

**KEE/VEN**

**Vybrané partie**

# 1 Vodní elektrárny

**Klíčová slova:** vodní elektrárna, vodní kolo, vodní turbína, Francis, Kaplan, Pelton, sací roura, kavitace, potenciální energie vodního proudu, čára překročení průměrných denních průtoků

## 1.1 Vodní elektrárny

**Vodní elektrárna** je typem elektrárny využívající energie vody k výrobě elektřiny. Využívána může být energie vodního toku nebo energie moře. Využívání energie moře vyžaduje speciální zařízení. Zatím je tato problematika spíše předmětem výzkumu a ne praktických aplikací.



Obr. 1.1.: Vodní elektrárna Slapy

Vodní elektrárny vybudované na vodních tocích mohou být kategorizovány podle různých hledisek (provozního režimu, spádu, výkonu, vzdouvacího zařízení, atd.). Vodní elektrárny mají vysokou míru ovladatelnosti což znamená, že mohou být spuštěny velmi rychle (řádově během několika sekund). To činí tyto elektrárny velmi účinnými pro pokrytí špiček v spotřebě elektřiny.

### 1.1.1 Provozní režim vodní elektrárny

**Konvenční vodní elektrárna** využívá celkový průtok vodního toku rovnoměrně v průběhu času. **Jezová říční elektrárna** má určitý zásobník, který může využívat pro účely regulace toku. **Nejezová elektrárna** žádný zásobník nemá a nelze ji využívat pro účely regulace toku. Instalovaný výkon odpovídá energetickému potenciálu dané lokality.

**Akumulační vodní elektrárna** využívá nějaký zásobník pro akumulaci vody během periody mimo špičku spotřeby elektřiny. Během špičky spotřeby elektřiny je akumulovaná voda využívána k výrobě elektřiny. Instalovaný výkon je vyšší než energetický potenciál v lokalitě.

**Přečerpávací vodní elektrárna** nevyrábí elektřinu ale je používána k akumulaci energie. Elektrárna má obvykle dva zásobníky (nádrže) různě vysoko položené. Během periody mimo špičku je voda čerpána s nižší nádrže do horní nádrže. Elektrárna je provozována jako čerpadlo a spotřebovává nadbytečnou elektřinu ze sítě. Během špičky je přečerpaná voda pouštěna z horní nádrže do dolní a využívá se k výrobě elektřiny. Elektrárna tak pracuje jako elektrárna.

### 1.1.2 Spád vodní elektrárny

- **nízkotlaká vodní elektrárna:** spád je menší než 20 m
- **středotlaká vodní elektrárna:** spád je mezi 20 a 100 m
- **vysokotlaká vodní elektrárna:** spád je vyšší než 100 m

### 1.1.3 Instalovaný výkon vodní elektrárny

- **malá vodní elektrárna:** instalovaný výkon je do 10 MW
- **střední vodní elektrárna:** instalovaný výkon je mezi 10 a 200 MW
- **velká vodní elektrárna:** instalovaný výkon je nad 200 MW

#### 1.1.4 Vzdouvací zařízení vodní elektrárny

Velké elektrárny používají přehradu ke vzdutí jezera. **Gravitační přehrada** je vybudována jako kamenná sypaná hráz což jí činí z hlediska cenové velmi přijatelnou. **Betonová přehrada** je více kompaktní ale vyžaduje dostatečné zakotvení pod vodou.



Obr. 1.2.: Gravitační přehrada (Lake Argyle, Western Australia)



Obr. 1.3.: Betonová přehrada (Glen Canyon, Arizona)

Malé elektrárny využívají ke zvýšení spádu jez a nevzdouvají jezero.

Další cestou k získání dostatečného spádu je užití **derivačního kanálu**. Žádná nádrž není zřizována a voda je odkloněna z vyšší lokality umělým kanálem s malým sklonem do lokality elektrárny.

## 1.2 Vodní motory

Zahrnují jednak zajímavé **pístové motory** a dále pak **hydraulické rotační motory** kam patří dva jejich základní typy – **vodní kola** a **vodní turbíny**.

### 1.2.1 Vodní kola

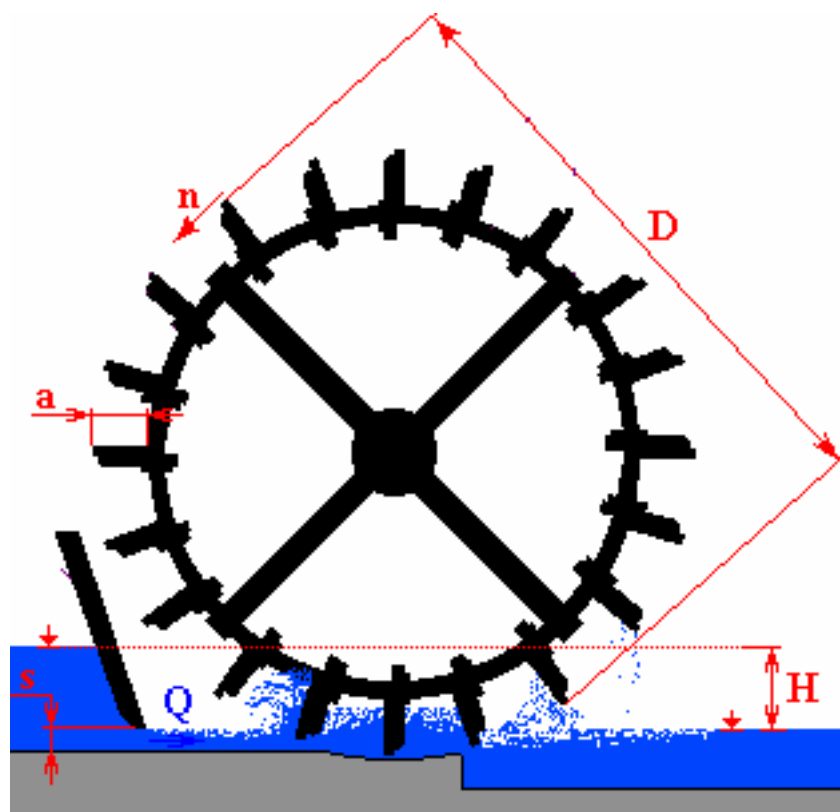
**Vodní kola** jsou často nespravedlivě opomíjena. Jsou historicky starší a konstrukčně většinou jednoduché rovnotlaké motory. Jejich pevná konstrukce s jednoduchým oběžným kolem není citlivá na mechanické nečistoty (klacky, listí, unášený led a pod.) ani na proměnlivou výšku vodní hladiny. Vyrovnání horní a spodní hladiny během povodní nemá téměř vliv na výkon, ačkoliv klesá účinnost. Klesající průtok během sucha je částečně kompenzován vzrůstající účinností protože nižší průtok nemá na výkon tak velký vliv jako u turbín.

Účinnost vodních kol je obvykle nižší ale může také dosáhnout 85%. Kolo je pomaluběžný stroj s vysokým momentem, který může být provozován při velmi nízkém spádu (jen několik cm). Nezakrytá kola mohou v zimě zamrznout.

**Lopátkové kolo se spodním nátokem** je velmi jednoduché kolo využívající kinetickou energii spodního proudu vody. Nátokem vody na rovné lopatky se dosahuje jen nízká účinnost (30 – 35 %), spád je využit k urychlení proudu vody. Tato konstrukce byla také využita u lopátkových parníků..

**Ponceletovo kolo** je vývojovým typem kola se spodním nátokem. Lopatky jsou zahnuté aby byl minimalizován rozstřík vody. Účinnost je 60 – 65 % a spád je využit k urychlení proudu vody.

**Korečkové kolo s horním nátokem** je velmi účinné kolo využívající kinetickou a potenciální energii horního proudu vody. Naplňované korečky v horní poloze využívají kinetickou energii vodního proudu zatím co plné korečky v čelní poloze využívají polohovou energii náplně. Účinnost je 60 – 80 % a může být zlepšena zpětným pohybem, kolo však nesmí brodit ve spodní hladině.



Obr. 1.4.: Princip vodního kola se spodním nátokem

Konstrukce vodního kola je obvykle založena na empirických vztazích. Typ kola a jeho **průměr** závisí hlavně na využívaném spádu  $h$

$$D = 3 \div 5 \cdot h \quad [\text{m}] \quad [1.1.]$$

**Otáčky závisí** na průměru  $D$  a obvodové rychlosti  $u$ .

$$n = \frac{60 \cdot u}{\pi \cdot D} \quad [1/\text{min}] \quad [1.2.]$$

**Obvodová rychlost** závisí na teoretické průtokové rychlosti  $c$  určené ze spádu  $h$ . Rychlost je omezena průtokovým koeficientem  $\mu$  (normálně 0,4).

$$u = \mu \cdot c = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad [1.3.]$$

**Šířka lopatek** závisí na průtoku  $Q$ , obvodové rychlosti  $u$ , stupni plnění  $e$  (základem je 50% a tedy 0,5) a Redtenbacherově koeficientu  $r$

$$b = \sqrt{\frac{Q \cdot r}{e \cdot u}} \quad [\text{m}] \quad [1.4.]$$

**Délka** lopatky závisí na šířce lopatky a Redtenbacherově koeficientu  $r$ .

$$a = \frac{b}{r} \quad [\text{m}] \quad [1.5.]$$

**Redtenbacherův** koeficient může být vypočítán ze spádu  $h$  a průtoku  $Q$

$$r = 1,75 \cdot \sqrt[3]{\frac{h \cdot Q \cdot \rho}{75}} \quad [-] \quad [1.6.]$$

**Rozteč** lopatek závisí na délce lopatky  $a$ .

$$t = 0,75 \cdot a + 0,1 \quad [\text{m}] \quad [1.7.]$$

**Počet** lopatek závisí na rozteči  $t$  a obvodu kola  $o$  vyjádřeném na základě jeho průměru

$$L = \frac{o}{t} = \frac{\pi \cdot D}{t} \quad [-] \quad [1.8.]$$

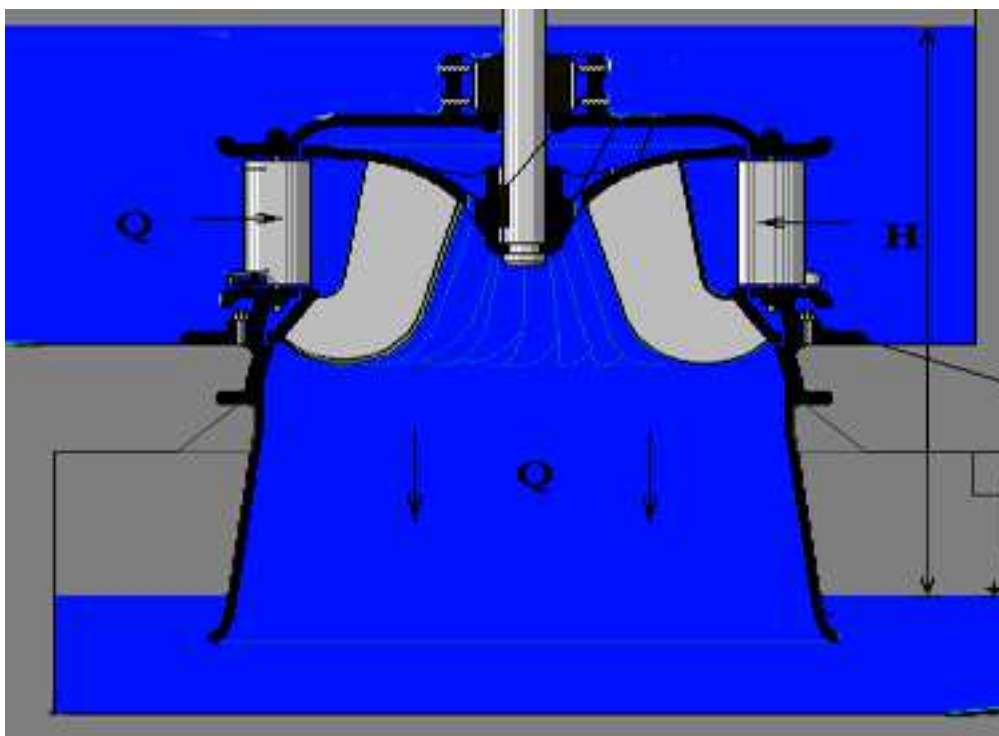
### 1.2.2 Vodní turbíny

**Vodní turbíny** jsou rychloběžné přetlakové stroje využívající dvě skupiny lopatek. Statorové lopatky pracují jako **rozváděcí**, regulující průtok vody k **oběžnému kolu**. Turbíny mají složitější konstrukci a jsou velmi citlivé na změny vodní hladiny a mechanické nečistoty ve vodě. Účinnost je obvykle mnohem větší než u vodních kol a stroje jsou prostorově úspornější. Turbíny mohou mít axiální, radiální, diagonální, tangenciální nebo odstředivý průtok vody a vertikální, horizontální nebo šikmou osu. Průtok turbínou musí být určen v **regulačním rozsahu** jako minimální a maximální hodnota  $Q_{\min}$  and  $Q_{\max}$ .

V historii bylo mnoho typů vodních turbín ale v dnešní době jsou v elektrárnách používány 3 nebo 4 typy.

