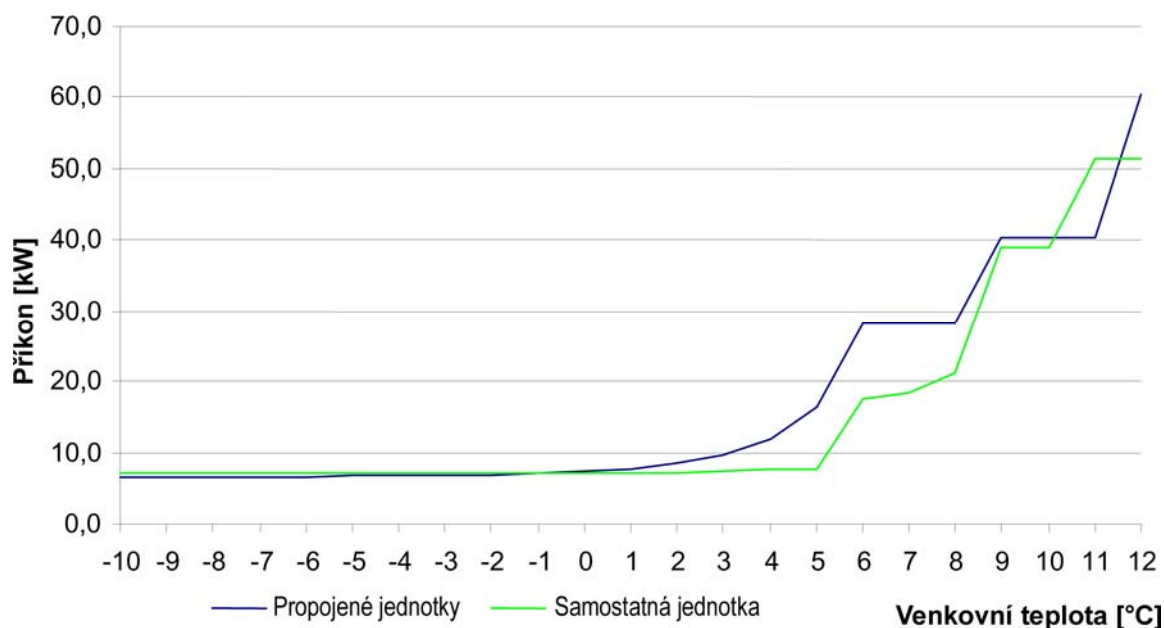
takže teplota na vstupu čerpadla volného chlazení i s uvažováním obtoku je 13,7 °C.

Propojením výměníků volného chlazení se tedy kapacita přestupu tepla může teoreticky zvýšit jen na 59%.

Při porovnávání úspor energie si podobně jako při porovnávání řešení „2+1“ a „2“ všimneme, že se teplota, při níž volné chlazení zvládne odvést celou tepelnou zátěž, zvyšuje z hodnoty 5 °C u samostatné jednotky na 7 °C u propojených jednotek. Tento fakt jasně potvrdí pohled na křivku otáček ventilátorů; všimněte si, že v případě propojených jednotek začíná křivka klesat od 7 °C, což svědčí o tom, že výměníky volného chlazení zvládnou odvést celou tepelnou zátěž.



Nyní vytvoříme srovnávací graf příkonu:



Vyjdeme-li ze stejných předpokladů jako při porovnání řešení „2+1“ a „2“ (požadovaný chladicí výkon 284 kW, výstupní teplota vody při venkovní teplotě do 15 °C: 15 °C, výstupní teplota vody při venkovní teplotě nad 15 °C: 7 °C) lze vypočítat rozdíl spotřeby energie tradičního chlazení, volného chlazení a *inteligentního volného chlazení* s propojením dvou jednotek.

	Úspora energie			
	Standardní chlazení v porovnání s volným chlazením		Volné chlazení v porovnání s <i>inteligentním volným chlazením</i>	
	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Frankfurt	175421	32%	195328	35%
Řím	90465	15%	104848	17%
Milán	160446	28%	177402	31%
Manchester	157273	28%	181077	32%
Paříž	128542	22%	147887	25%
Amsterdam	199144	38%	223603	42%
Stockholm	226156	45%	242246	48%
Madrid	127316	21%	147503	25%
Berlín	185984	34%	204495	38%
Londýn	167598	30%	192457	35%
Kodaň	207042	39%	230254	43%

Dosahuje se úspory energie srovnatelné s instalací tří jednotek, z nichž jedna je v záložním režimu. Důvodem této podobné úspory je rovnováha mezi zvýšením kapacity přestupu tepla (+59% u instalace 1+1 ve srovnání s +33% u instalace 2+1) a zvýšením spotřeby elektřiny u ventilátorů (dvojnásobek u instalace 1+1 a $\frac{3}{2}$ u instalace 2+1).

Závěry

Evropské klimatické profily se soustřeďují ve dvou teplotních rozsazích, kolem 8-12 °C a přibližně 18-22 °C.

Pokud má být zařízení celoročně efektivní, musí vykazovat lepší vlastnosti v těchto dvou rozmezích teplot; právě proto obecně platí, že volné chlazení je důležitým příspěvkem k maximalizaci úspor energie při smíšeném provozu; za teplot 0-5 °C lze také dosáhnout významných úspor energie, ale tento režim se během roku využije jen minimálně.

Podle této logiky mohou být instalace s *inteligentním volným chlazením* řešením, které dále snižuje celkovou spotřebu elektrické energie díky využívání zdrojů, které jsou již k dispozici v zájmu zvýšení spolehlivosti systému; nevznikají tak vícenáklady a náklady na instalaci se mohou vrátit² již za méně než pět měsíců v případě jednotek se zabudovaným čerpadlem a devět měsíců v případě okruhů s vnějším hlavním čerpadlem.

² Výchozí předpoklady: Milán, cena elektřiny 0,11 €/kWh