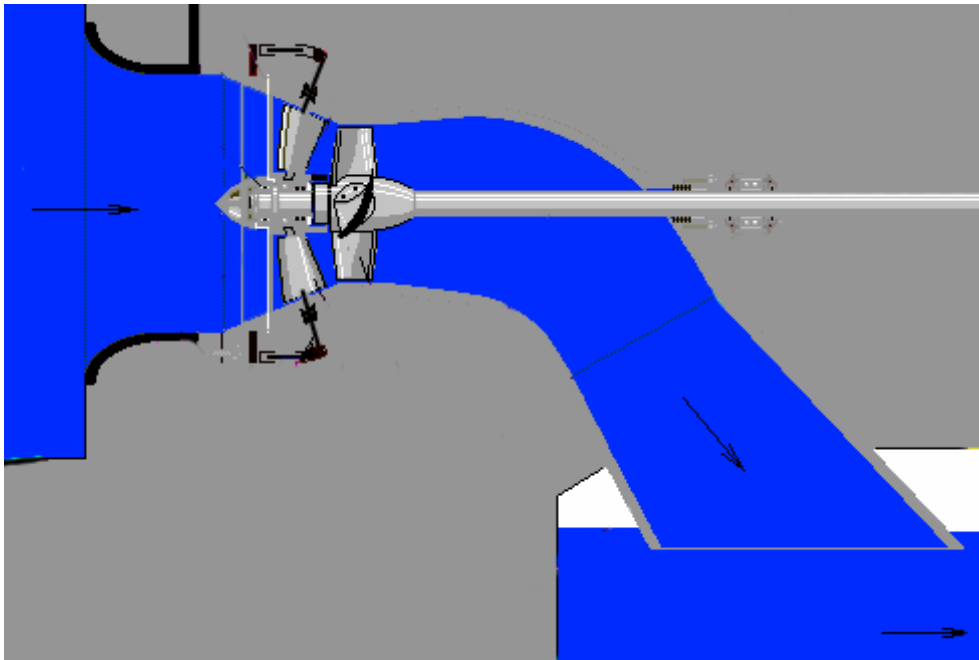


**Francisova turbína** je nejdéle využívaná turbína. Je to stroj přetlakový radi-axiálního typu a může být používána buď jako vertikální nebo horizontální. Oběžné kolo má pevné lopatky a připomíná zvon. Regulace je umožněna prostřednictvím natáčivých rozváděcích lopatek. Užívá se pro spády od metrů po stovky metrů. To činí Francisovu turbínu velice univerzálním strojem. Může pracovat v reverzním chodu jako čerpadlo, což se často užívá v přečerpávacích elektrárnách. Turbína je obvykle doplněna sací rourou (savkou) pro zvýšení účinnosti.



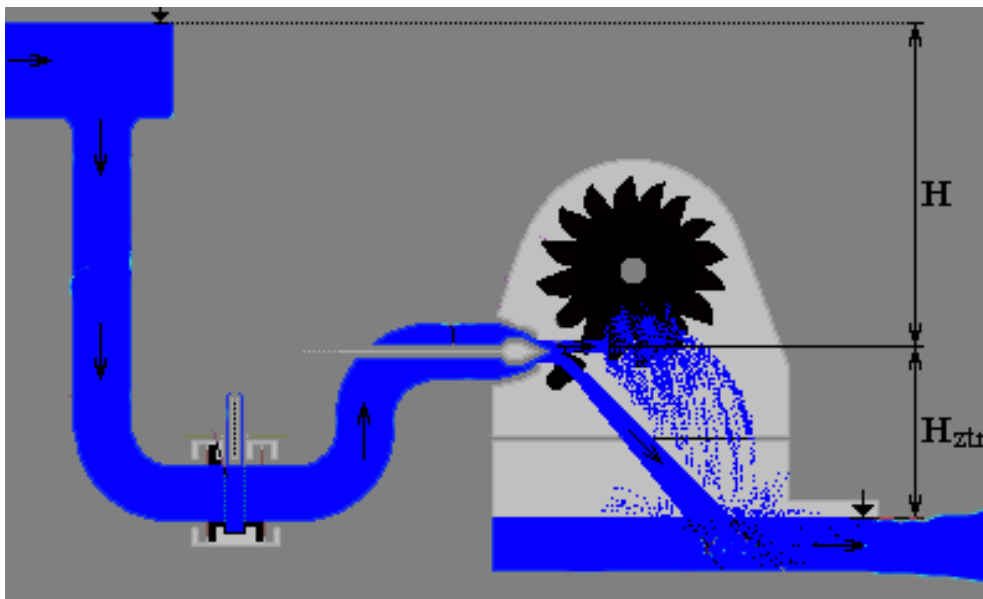
Obr. 1.5.: Princip Francisovy turbíny

**Kaplanova turbína** je mladší užívaná turbína. Jedná se o stroj přetlakový axiální a může být užívána jako horizontální, vertikální i šikmá. Oběžné kolo připomíná šroubovou vrtuli. Turbína má velmi dobrou regulační schopnost protože má natáčivé oboje – rozváděcí i oběžné - lopatky a tak účinnost může být vysoká v širokém rozsahu průtoku. Regulační vlastnosti si vynucují složitější mechanické uspořádání a tím i vyšší cenu. Typické užití této turbíny je pro malé spády a velké průtoky, které mohou být velmi proměnlivé. U vysokých průtoků je více kritérií vhodnějších pro Kaplanovu než Francisovu Turbína je také obvykle doplněna sací rourou. Levnější modifikace s pevným oběžným kolem se nazývá **propelerová turbína**.



Obr. 1.6.: Princip Kaplanovy turbíny

**Peltonova turbína** je velmi používaná rovnotlaká turbína tangenciálního typu. Voda je přiváděna vysokotlakou dýzou na lopatky ve tvaru nízké misky. Regulace se provádí změnou průtoku dýzou prostřednictvím regulační jehly. Protože se jedná o uzavírání velkých tlaků, není možno jehlu prudce zavřít (tak jak by to bylo nutné např. při odlehčení generátoru). Proto je v prostoru mezi dýzou a oběžným kolem zařazen deflektor nebo deviátor. Tento člen zasáhne okamžitě a odřízne část nebo odkloní celý vodní paprsek mimo oběžné kolo. Jehla dýzy se mezitím zavírá pozvolna, aby nedošlo k průtkému nárůstu tlaku v potrubí. Jakmile je množství vody proudící dýzou upraveno, deflektor se z vodního paprsku odkloní. Oba tyto pohyby se odehrávají současně a plynule. Turbína je obvykle stavěna jako horizontální ale může být i vertikální. Peltonova turbína je vhodná pro vysoké tlaky vody, které jsou důsledkem využívání velkých spádů až přes tisíc metrů.

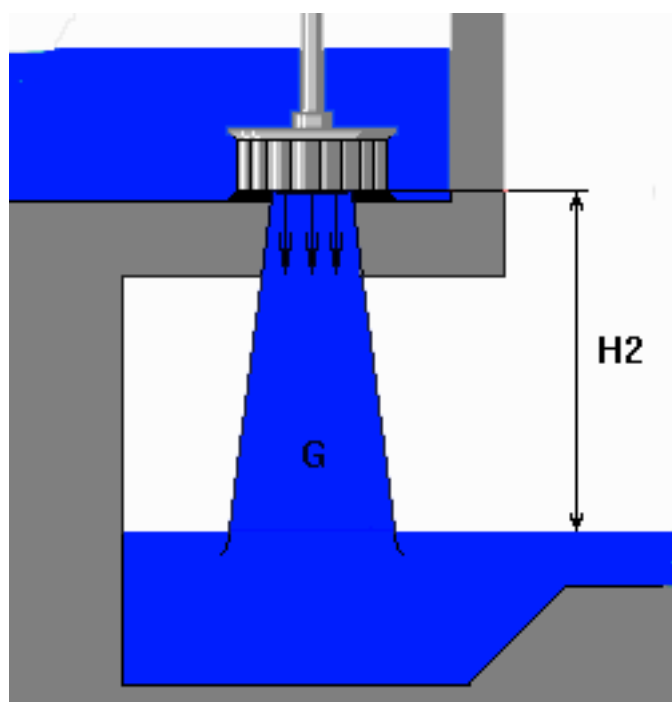


Obr. 1.7.: Princip Peltonovy turbíny

**Bánkiho turbína** je rovnotlaká horizontálního tangenciálního typu s dvojitým průtokem vody oběžným kolem. Může být úspěšně využita pro malé průtoky. Regulace je umožněna klapkou v přívodní části.

## Sací roura (savka)

Přetlakové turbíny často využívají sací rouru. Toto zařízení umožňuje umístit turbínu v potřebné poloze. Oběžné kolo nemusí být nízko u spodní hladiny aby se využil celý spád. Turbína využívá tlak mezi horní hladinou a oběžným kolem a také podtlak mezi oběžným kolem a spodní hladinou. Sloup vody v rouře vytváří podtlak. Postupně se rozšiřující proud vody způsobuje další podtlak (dodatečný zdánlivý spád) a také roste účinnost.



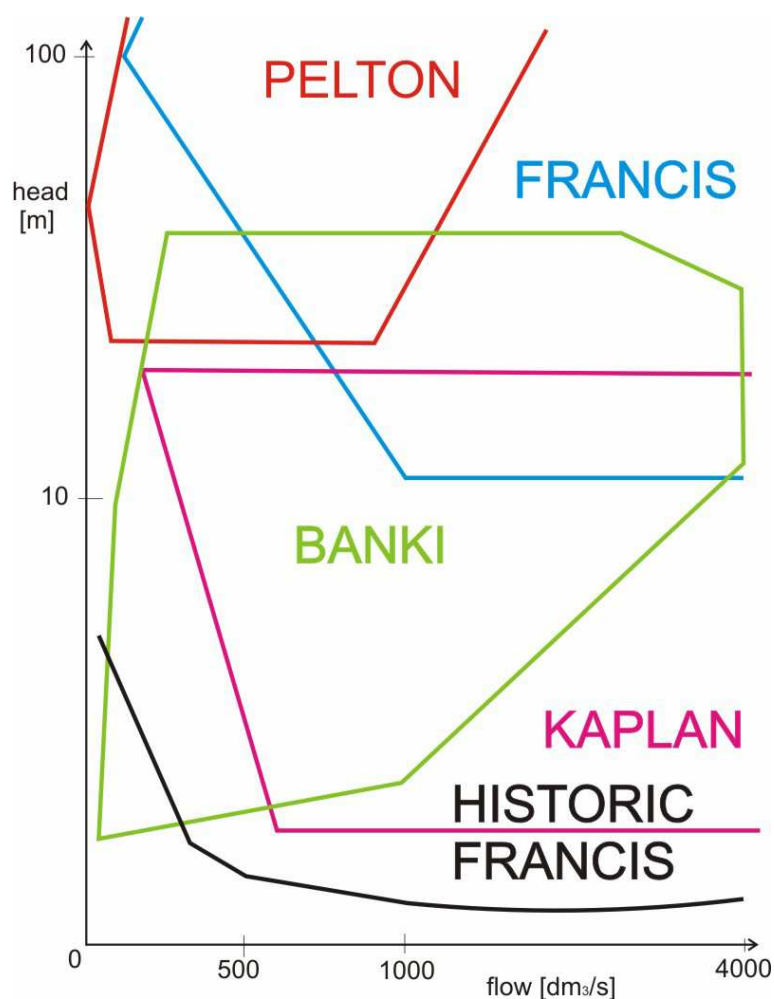
Obr. 1.8.: Princip sací roury

Sací roura se dá poměrně snadno spočítat a navrhnout. **Délka** závisí na výstupním průměru z oběžného kola (vstup do sací roury)  $d_r$  a na výstupním průměru sací roury  $d_d$ .

$$l = \frac{d_d - d_r}{0,17} \quad [\text{m}] \quad [1.1.]$$

**Výstupní průměr** závisí na průtoku  $Q$  a délce  $h$ .

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \sqrt{0,78 \cdot h}}} \quad [\text{m}] \quad [1.2.]$$



Obr. 1.2.: Oblasti využití turbín

Základním číselným parametrem charakterizujícím typ turbíny jsou **měrné otáčky** (bezrozměrný součinitel) který závisí na rychlostních trojúhelnících v lopatkování turbíny. **Měrné otáčky výkonové** mohou být odvozeny z rychlostního součinitele  $\phi$  a závisí na skutečných otáčkách  $n$ , účinnosti  $\eta$ , průtoku  $Q$  a měrné energii  $E$ , která závisí na spádu  $h$  a teplotě.

$$n_s = 1200 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{E^3}} \cdot \sqrt{\eta} = 1200 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{(2gh)^3}} \cdot \sqrt{\eta} \quad [-] \quad [1.3.]$$

| Turbina | Využitý spád [m] | Měrné otáčky výkonové [-] | Měrné otáčky objemové [-] | Thomův kavitační koeficient [-] |
|---------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Pelton  | 2 – 2000         | 12 – 70                   | 4 – 15                    | 0                               |
| Banki   | 1,5 – 100        | 35 – 220                  | 12 – 60                   | 0                               |
| Francis | 2 – 600          | 80 – 350                  | 25 – 100                  | 0,01 – 0,2                      |
| Deriaz  | 2 – 70           | 300 – 400                 | 85 – 115                  | 0,2 – 0,6                       |
| Kaplan  | 2 – 70           | 350 – 1200                | 100 – 300                 | 0,6 – 3                         |

Obr. 1.2.: Měrné otáčky turbín



Obr. 1.3.: Francisova turbina pro malé vodní elektrárny

**Kavitace** je velice složitý a nežádoucí mechanický process, který může poškodit části turbíny. V místě s nižším tlakem než je tlak nasycených vodních par vznikají dutiny vyplněné vodní parou, které v místě s vyšším tlakem zanikají (implodují). Zánik dutin je doprovázen velkými tlakovými rázy, které jsou příčinou značného mechanického namáhání částí turbíny. Povrch materialu se narušuje a u nehomogenních materiálů dochází k elektrochemické korozi. Kavítace nastává hlavně v oběžném kole a závisí na typu turbíny, rychlosti otáčení a tlakových poměrech (spád, atmosférický tlak) a na teplotě vody.

Hlavní podmínkou k zamezení kavítace je, aby dosahovaná měrná tlaková energie byla vyšší než měrná energie nasycených vodních par. Můžeme pak přibližně vypočítat maximální sací výšku (umístění turbíny vůči spodní hladině) na základě atmosférického tlaku  $p_a$ , spádu  $H$  a Thomova kavitačního koeficientu  $\sigma_T$ .

$$H_s = \frac{p_a}{\rho \cdot g} - \sigma_T \cdot H \quad [m] \quad [1.12.]$$

### 1.3 Vlastnosti vody

**Hydrologický koloběh** je hlavním zdrojem pro všechny vodní elektrárny. Ovšem primárním zdrojem energie pro tento koloběh je slunce a zemská gravitace. Sluneční záření ohřívá zemský povrch a odpařuje vodu. Vodní pára později v atmosféře zkondenzuje a nakonec zemská přitažlivost vyvolá pád vody ve formě deště na zemský povrch. Pokud voda dopadne do vyše položených lokalit může být její polohová a kinetická energie později využita ve vodních elektrárnách. Vodní energie patří mezi **nevyčerpatelné** a **obnovitelné** zdroje energie.

Voda je nositelem mechanické, tepelné a chemické energie. Nejdůležitější vlastností vody pro energetiku je mechanická energie vodních toků, která může být využita jako potenciální a kinetická energie.

Vodní energie je pravděpodobně nejdéle využívaným zdrojem energie. Vodní zdroje energie jsou široce využívány a patří mezi největší elektrárny. Značnou nevýhodou je zabránění a zatopení velkého území. To nepříznivě může ovlivnit přírodní, historická a obydlená území. Také lodní doprava může být omezena nebo znemožněna.

### 1.4 Energetický potenciál vodního toku

**Theoretický energetický potenciál toku** je definován jako práce potřebná pro přesun kapaliny z polohy A do B a je rovna rozdílu potenciálních energií v A ( $W_A$ ) a B ( $W_B$ ) vyjádřeném výškovým rozdílem (spádem)  $h$ . Gravitační pole je přibližně konstatní ( $g$ ). Skutečné teploty jsou téměř stejné, tak že měrná hmotnost  $\rho$  je také konstantou a hmotnost můžeme vyjádřit pomocí objemu  $V$ .

$$W = W_A - W_B = m \cdot g \cdot h = V \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad [J] \quad [1.13.]$$

**Teoretický výkon toku** je definován jako práce za čas  $\tau$ . Objem za čas může být vyjádřen jako průtok  $Q$ . Výpočet se provádí pro střední průtok  $Q_{50\%}$  a 95% průtok  $Q_{95\%}$ .

$$P = \frac{E}{\tau} = \frac{V \cdot \rho \cdot g \cdot h}{\tau} = \frac{V}{\tau} \cdot \rho \cdot g \cdot h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad [W] \quad [1.14.]$$

**Využitelný energetický potenciál toku** je potenciál snížený o ztráty při přeměnách energie. Geologické, hydrologické, topologické a ekonomické podmínky také snižují využitelnou energii.

Horní část toku má obvykle velký sklon, zatím co pro dolní část má malý sklon a velký průtok. Je pouze několik přírodních lokalit s přirozeným soustředěním spádu a průtoku jako jsou vodopády (Niagara Falls, Iguazu Falls, atd.). Většinou je nutné soustředit průtok i spád uměle nějakým zařízením.

#### **1.4.1 Čára překročení průměrných denních průtoků**

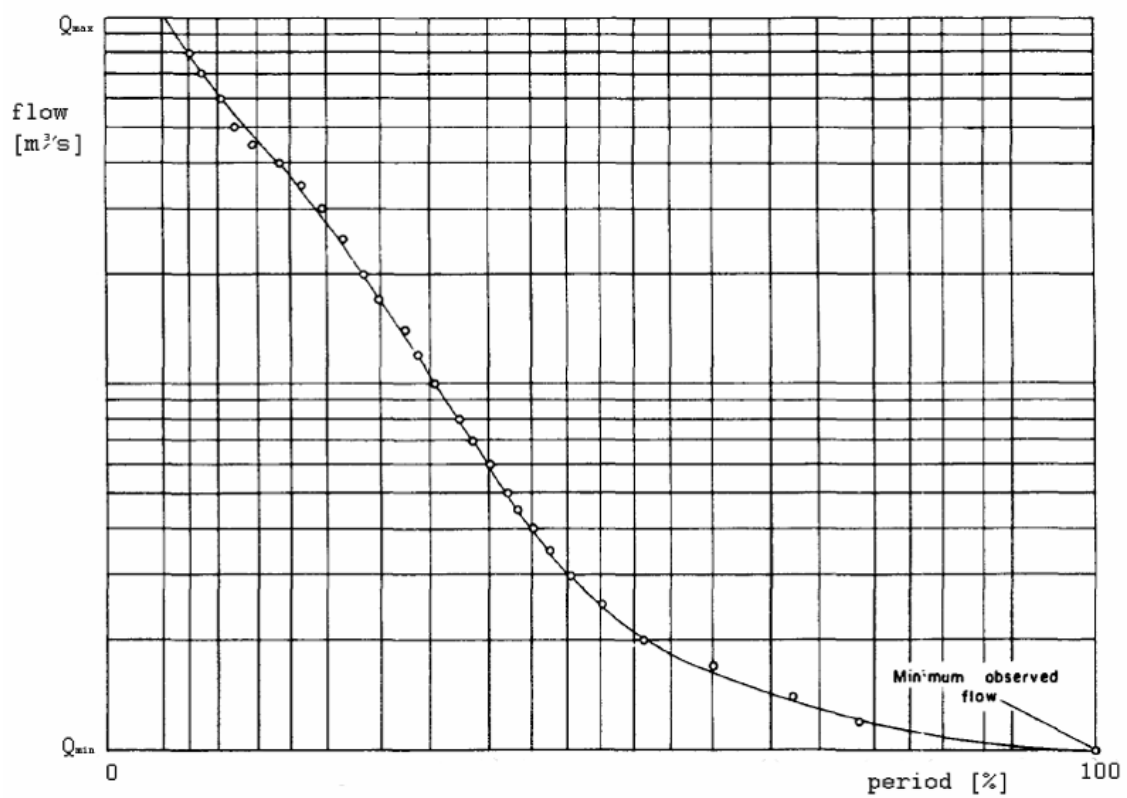
Průtok je obvykle proměnný v čase. Tato proměnlivost může být vyjádřena **čarou překročení průměrných denních průtoků**.

Čára překročení průměrných denních průtoků je matematicky souhrnou křivkou četnosti výskytu ukazující v % čas během kterého byl stanovený průtok stejný nebo byl překročen. Čára překročení průměrných denních průtoků znázorňuje četnost výskytu průtoku nebo průtočného množství a podle ní se určuje využitelný průtok

Pokud je čára překročení průměrných denních průtoků výsledkem sledování za dlouhé období (několik let) může být považována za pravděpodobnostní čáru a lze ji použít k předpovědi průtoku.

Pro technické účely nemůžeme použít celkové množství vody. **Sanitární průtok**  $Q_s$  musí vždy obtékat vodní elektrárnu z ekologických důvodů. Toto množství je obvykle určeno jako minimální průtok trvající 330 dní v roce ( $Q_{330}$ ).





Obr. 1.12.: Čára překročení průměrných denních průtoků

### 3.4 Cvičení

1. Objasněte původ energie vody.
2. Vysvětlete pojem “teoretický energetický potenciál vodního toku”.
3. Vysvětlete pojem “čára překročení průměrných denních průtoků”.
4. Rozdělte vodní elektrárny podle způsobu provozu.
5. Uveďte typy vzdouvacích zařízení
6. Uveďte výhody a nevýhody vodních kol a turbín.
7. Vypočítejte rozměry vodního kola pro průtok  $Q = 1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a spád  $h = 1 \text{ m}$ .
8. Rozdělte základní typy užívaných vodních turbín podle spádu..
9. Navrhněte turbinu pro malou vodní elektrárnu v lokalitě s průměrným atmosférickým tlakem  $p_a = 95 \text{ kPa}$ , využitelným spádem  $H = 3,2 \text{ m}$  a průtokem  $Q = 1,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Turbína bude mít provozní otáčky  $n = 200 \text{ 1/min}$ ..
10. Vypočítejte roční výrobu vodní elektrárny. Použitá turbína má stálou účinnost 75 % a regulační rozsah  $Q_{\min} = 1,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a  $Q_{\max} = 2,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Spád je  $h = 2 \text{ m}$  a čára překročení průměrných denních průtoků je v tabulce Obr. 1.2.

|          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| n [days] | 30  | 60  | 90  | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 365 |
| Q [m3/s] | 4,3 | 3,8 | 3,5 | 3,1 | 2,8 | 2,1 | 1,9 | 1,8 | 1,3 | 0,9 | 0,6 | 0,3 |

Obr. 1.13.: Tabulka pro čáru překročení průměrných denních průtoků

### 3.5 Odpovědi

1. Voda je nositelem mechanické, tepelné a chemické energie. Pro energetiku je nejdůležitější mechanická energie vodních toků. Tato energie je výsledkem hydrologického cyklu. Solární záření zahřívá zemský povrch a odpařuje vodu, vítr transportuje páry, které později kondenzují a vlivem gravitace padají na zemský povrch. Jejich polohová a kinetická energie může být využita ve vodních elektrárnách. Energie vody je jednou z obnovitelných energií.
2. Theoretický energetický potenciál vodního toku je práce potřebná k dopravě vody z bodu A do B a rovná se rozdílu polohových energií v A a B. Závisí na výškovém rozdílu (spád)  $h$ , objemu vody  $V$ , gravitační konstantě ( $g$ ) a měrné hmotnosti vody  $\rho$ .
3. Čára překročení průměrných denních průtoků je matematicky souhrnou křivkou četnosti výskytu ukazující v % čas během kterého byl stanovený průtok stejný nebo byl překročen. Čára překročení průměrných denních průtoků znázorňuje četnost výskytu průtoku nebo průtočného množství a podle ní se určuje využitelný průtok
4. Konvenční vodní elektrárna využívá celkový průtok vodního toku rovnoměrně v průběhu času. Jezová říční elektrárna má určitý zásobník, který může využívat pro účely regulace toku. Nejezová elektrárna žádný zásobník nemá. Akumulační vodní elektrárna využívá zásobník k akumulaci vody během období mimo energetickou špičku a v době špičkové potřeby energie využívá akumulovanou vodu k výrobě elektřiny. Přečerpávací vodní elektrárna nevyrábí elektřinu ale používá se k uložení energie v době mimo špičku a během špičky využívá akumulovanou vodu k výrobě elektřiny. Elektrárna má obvykle dvě nádrže různě vysoko položené.
5. Velké elektrárny používají gravitační přehradu, která je vybudována jako kamenná sypaná hráz nebo betonovou přehradu. Malé vodní elektrárny užívají jez nebo derivační kanál (bez nádrže).
6. Vodní kola jsou nejstarší a velmi jednoduché rovnotlaké stroje zatím co turbíny jsou obvykle rychloběžné přetlakové stroje (mimo Pelton a Bánki). Kola mají velmi pevnou konstrukci s oběžným kolem, zatím co

turbíny užívají dvě sady lopatek (rozdávěcí lopatky a oběžné). Kola nejsou citlivá na mechanické nečistoty (klacky, listí, led a pod.) nebo změny vodní hladiny (včetně povodní a sucha), ale mají menší účinnost než turbíny. Kolo je nízkootáčkový stroj a může být provozováno bez spádu (pouze rychle proudící vodou).

7. Podle rovnice 1.1. zvolíme průměr kola  $D = 5$  m. Dále použijeme k výpočtu rovnice 1.2., 1.3., 1.4., 1.5., 1.6., 1.7., 1.8. Výsledné parametry jsou následující: otáčky: 6,72 1/min, šířka lopatek: 2,21 m, délka lopatek: 0,53 m, rozteč lopatek: 0,49, počet lopatek: 31.
8. Nejmenší spád: Kaplan, střední spády: Francis, nejvyšší spád: Pelton.
9. Turbína bude provozována v malé vodní elektrárně takže účinnost budeme uvažovat přibližně 75 %. Vypočítáme specifické výkonové otáčky z rovnice 1.3.:  $n_s = 263,2$ . Podle tabulky na obr. 1.2. je vhodná Francisova turbína. Nyní zkontrolujeme turbínu na kavitaci. Podle rovnice 1.12.:  $H_s = 9,04$  m. Použitý spád (3 m) je nižší než maximální sací výška (9,04 m), žádnou kavitaci nemusíme očekávat, turbína je navržena správně.
10. Sanitární průtok je roven  $Q_{330} = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ . Využitelný průtok  $Q_u$  je průtok  $Q$  zmenšený o sanitární průtok  $Q_{330}$ . Průtok pro turbínu  $Q_t$  je využitelný průtok  $Q_u$ , omezený regulačním rozsahem turbíny. Výkon turbíny  $P_t$  je vypočítán z rovnice 1.14. a účinnosti turbíny. Roční výroba energie je součtem částečných hodnot uvedených v tabulce na obr.č. 1.14.

|                |                |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| n [days]       | 30             | 60             | 90             | 120            | 150            | 180            |
| Q [m3/s]       | 4,3            | 3,8            | 3,5            | 3,1            | 2,8            | 2,1            |
| Qu [m3/s]      | 3,7            | 3,2            | 2,9            | 2,5            | 2,2            | 1,5            |
| Qt [m3/s]      | 2,8            | 2,8            | 2,8            | 2,5            | 2,2            | 1,5            |
| Pt [kW]        | 41,2           | 41,2           | 41,2           | 36,8           | 32,4           | 22,1           |
| <b>E [kWh]</b> | <b>29655,4</b> | <b>29655,4</b> | <b>29655,4</b> | <b>26487,0</b> | <b>23308,6</b> | <b>15892,2</b> |
| n [days]       | 210            | 240            | 270            | 300            | 330            | 365            |
| Q [m3/s]       | 1,9            | 1,8            | 1,3            | 0,9            | 0,6            | 0,3            |
| Qu [m3/s]      | 1,3            | 1,2            | 0,7            | 0,3            | 0              | 0              |
| Qt [m3/s]      | 1,3            | 1,2            | 0              | 0              | 0              | 0              |
| Pt [kW]        | 19,1           | 17,7           | 0              | 0              | 0              | 0              |
| <b>E [kWh]</b> | <b>13773,2</b> | <b>12713,8</b> | <b>0</b>       | <b>0</b>       | <b>0</b>       | <b>0</b>       |

Obr 1.14.: Výpočet celkové roční výroby energie

Celková vyrobená energie může být 181171,1 kWh.

## 2 Solární energetické systémy

**Klíčová slova:** solární energie, solární záření, intenzita, solar energy, solar radiation, intensity, sun shine period, pasivní solární system, aktivní solární system, solární elektrárna, fotovoltaická elektrárna

### 2.1 Solární energetické systémy

Lidstvo využívá solární energii mnoha cestami. Kromě **přímého využití** pro výrobu elektřiny a tepla je solární energie často **využívána nepřímo** jako přeměněná forma energie. Každé fosilní palivo je také uskladněná solární energie. Tato energie uložená pod zemským povrchem před miliony let byla transformována prostřednictvím fotosyntézy do chemické energie biomasy a později pod zemským povrchem přeměněna v uhlí, olej nebo plyn. Mechanická energie větru je také solární energie uskladněná jako teplo ve vrstvách atmosféry. Konečně i koloběh vody poháněný sluncem, ohřívá, odpařuje a transportuje vodu.



Obr. 2.1.: Fotonvoltaická elektrárna Dubňany

Přímé využívání solárního záření může být založeno na **aktivních** a **pasivních** systémech.

### 2.1.1 Pasivní solární systémy

**Pasivní solární systémy** jsou navrhovány tak aby pracovaly v souladu s přírodou. To znamená důmyslné využití různých oken, zastínění a izolace. U antických a historických objektů se často setkáváme s těmito moderními principy (prehistorické chatrče, koloniální architektura, atd).

- Solární architektura
  - o poloha objektu
  - o solární balkony, pergoly, zimní zahrady
  - o zastínění, rolety, žaluzie
  - o solární okno
  - o Trombeho stěna
  - o solární stěna
- nízkoenergetické stavby
- pasivní objekty



Obr. 2.2.: Solární architektura (Charleston)

### 2.1.2 Aktivní solární systémy

**Aktivní solární systémy** jsou speciální technická zařízení pro přeměnu solární energie. Energie je obvykle přeměňována na teplo nebo elektřinu, ale je také zkoumáno mnoho nekonvenčních cest.

- nízkoteplotní solární tepelné systémy
- vysokoteplotní solární systémy
- fotovoltaické systémy
- umělá fotosyntéza

## 2.2 Nízkoteplotní solární tepelné systémy

Nízkoteplotní solární tepelné systémy jsou využívány pro topení, předehřev, ohřev užitkové vody a akumulaci tepla. Tyto systémy obvykle sestávají z několika kolektorů, akumulátoru a regulačního zařízení.

**Absorber** je zařízení pro absorpci solárního záření. Může být současně také akumulátorem absorbované energie. Absorbér je obvykle velmi jednoduchý, nemá izolaci a jiné úpravy pro dosažení vyšší účinnosti.

**Kolektor** je ve skutečnosti vylepšený absorber. Absorbér je obvykle součástí kolektoru. Dodatečné izolace a zlepšení zvyšují účinnost. Podle způsobu provedení izolace dělíme kolektory **na rovinné, rovinné vakuové a trubicové vakuové kolektory**,

Tepelný výpočet tohoto systému vychází z **tepelné rovnice**, kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita užívaného media,  $t_1$  znamená teplotu na vstupu,  $t_2$  znamená teplotu na výstupu a  $m$  je hmotnost použitého media

$$Q = m \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad [J] \quad [2.1.]$$

Teplo  $Q$  je dodáváno ze solárního záření  $I$  dopadajícího na povrch absorber  $S$  během času  $\tau$ .

$$I \cdot S \cdot \tau = m \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad [J] \quad [2.2.]$$





Obr. 2.3.: Vakuový trubicový kolektor

## 2.3 Vysokoteplotní solární tepelné systémy

**Vysokoteplotní solární tepelné systémy** jsou užívány pro vysokoteplotní průmyslové vytápění nebo pro výrobu páry. Vyráběná pára pohání normální parní turbinu s generátorem. Tyto jednotky mohou spolupracovat s konvenční tepelnou elektrárnou pro vykrývání diagramu zatížení a optimalizaci výroby energie.

**Věžová solární elektrárna** má jeden centrální absorber. Velký počet odrazných zařízení – **heliostatů** odráží dopadající solární záření a koncentruje je do ohniska. Tím je dopadající záření značně mnohonásobeno a jeho tok může dosahovat kolem  $1\,000\text{ kW/m}^2$ . Kritickou záležitostí pro návrh zařízení je přesné umístění a seřízení pohybu heliostatů. Heliostaty jsou velmi citlivé na mechanické a tepelné šoky. Absorbér je umístěn v ohnisku a může sloužit přímo jako parní kotel.

Tepelný tok na povrch absorberu  $A$  lze stanovit z odraženého solárního záření  $I$  od povrchu heliostatů  $S$  s albedem  $r$ .

$$I \cdot S \cdot r = q \cdot A \quad [J] \quad [2.3.]$$





Obr. 2.4.: Odeillo Slubeční pec Odeillo (France) – tower solar plant

Věžové solární vysokotepelné systémy mohou být užívány nejen pro energetiku ale také pro různé průmyslové účely, jako je tavení materiálu, testování tepelnými šoky, atd.

**Parková solární elektrárna** má také velký počet odrazných zařízení - **koncentrátorů**. Koncentrátory mnohonásobí a soustředí dopadající záření do jejich ohniska. **Sběrná potrubí** (leží v ohniskové přímce) absorbují teplo a zajišťují jeho přenos do centrálního parního generator (výměníku). Tepelný tok je nižší než v předchozím případě a také pracovní teploty jsou nižší. To pak omezuje využití pro průmyslová tepelná zařízení. Dvouokruhové uspořádání také znamená nižší účinnost elektrárny. Hlavní výhodou je absence komplikovaných heliostatů. Koncentrátory nejsou tak citlivé na mechanické a tepelné namáhání jako heliostaty. Jak věžové solární elektrárny tak i parkové solární elektrárny vyžadují intenzivní přímé solární záření a dlouhou dobu slunečního svitu pro spolehlivý a účinný provoz. Tato skutečnost omezuje jejich využití pouze ve velmi příznivých lokalitách v subtropických a tropických pásmech jako jsou Kalifornie, Nevada, Sahara, atd. Tyto zdroje jsou prakticky nepoužitelné pro provoz v České republice, kde doba slunečního svitu jsou příliš krátké a přímé záření je značně omezené. Z ekonomického hlediska jsou

tyto energetické zdroje nevýhodné. Fotovoltaické systémy jsou v současné době ziskovější.



Obr. 2.5.: Nevada Solar 1 – parková solární tepelná elektrárna

## 2.4 Fotovoltaické systémy

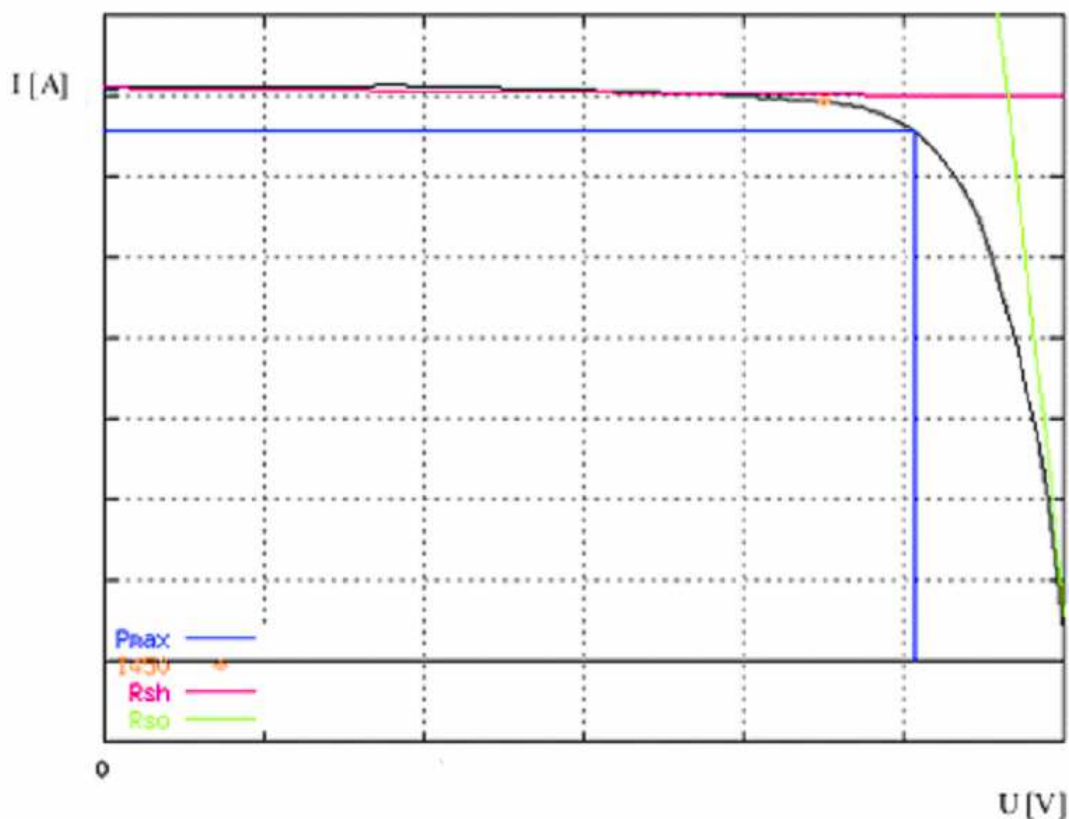
**Fotovoltaické systémy** využívají **fotovoltaický jev** pro přímou výrobu elektřiny. Absorbovaný foton předává kvanta jeho energie valenčnímu elektronu. Pokud je energie dostatečná k překonání energetické bariéry mezi valenčním a vodivostním pásem, je electron uvolněn do vodivostního pásu a může být využit v elektrickém obvodu.

**Fotovoltaický článek** je zařízení využívající fotoelektrický jev. Výstupní napětí závisí na použitém material (jeho energetické bariéře) a výstupní proud závisí na velikosti článku a dopadajícím záření.

Fotovoltaické články jsou měřeny a testovány v souladu se **Standardními testovacími** (STC):

- spektrum AM 1,5 (spectrum denního světla),
- intenzita záření  $1\,000\text{ W/m}^2$  (plné slunce),
- teplota článku  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**VA charakteristika** fotovoltaického článku popisuje základní vlastnosti článku. **Bod maximálního výkonu** je optimální provozní bod a je obvykle umístěn v ohybu křivky. Kvalitní články mají ohyb velmi strmý. .



Obr. 2.6.: VA charakteristiky monokrystalického křemíkového článku

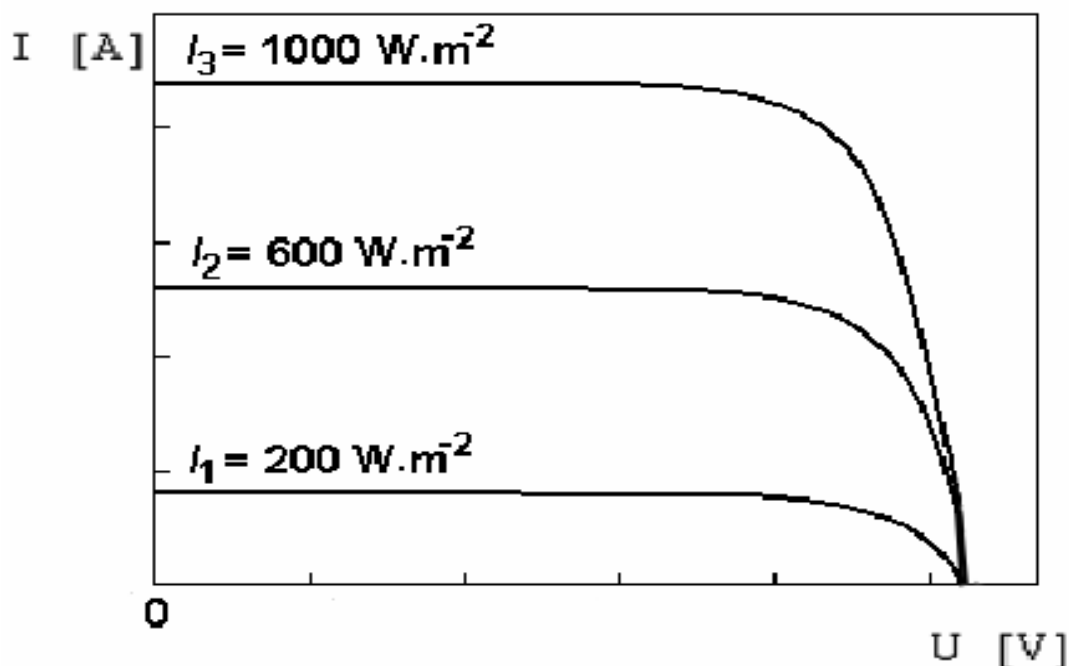
**Základní parametry** fotovoltaických článků jsou:

- $I_{450}$  – porovnávací proud při výstupním napětí 450 mV [A]
- $I_{sc}$  – proud nakrátko [A]
- $U_{oc}$  – napětí naprázdno [V]
- $P_m$  – maximální výkon [W]
- $I_m$  – proud v bodě maximálního výkonu [A]
- $U_m$  – napětí v bodě maximálního výkonu [V]
- FF - Fill Faktor – parametr kvality [-]

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}} \quad [-] \quad [2.4.]$$

- $E_{ef}$  - účinnost [%]
- $R_{so}$  – seriový odpor [ $\Omega$ ]
- $R_{sh}$  – paralelní odpor [ $\Omega$ ]

VA charakteristika závisí na solárním záření jako zdroji energie. Čím vyšší je intenzita záření, tím vyšší je výstupní proud, protože počet uvolněných elektronů odpovídá počtu dopadajících fotonů.



Obr. 2.7.: Závislost VA charakteristiky na solárním záření

Vyšší teplota také zvyšuje výstupní proud, protože energie potřebná k překonání energetické bariéry je nižší, ale klesá výstupní napětí, protože odpor materiálu je vyšší..

**Fotovoltaické panely** s různými výstupními napětími a výkony jsou složeny z fotovoltaických článků v serioparalelním zapojení. Články jsou zalaminovány mezi dvě desky a chráněny nahoře sklem. Panely jsou zarámovány pro montáž. Bypasové diody jsou často používány k vyrovnání nestejných, zastíněných nebo vadných panelů.

**Tracker** je technické zařízení umožňující panelům sledovat slunce a tím zvýšit výrobu energie. Trackery mohou být jednoosé a dvouosé. Sledování může být podle polohy slunce nebo může být řízeno časovačem. Sezóní manuální změna polohy panelů je jednoduchým kompromisem mezi pevným systémem a natáčivým systémem.

**Koncentrátor** je technické zařízení koncentrující záření na panel a tím může vzrůst výroba energie. Koncentrátor může být složen ze zrcadel nebo čoček.



Obr. 2.8.: Strašice – natáčivá fotovoltaická elektrárna

**Zařízení připojené k síti** je fotovoltaický systém dodávající vyrobenou energii do veřejné sítě. Takové zařízení potřebuje inverter (měnič) umožňující připojení k síti.

**Samostatné (ostrovní) zařízení** je fotovoltaický systém, který obvykle dodává vyrobenou energii do akumulátoru. Nabíječka baterií a měnič (ne pro dodávku do sítě) jsou většinou součástmi takového systému.

**Fotovoltaický článek** může být zařazen dle využitého materiálu a technologie do následujících generací:

**1 generace** využívá monokrystalický křemík, nejstarší a běžný materiál pro fotovoltaické články. Křemík je materiál všeobecně dostupný, relativně levný, netoxický, stabilní a má dostatečnou energetickou bariéru. Komerční články dosahují účinnosti kolem 18 %. Maximální teoretická účinnost je 32 % a je uvedena jako Shockley-Queisser limit. Levnější možností je polykrystalický křemík, jehož výroba je levnější. Ekonomický prospěch je ale vyvážen nižší účinností polykrystalických článků. Tyto články jsou převážně využívány v současných fotovoltaických elektrárnách.

**2 generace** je charakterizována úsilím o materiálové úspory. Tyto články používají odlišný a levnější materiál jako nosný substrát, Monokrystalický nebo amorfnní křemík je využíván pouze jako absorber v tenké vrstvě. Tyto články jsou relativně velmi levné, ale mají relativně velmi nízkou účinnost. Jsou občas užívány v malých koncových fotovoltaických systémech.

**3 generace** je založena na různých materiálech a technologiích. deals with different materials and different technologies. Cílem je růst účinnosti a překonání Shockley-Queisser limitu. Tandemové články, vícevrstvé články, termofotovoltaické články, kvantové well články, třídimensionální články, organické články atd jsou velmi důležité trendy ve výzkumu. CdS, CdSe, GaInP, GaAs or Ge se jeví jako materiály budoucnosti. Tyto články mají vysokou účinnost, ale jsou velmi nákladné a dostupné pouze jako výzkumná

## 2.5 Vlastnosti solárního zařetí

### 2.5.1 Solární energie

**Solární energie** je definována jako energie záření dopadajícího na zemský povrch ze Slunce ve formě fotonů s různými frekvencemi.

Solární energie patří mezi **nevyčerpatelné energie**. Různé definice označují solární energii jako velmi čistou energii nebo energii s příznivým ekologickým vlivem.

Bohužel, solární energie má některé specifické vlastnosti, pro které je velmi obtížné její technické využití:

- proměnlivé množství během roku,
- proměnlivé množství během dne,
- přímé a difuzní světlo.

Maximální využitelná intenzita energie je nazývána **solární konstantou**  $I_0$  a může být naměřena na povrchu atmosféry. Toto číslo není ve skutečnosti konstantou ale závisí na aktuální poloze na zemské dráze a na aktuální aktivitě Slunce.

$$I_0=1368$$

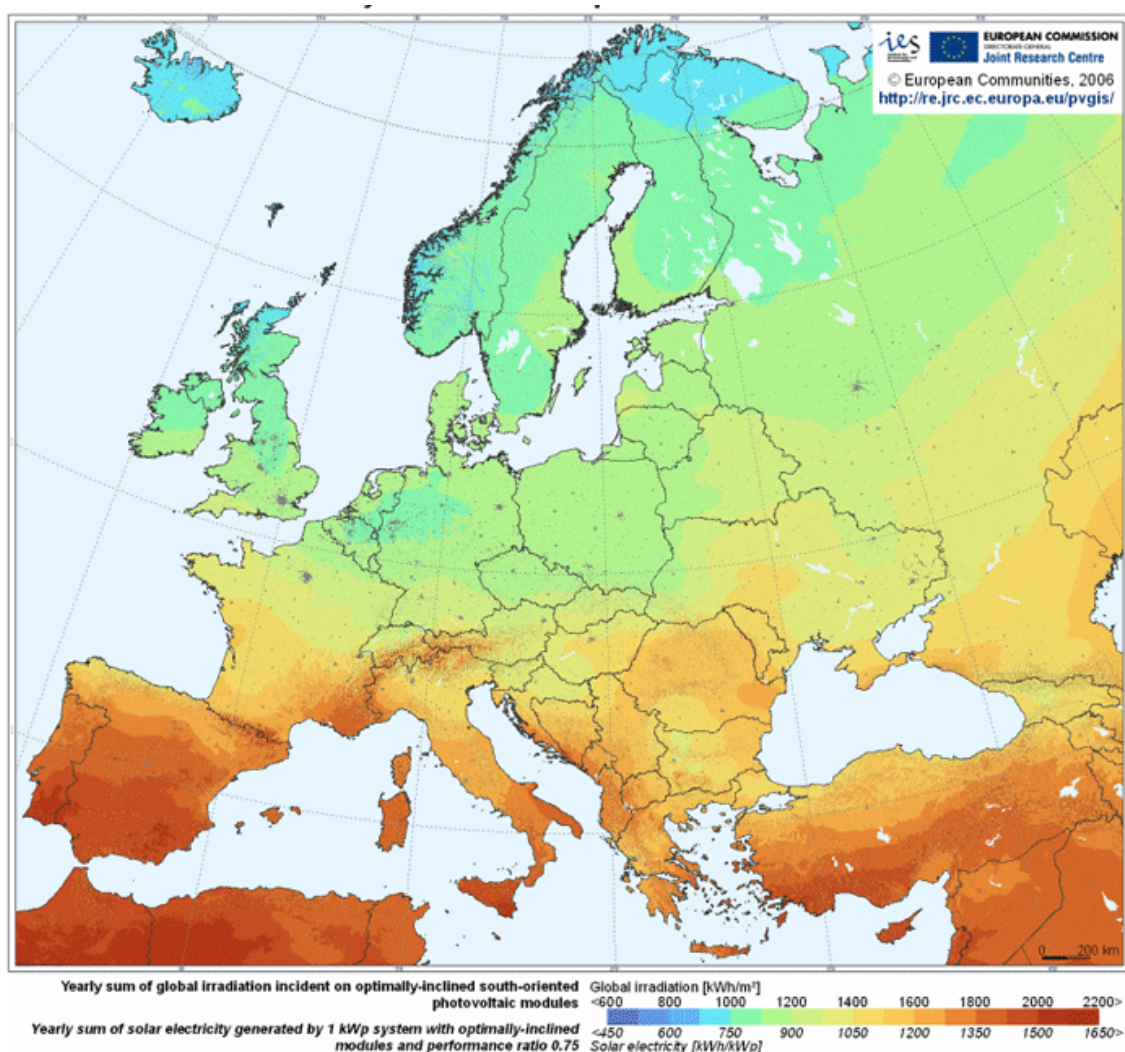
$$[W/m^2]$$

$$[2.5.]$$



Zhruba 30 % této energie se odrazí nebo zpětně vyzáří zpět do kosmu takže pouze  $1\,000\text{ W/m}^2$  dopadá na zemský povrch. Teoreticky využitelná energie závisí na lokalitě a pohybuje se mezi  $600\text{ kWh/m}^2$  and  $2\,200\text{ kWh/m}^2$  jak ukazuje Obr. 2.1. Skutečně využitelná energie závisí kromě toho na roční periodě slunečního svitu v lokalitě  $\tau$  (300 – 3000 h).

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I d\tau \quad [\text{kWh/m}^2] \quad [2.6.]$$



Obr. 2.1.: Potenciál solární energie

### 2.5.2 Intenzita solárního záření

**Celková intenzita** je definována jako součet přímé světelné intenzity  $I_p$  a difuzní světelné intenzity  $I_D$ .

$$I = I_p + I_D \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.7.]$$

**Intenzita přímého záření** dopadající na obecně položenou plochu může být vypočítána z přímé světelné intensity dopadající na plochu ve směru normály  $I_{PN}$  a úhlu  $\gamma$ , který svírá normala osluněné plochy se směrem paprsků.

$$I_p = I_{pn} \cos \gamma \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.8.]$$

**Intenzita přímého záření na plochu ve směru normály** lze vypočítat ze solární konstanty  $I_0$ , součinitele polohy  $\varepsilon$  a součinitele znečištění atmosféry  $Z$ .

$$I_{pn} = I_0 e^{\frac{Z}{\varepsilon}} \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.1.]$$

**Součinitel polohy** závisí na nadmořské výšce polohy  $H$  a výšce slunce nad horizontem  $h$ .

$$\varepsilon = \frac{9,38076 \left[ \sin h + (0.003 + \sin^2 h)^{0.5} \right]}{2.0015(1 - H \cdot 10^{-4})} + 0.91018 \quad [-] \quad [2.2.]$$

**Součinitel znečištění atmosféry** lze vypočítat z Linkeho vztahu, solární konstanty  $I_0$ , přímé normálové intensity při čisté atmosféře  $I_c$  a přímé normálové intensity za aktuálního počasí  $I_n$ .

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_n}{\ln I_0 - \ln I_c} \quad [-] \quad [2.3.]$$

**Úhel mezi slunečními paprsky a osluněným povrchem** lze vypočítat z úhlu **slunce nad horizontem**  $h$ , inklinace povrchu  $\alpha$ , azimutu povrchu  $a$  a slunce  $a_s$ . Úhel je počítán od jihu ve směru hodinových ručiček.

$$\cos \gamma = \sinh \cdot \cos \alpha + \cosh \sin \alpha \cos(a - a_s) \quad [-] \quad [2.12.]$$

**Difusní intenzita záření** je možné vypočítat z inklinace povrchu  $\alpha$ , středního albeda okolních ploch  $r$ , difuzní intensity záření na vodorovnou plochu  $I_{Dh}$  a přímé intensity záření na vodorovnou plochu  $I_{Ph}$ .

$$I_D = 0,5(1 + \cos \alpha)I_{Dh} + 0,5r(1 - \cos \alpha)(I_{Ph} + I_{Dh}) \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.13.]$$



**Intenzitu difuzního záření na vodorovnou plochu** můžeme vypočítat ze solární konstanty  $I_0$ , intensity přímého záření dopadajícího na plochu ve směru normály a úhlu Slunce nad horizontem  $h$

$$I_{Dh} = 0,33(I_0 - I_{Pn})\sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.14.]$$

**Intenzitu přímého záření dopadající na vodorovnou plochu** lze stanovit z intensity záření dopadající na plochu kolmou ke směru paprsků  $I_{PN}$  a úhlu Slunce nad horizontem  $h$

$$I_{Ph} = I_{Pn}\sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad [2.15.]$$

**Globalní záření**  $I_G$  představuje celkovou intenzitu dopadající na vodorovný povrch.

### 2.5.3 Doba slunečního svitu

**Doba slunečního svitu** je velmi kolísavá hodnota a může být vyjádřena nebo měřena jako následující hodnoty:

- **astronomická doba slunečního svitu** je definována jako doba během které není slunce zastíněno, není mlha a je bezoblačno. To je závislé pouze na lokalitě a lze to stanovit jako časový rozdíl mezi východem  $\tau_2$  a západem Slunce  $\tau_1$ .

$$\tau_a = \tau_1 - \tau_2 \quad [\text{h}] \quad [2.16.]$$

- **effektivní doba slunečního svitu** je definována jako astronomická doba slunečního svitu  $\tau_a$  zkrácená o dobu zastínění od stávajících přírodních a umělých překážek  $\tau_s$ .

$$\tau_{ef} = \tau_a - \tau_s \quad [\text{h}] \quad [2.17.]$$

- **skutečná doba slunečního svitu** je veličina nejlépe použitelná v technické praxi a její velikost je nepředvídatelně ovlivňována počasím a ostatními okolnostmi v lokalitě. Může být získána pouze měřením (např. heliografem) a odečet je

$$\tau_{\text{real}} \quad [\text{h}] \quad [2.18.]$$

- **poměrná doba slunečního svitu** je důležitý parametr silně ovlivněný reálnou (skutečnou) dobou slunečního svitu v lokalitě. Je definována jako poměr skutečnou dobou slunečního svitu  $\tau_{real}$  a efektivní dobou slunečního svitu  $\tau_{ef}$ .

$$\tau' = \frac{\tau_{real}}{\tau_{ef}} \quad [-] \quad [2.3.]$$

Následující grafy ukazují skutečně naměřené hodnoty intenzity solárního záření a dobu slunečního svitu během experimentů prováděných na solárním tepelném systému v Plzni v roce 2003. Strmé hrany na konci všech grafů ukazují na umělou překážku a zuby na denních křivkách představují vliv oblačnosti. Měsíční grafy ukazují velmi názorně průměrné počasí během ročního období. Plocha pod každou křivkou představuje použitelnou energii v daném ročním období (porovnej léto a zimu).

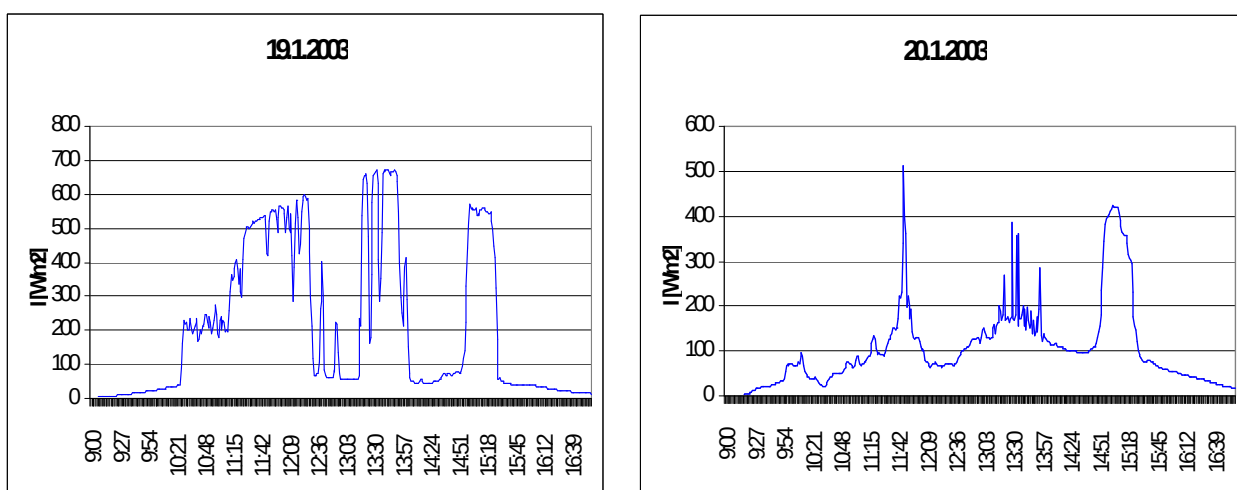
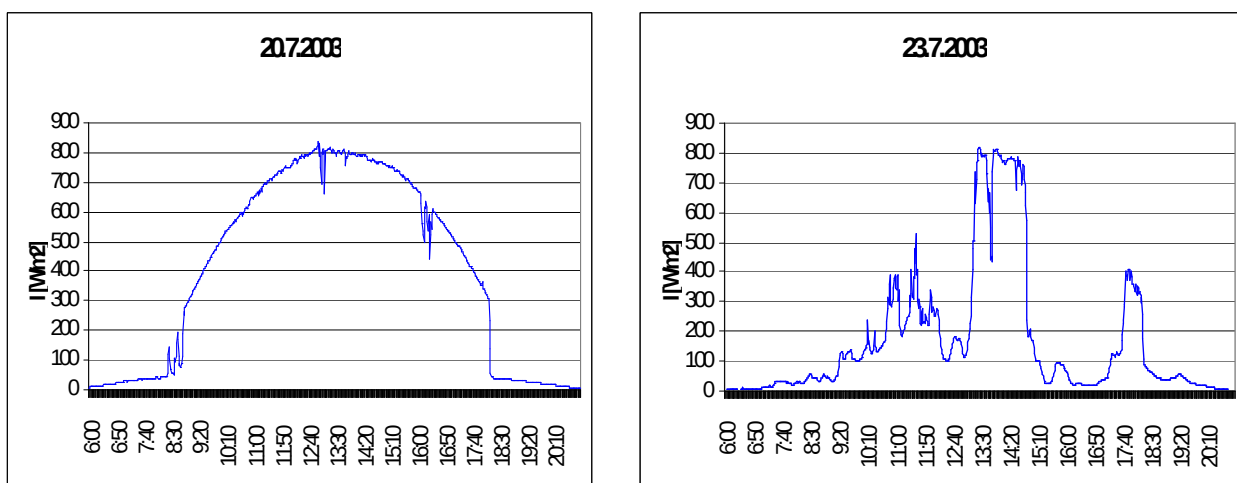
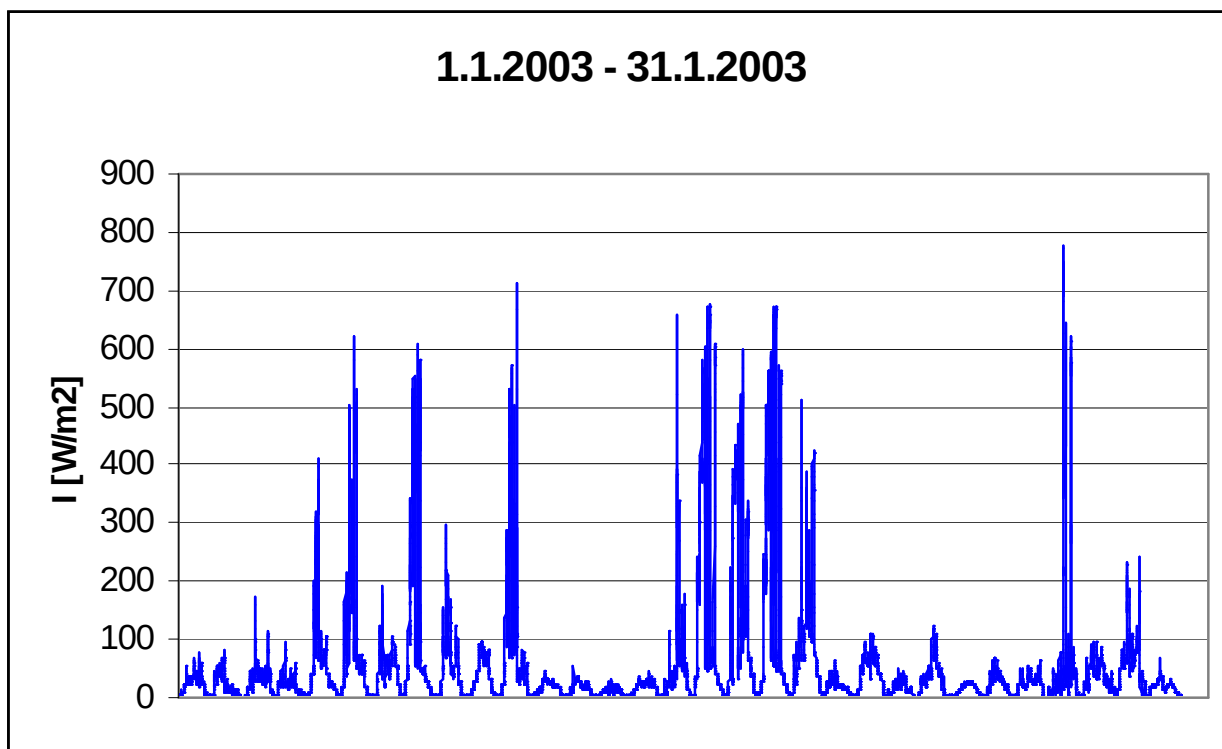


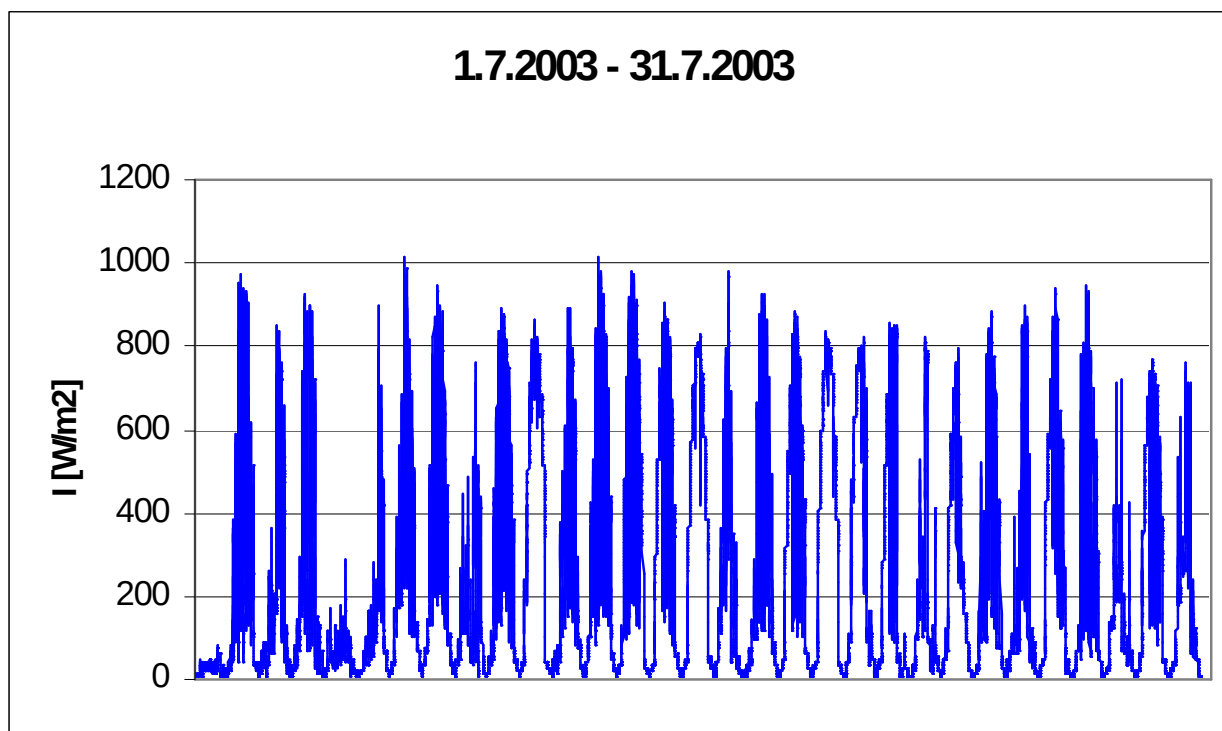
Fig. 2.2.: Solar energy in winter day (Pilsen) – left sunny, right cloudy



Obr. 2.3.: Solární energie v letním dni (Plzeň) – vlevo slunešno, vpravo oblačno



Obr. 2.12.: Solární energie v zimě (Plzeň)



Obr. 2.13.: Solární energie v létě (Plzeň)

## 2.6 Cvičení

11. Vysvětlete pojem "solární konstanta".
12. Vysvětlete rozdíl mezi astronomickou a efektivní dobou slunečního svitu..
13. Charakterizujte aktivní solární systém. Uveďte příklady.
14. Vysvětlete rozdíl mezi absorbérem a kolektorem v solárních tepelných systémech.
15. Provedte tepelný výpočet jednoduchého solárního systému sestávajícího z velké neizolované nádrže jako absorberu a akumulátoru. Objem je 200 litrů, ozářená plocha je  $1 \text{ m}^2$ , účinnost 30 %, doba ohřevu je 8 hodin, střední solární intenzita  $600 \text{ Wm}^{-2}$ , a počáteční teplota je  $12^\circ\text{C}$ . Jaká bude výstupní teplota?
16. Provedte tepelný výpočet solárního systému sestávajícího z kolektorů a izolované akumulční nádrže. Plocha kolektorů je  $2 \times 1,7 \text{ m}^2$  a účinnost 60 %. Účinnost akumulátoru je 95 %. Doba ohřevu je 8 h, střední solární intenzita je  $600 \text{ Wm}^{-2}$ , počáteční teplota je  $12^\circ\text{C}$  a konečná teplota je  $50^\circ\text{C}$ . Jaké je množství ohřáté vody?
17. Jaký je rozdíl mezi věžovou a parkovou solární elektrárnou?
18. Nakreslete VA charakteristiku solárního článku. Vysvětlete termín "standardní testovací podmínky".
19. Popište generace solárních článků.

## 2.7 Odpovědi

11. Solární konstanta  $I_0$  je maximální využitelná intenzita solárního záření dopadající na povrch atmosféry.  $I_0 = 1368 \text{ W/m}^2$ .
12. Astronomická doba slunečního svitu je časový úsek mezi východem a západem slunce. Efektivní doba slunečního svitu je astronomická doba slunečního svitu zkrácená o dobu zastínění od všech existujících přírodních a umělých překážek.
13. Aktivní solární systémy jsou speciální technická zařízení pro přeměnu solární energie. Energie je obvykle přeměňována v teplo nebo elektřinu. Aktivní systémy jsou na př. Solární tepelné systémy a fotovoltaické systémy.
14. Absorbér je zařízení pro absorpci solární energie zatímco kolektor je vylepšené zařízení obsahující dodatečnou izolaci a další úpravy zlepšující účinnost.
15. Pro výpočet lze použít rovnici 2.2. Měrná tepelná kapacita vody je  $c_p = 4187 \text{ J/kgK}$ . Objem 200 l budeme brát jako 200 kg.

$$t_2 = \frac{I \cdot S \cdot \tau}{m \cdot c_p} + t_1 \quad [\text{°C}] \quad [2.20.]$$

Teplota na konci ohřevu podle tepelné rovnice je  $18 \text{ °C}$ .

16. Pro výpočet můžeme použít rovnici 2.2. Měrná tepelná kapacita vody je  $c_p = 4187 \text{ J/kgK}$ .

$$m = \frac{I \cdot S \cdot \tau}{c_p \cdot (t_2 - t_1)} \quad [\text{kg}] \quad [2.21.]$$

Množství ohřáté vody podle tepelné rovnice je 210 kg, to je zhruba 210 l.

17. Věžová solární elektrárna má jeden centrální absorbér a velký počet odrazných zařízení (heliostatů), která odrážejí a soustřeďují dopadající solární záření do ohniska na absorber, zatím co parková solární elektrárna má velký počet odrazných zařízení (koncentrátorů) předávajících teplo prostřednictvím sběrného potrubí, umístěného v

ohniskové přímce, do centrálního parogenerátoru. Tepelný tok a pracovní teplota je vyšší u věžového systému.

18. VA charakteristika je uvedena na Obr. 2.6.

Standardní testovací podmínky jsou definovány spektrem AM 1,5 (spektrum denního světla), intenzitou solárního záření  $1\,000\text{ W/m}^2$  (plné slunce) a teplotou článku  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

19.1 generace FV článků užívají monokrystalický a polykrystalický křemík. Tyto články jsou běžné v současné době.

2 generace používá levnější material jako nosný podklad a mikrokřemalický nebo amorfní křemík jako absorber v tenké vrstvě.

3 generace používá nové pro zvýšení účinnosti.

### 3 Větrné energetické systémy

**Klíčová slovy:** energie větru, rychlost větru, větrné turbíny, větrné farmy, větrné turbíny s horizontální osou, větrné turbíny s vertikální osou, Darrieus, Savonius.

#### 3.1 Větrné energetické systémy

**Větrné turbíny** jsou často seskupeny do větrných farem sestávajících ze stovek nebo tisíců jednotek. Příznivé lokality jako jsou mořská pobřeží, horské průsmyky, hřebeny hor a pod. nabízejí větrné podmínky s průměrnou rychlostí nad  $9 \text{ ms}^{-1}$ . Průměrná rychlost větru v České republice je přibližně  $4,5 \text{ ms}^{-1}$ .



Obr. 3.1.: Větrná farma Cap Chat (Canada)

Bohužel s větrnými turbínami jsou spojovány některé nepříznivé vlivy:

- estetický vliv na krajinu,
- změny mikroklimatu,
- hluk a nízkofrekvenční hluk,
- usmrčení ptáků,
- stroboskopický efekt,
- odpadávaní ledu



## 3.2 Větrné motory

**Větrné** motory přeměňují kinetickou energii větru na mechanickou energii hřídele. Wind **engines** convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy of the shaft. Jsou dva principy pro uskutečnění této přeměny.

### 3.2.1 Odporové rotory

**Odporové** rotory na takovém principu, že proud vzduchu tlačí na lopatku kladoucí mu odpor a tím je vyvozována na lopatku síla.

Funkčnost je založena na různém odporovém součiniteli na přední a zadní straně lopatky. Pro nastavení odporu jsou často používány různé zákryty a závěsy. Charakteristická je také svislá osa rotoru. Tyto rotory obvykle mohou velmi dobře využít nízké rychlosti větru, ale při vysokých rychlostech větru nemají dostatečnou účinnost.

Stroje pracující na tomto principu jsou velmi jednoduché a historicky nejstarší. Obvykle jsou používány pro malé výkony a nízké konečné využívání.

**Savoniuv rotor** užívá 2 přesazené válcové vypuklé lopatky. Přesazení lopatek slouží jako regulační organ pro různé rychlosti.



Obr. 3.2.: Savonius rotor (ZČE v Plzni)

### 3.2.2 Vztlakové turbíny

**Vztlakové turbíny** využívají vztlakovou sílu vznikající při obtékání lopatek. Lopatka musí mít aerodynamický profil vyvolávající při jeho obtékání různou rychlost na horní a spodní straně lopatky.

Turbíny pracující na tomto principu jsou všechny **vtule** s horizontální osou a turbína s vertikální osou **Darrieus**. Vrtule mohou být regulovány natáčením lopatek zatím .co Darrieus vyžaduje změnu zakřivení lopatek, což je konstrukčně obtížné.



Obr. 3.3.: Darrieus rotor (EOLE – Canada)

### 3.2.3 Turbíny s horizontální osou

**Turbína s horizontální osou** má vysoký stožár (většinou tubus) aby využila vyšších rychlostí větru ve vyšších výškách nad terénem. Vrtule pohání generátor umístěný v otáčivé gondole. K natáčení gondoly proti větru se používá kormidlo (u malých strojů) nebo jiný způsob (přes čidla, PC a servomotor pop ř. Pomocný rotor). Kruhový pohyb gondoly na stožáru je problémem pro vyvedení elektrického výkonu, protože může způsobit překroucení kabelu.

Vrtule mají propracovanou konstrukci a technologii a tyto instalace se nejvíce používají ve větrných farmách.



Obr. 3.4.: Turbína s horizontální osou (ZČU v Plzni)

### 3.2.4 Turbína s vertikální osou

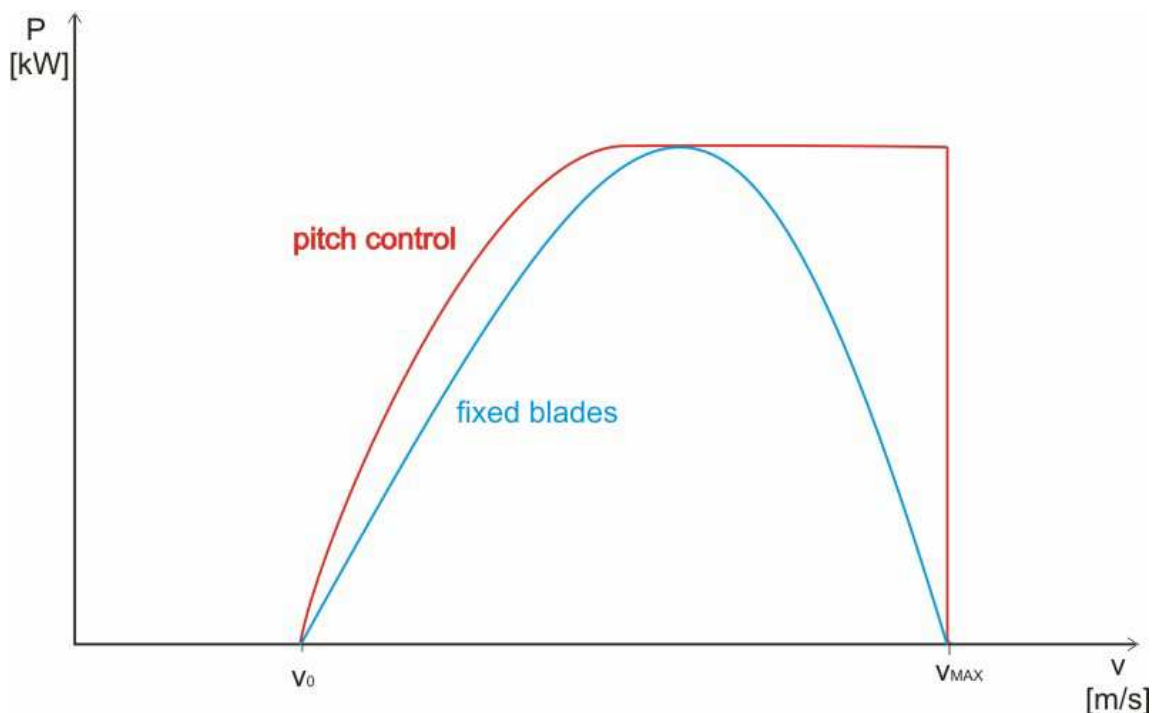
**Turbína s vertikální osou** používá stožár jako rotující osu. Generátor může být jednoduše instalován v základu, tím se vyhneme problémům rotující gondoly u horizontálních turbín. Aktuální poloha lopatek vůči směru větru může působit potíže při rozběhu a tak tyto stroje mohou využít pomocný start.

Tvar lopatek (listů) a výrobní technologie nejsou zatím dostatečně vyzkoušené a tak tyto turbíny tvoří jen zlomek ze všech instalací.

### 3.2.5 Výkonová charakteristika

Větrné turbíny potřebují dostatečný výkon větru pro rozběh a jejich chod je z bezpečnostních důvodů omezen při vysokých rychlostech větru. Moderní turbíny obvykle startují při rychlosti větru  $4 - 5 \text{ ms}^{-1}$  a bezpečnostní odstavení je kolem  $20 - 25 \text{ ms}^{-1}$ .

Levné větrné turbíny nemají regulaci a mají **pevné lopatky**. Efektivně řízené turbíny používají pitch regulaci (mají natáčivé lopatky), která činí **výkonovou charakteristiku** více plochou, jak ukazuje obr 3.5. Odstavení může být provedeno mechanickou brzdou nebo vyvěšením lopatek do praporu.



Obr. 3.5.: Výkonová charakteristika

**Výkon větrné turbíny** může být odvozen z výkonu větru (3.2.) dosazením výkonového součinitele  $c_p$ . A je aktivní plocha větrné turbíny.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot c_p \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad [3.1.]$$

**Aktivní plocha** závisí na typu turbíny. Každá turbína s horizontální osou má aktivní plochu odpovídající kruhu. Turbíny s vertikální osou mají aktivní plochu odpovídající projekci jejich obrysů.

**Výkonový součinitel** závisí na účinnosti určitého typu turbíny. Maximální skutečná účinnost je omezena a konečná hodnota se nazývá **Betzova účinnost**.

$$\eta_{\text{betz}} = 0,5926 \quad [-] \quad [3.2.]$$

**Rychlostní součinitel** je definován jako poměr mezi obvodovou rychlostí konců lopatek  $u$  a rychlostí vetru  $v$ . Obvodová rychlost může být vypočítána z průměru  $d$  a otáček  $n$  (1/min).

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot v} \quad [-] \quad [3.3.]$$

Rychlost větru je klíčový parametr pro návrh turbíny. Čím vyšší je jmenovitá rychlost větru tím vyšší je jmenovitý výkon turbíny.

Jmenovitá rychlost větru však musí odpovídat skutečným větrným podmínkám.

$$v_{no\ min\ al} \leq 2,5 \cdot v_{aver} \quad [3.4.]$$

### 3.3 Vlastnosti větru

**Vítr** vzniká na základě nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu a atmosférických vrstev nad ním z několika důvodů. Za prvé, povrch je nerovnoměrně ozařován během dne a noci, vliv má také sklon zemské osy a oblačnost. Dále, různé části povrchu mají různou absorpční schopnost a tepelnou kapacitu. Konečně pak struktura a morfologie povrchu ovlivňuje přenos tepla do atmosféry. Vzniká tlakový rozdíl mezi místy s nižším a vyšším tlakem. Teplejší vzduch stoupá nahoru a těžší chladný vzduch proudí na jeho místo.

Energie větru patří mezi nevyčerpatelné s původem ve Slunci. Bohužel větrná energie má některé specifické vlastnosti, které působí velké potíže při jejím technické využití.:

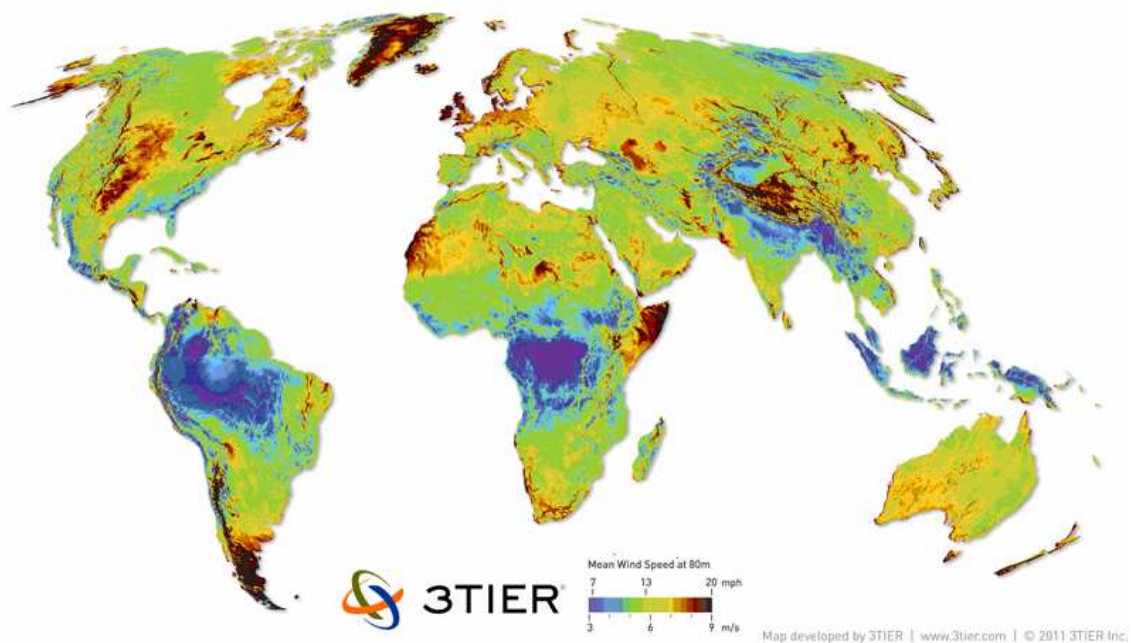
- nepředvídatelný výkon proměnný v čase
- nepředvídatelný a proměnlivý směr

#### 3.3.1 Rychlost a směr větru

Velmi důležitý parameter charakterizující vítr je **okamžitá rychlost větru**. Ta může být přímo měřena různými typy anemometrů (žhavený drátek, miskový, a pod.) Tato hodnota je často doplňována **okamžitým směrem větru**.

**Průměrná rychlost větru** může být vypočítána jako aritmetický průměr zaznamenaných okamžitých rychlostí větru. Tato hodnota je obvykle použita jako základní údaj o velikosti větru v dané lokalitě.

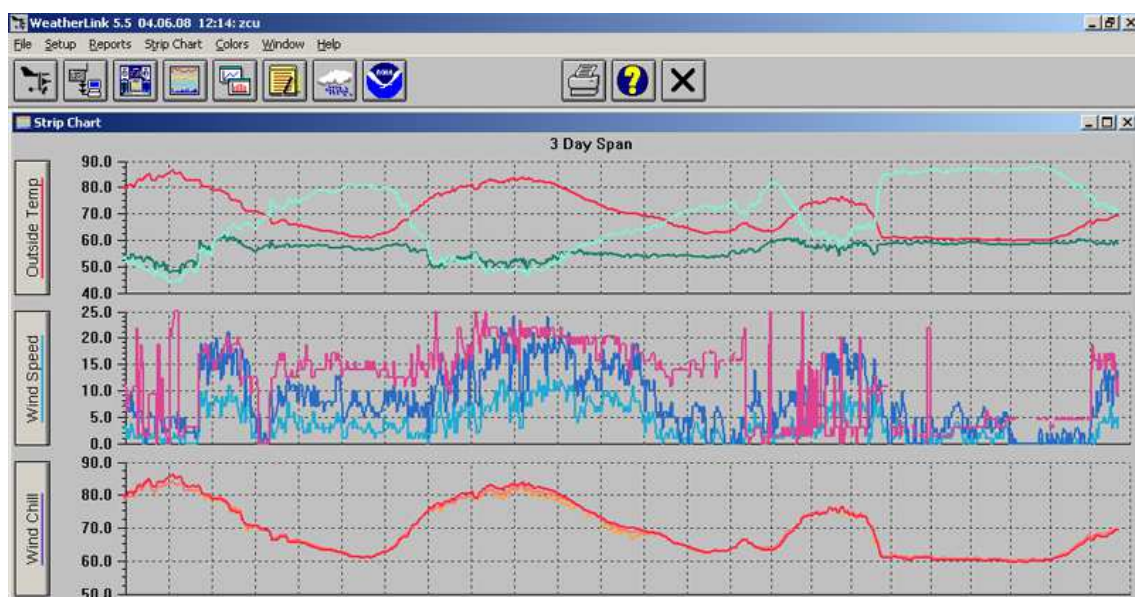
**Převládající směr větru** může být určen ze zaznamenaných okamžitých směrů větru. Tato hodnota je obvykle používána jako druhý údaj o větrných podmínkách v lokalitě zobrazený jako větrná růžice (mapa).



Obr. 3.6.: Průměrná rychlost v 80 m

Rychlost větru závisí na výšce nad terénem vzhledem ke tření mezi atmosférou a zemským povrchem. Rychlost  $v$  ve výšce  $h$  lze určit z referenční rychlosti  $v_r$  v referenční výšce  $h_r$ . Morfologie povrchu je popsána součinitelem  $n$  který je uveden v tabulkách.

$$v = v_r \left( \frac{h}{h_r} \right)^n \quad [\text{ms}^{-1}] \quad [3.5.]$$



Obr. 3.7.: Záznam rychlosti větru

### 3.3.2 Energie větru

**Energie větru** lze vypočítat jako kinetickou energii vzduchové masy s hmotností  $m$  pohybující se rychlostí  $v$

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad [3.6.]$$

Masa může být určena z objemu  $V$  vzduchu a měrné hmotnosti  $\rho$ .

$$m = V \cdot \rho \quad [\text{kg}] \quad [3.7.]$$

Objem lze vyjádřit jako útvar s průřezem  $A$  a délkou  $h$ .

$$V = A \cdot h \quad [\text{m}^3] \quad [3.8.]$$

Délka  $h$  odpovídá vzdálenosti, kterou vítr s rychlostí  $v$  urazí za čas  $t$ .

$$h = v \cdot t \quad [\text{kg}] \quad [3.1.]$$

**Teoretický výkon větru** můžeme stanovit z rovnice 3.6. dosazením hodnot z rovnic 3.7., 3.8. a 3.1.

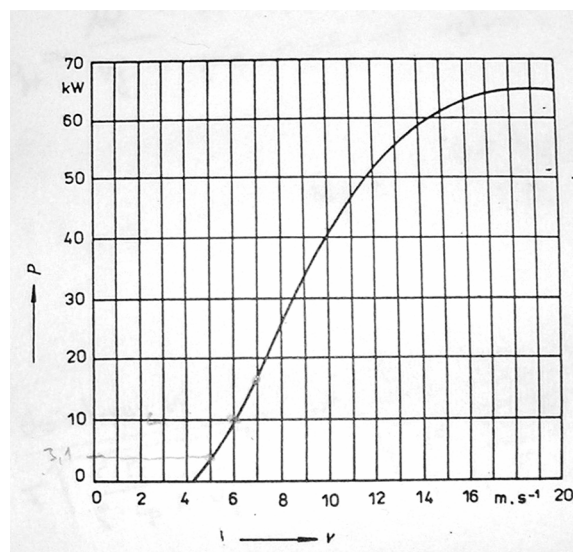
$$P_{\text{theor}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad [3.2.]$$



### 3.4 Cvičení

20. Vysvětlete původ energie větru.
21. Jaké jsou hlavní nevýhody větrné energie?
22. Jaká je maximální skutečná účinnost větrné turbíny?
23. Vysvětlete pojem "rychlostní součinitel".
24. Na jakém aerodynamickém principu pracuje větrná turbína Savonius?
25. Vypočítejte teoretický výkon větru z jednotkové plochy. Rychlost větru je  $v = 10 \text{ ms}^{-1}$  a hustota vzduchu  $\rho = 1,2 \text{ kgm}^{-3}$ .
26. Stanovte roční výrobu ve třech polohách s rozdílnou průměrnou rychlostí ( $A = 4 \text{ ms}^{-1}$ ,  $B = 5 \text{ ms}^{-1}$  and  $C = 6 \text{ ms}^{-1}$ ). Výkonová charakteristika turbíny je v grafu.

| Speed<br>[m/s] | Count [h] |        |        |
|----------------|-----------|--------|--------|
|                | A         | B      | C      |
| < 5            | 5764,1    | 4686,6 | 3810,6 |
| 5              | 928,6     | 946,1  | 928,6  |
| 6              | 657,0     | 779,6  | 805,9  |
| 7              | 473,0     | 630,7  | 683,3  |
| 8              | 332,9     | 481,8  | 560,6  |
| 9              | 227,8     | 350,4  | 446,8  |
| 10             | 148,9     | 262,8  | 359,2  |
| 11             | 96,4      | 201,5  | 280,3  |
| 12             | 52,6      | 140,2  | 219,0  |
| 13             | 35,0      | 96,4   | 166,4  |
| 14             | 17,5      | 61,3   | 140,2  |
| 15             | 17,5      | 43,8   | 96,4   |
| 16             | 8,8       | 26,3   | 70,1   |
| 17             | 0,0       | 26,3   | 61,3   |
| 18             | 0,0       | 17,5   | 43,8   |
| 19             | 0,0       | 8,8    | 26,3   |
| 20             | 0,0       | 0,0    | 17,5   |
| > 20           | 0,0       | 0,0    | 43,8   |



Obr. 3.8.: Tabulka rychlosti větru v polohách A, B, C a a výkonová charakteristika turbíny

### 3.5 Odpovědi

20. Vítr vzniká na základě nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu a nízkých vrstev atmosféry nad ním. Vzniká tlakový rozdíl mezi místy s nižším a vyšším tlakem vyvolaný tím, že lehčí teplý vzduch stoupá nahoru a na jeho místo se tlačí studený vzduch.
21. Hlavními nevýhodami větrné energie jsou nepředvídatelná proměnlivá rychlost větru a nepředvídatelný proměnlivý směr větru.
22. Maximální skutečná účinnost se nazývá Betzova účinnost a je 0,5926.
23. Rychlostní součinitel je poměr mezi obvodovou rychlostí konců lopatek a rychlostí větru.
24. Savoniusova turbína využívá odporový princip. To znamená, že proud vzduchu tlačí na lopatku kladoucí mu odpor a tím je vyvozována na lopatku síla.
25. Pro výpočet může být užita rovnice 3.7. Výkonový součinitel  $c_p = 1$  (teoretická hodnota).

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot c_p \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad [3.3.]$$

Výkon větru je 600 W nebo 600 Wm<sup>-1</sup>.

26. Příklad výpočtu pro polohu B je ukázán v tabulce. Výkon turbíny a rychlost větru je možné odečít z tabulky a výkonové charakteristiky na obr. 3.8. Celková vyrobená energie je součtem částečných hodnot na obr. 3.1.

| Speed [m/s]   | Power [kW] | Count [h] | Energy [kWh] |
|---------------|------------|-----------|--------------|
| 5             | 3,1        | 946,1     | 2932,8       |
| 6             | 8,9        | 779,6     | 6938,8       |
| 7             | 16,6       | 630,7     | 10470,0      |
| 8             | 25,1       | 481,8     | 12093,2      |
| 9             | 32,9       | 350,4     | 11528,2      |
| 10            | 40,2       | 262,8     | 10564,6      |
| 11            | 46,3       | 201,5     | 9328,5       |
| 12            | 51,0       | 140,2     | 7148,2       |
| 13            | 55,4       | 96,4      | 5338,3       |
| 14            | 58,6       | 61,3      | 3593,4       |
| 15            | 61,2       | 43,8      | 2680,6       |
| 16            | 63,0       | 26,3      | 1655,6       |
| 17            | 64,3       | 26,3      | 1689,8       |
| 18            | 65,0       | 17,5      | 1138,8       |
| 19            | 65,0       | 8,8       | 569,4        |
| 20            | 65,0       | 0,0       | 0,0          |
| Total energy: |            |           | 87670,1      |

Obr. 3.1.: Výpočet roční výroby v poloze B

Roční výroba energie v poloze B je 87 670 kWh.

Poloha A vyrobí ročně 50 080 kWh zatím co poloha C vyrobí ročně 126 405 kWh.

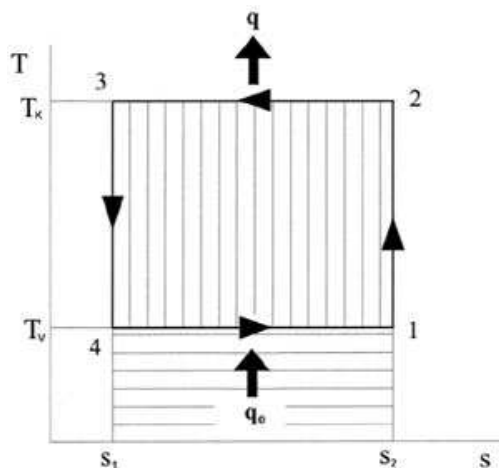
## 4 Tepelná čerpadla

Nízkopotenciální teplo obsažené ve vodě, vzduchu a v zemi lze těžko využívat přímo vzhledem k jeho nízkým teplotám. Pomocí tepelných čerpadel lze odnímat toto teplo okolnímu prostředí a převádět je na vyšší teplotní hladinu k dalšímu použití – většinou k vytápění a ohřevu užitkové vody.

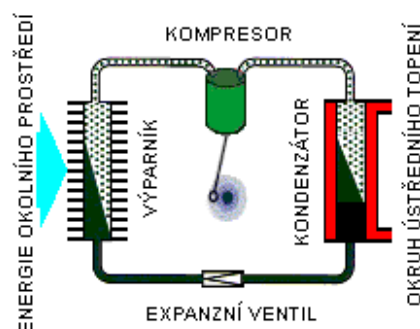
### 4.1 Princip činnosti tepelného čerpadla:

Tepelné čerpadlo technicky odpovídá chladicímu agregátu s výparníkem umístěným u zdroje tepla. Teplo je odebíráno varem a odpařováním teplonosné látky (chladiwa) ze zdroje tepla. Páry teplonosné látky jsou pak převedeny na vyšší tlak do srážníku (kondenzátoru) kde při vyšší teplotní hladině kondenzují (zkapalní) a předají své teplo.

Za ideálních podmínek lze považovat tepelné čerpadlo za stroj pracující v obráceném Carnotově oběhu.



#### PRINCIP TEPELNÉHO ČERPADLA



Na obrázku je tento oběh znázorněn v diagramu  $T - s$ . Celý oběh můžeme rozdělit na 4 fáze:

4 – 1 je isotermické vypařování chladiva ve výparníku

1 – 2 je izoentropická komprese v kompresoru

2 – 3 je izotermická kondenzace ve srážníku (kondenzátoru) – chladivo zkapalní

3 – 4 je izoentropická expanze (snížení tlaku přes redukční ventil)

Celý proces se neustále opakuje, ve výparníku se odebírá teplo ze zdroje na nízké teplotní úrovni, vypařené chladivo se stlačí v kompresoru a kondenzuje (zkapalní) na vyšší teplotní úrovni ve srážníku (kondenzátoru) – získané teplo využijeme – a přes redukční ventil kapalně chladivo expanduje na původní tlak.

T – s diagram je vhodný pro znázorňování množství energie v oběhu:

Plocha 4-1-2-3-4- představuje mechanický ekvivalent práce (W), kterou musíme do oběhu vložit

Plocha s1-s2-1-4-s1 – představuje odebrané teplo ze zdroje (q<sub>0</sub>)

Plocha s1-s2-2-3-s1 – představuje teplo uvolněné ve srážníku (kondenzátoru) (q = q<sub>1</sub> + W), které lze využít

## 4.2 Topný faktor $\varepsilon$ (COP)

Poměr tepla q, které lze využít k tepelnému ekvivalentu mechanické práce W se pak označuje jako topný faktor. Pro **topný faktor**  $\varepsilon$  se užívá zkratky **COP** (Coefficient of performance) a jeho teoretická hodnota stanovená z uvedeného Carnotova oběhu je.

$$\varepsilon = \frac{q}{W} = \frac{T_k}{[(T)_k - T_v]}$$

Je to bezrozměrná veličina, která udává kolikrát více tepla získáme oproti práci dodané do oběhu. Tak např. dodáme-li do oběhu 3 kWh a  $\varepsilon$  bude 3, získáme 9 kWh užitečného tepla. Dle výše uvedeného vztahu můžeme vypočítat teoretický topný faktor pro různé teploty vypařování a kondenzace. Dosavadní úvahy se týkaly ideálních podmínek a teoretických hodnot odvozovaných z Carnotova oběhu.

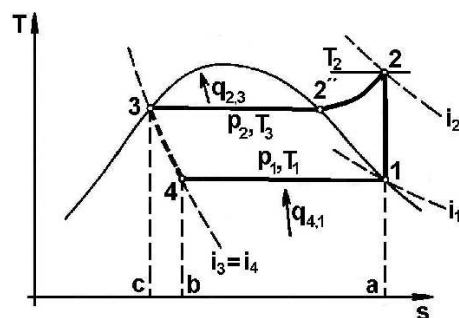
Skutečný topný faktor ( $\varepsilon_{\text{ef}}$ ) je nižší a pohybuje kolem 0,45 až 0,65 teoretického  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon_{\text{ef}} = (0,45 - 0,65) \varepsilon$$

$\varepsilon_{\text{ef}}$  se pohybuje u tepelných čerpadel v rozsahu 2,5 – 4.

Je to dáno tím, že:

- skutečný tepelný oběh odpovídá oběhu Clausius - Rankinovu, který je od Carnotova poněkud odlišný
- skutečná velikost teplotního rozdílu mezi  $T_k$  (srážník) a  $T_v$  (výparník) je nižší díky odlišnostem při reálných přestupech tepla
- hnací motor i další pomocná zařízení pracují ze ztrátami



### Obrácený Clausius - Rankinův oběh kompresorového tepelného čerpadla

Chlazení látek je založené na II. zákonu termodynamiky, podle kterého teplo může samovolně přecházet z vyšší teplotní hladiny na nižší. Tepelné čerpadlo pracuje zdánlivě proti tomuto zákonu, když přepravuje teplo z nižší na vyšší teplotu. Nejde však o samovolný proces neboť se tak děje až po přivedení určitého množství energie zvenčí do tepelného oběhu.

## Chladivo

Chladivo je chemická látka nebo směs látek používaná k přenosu tepla v tepelném cyklu, ve kterém podléhá fázové přeměně z plynu na kapalinu a zpět. Chladivo musí mít dobré termodynamické vlastnosti, musí být nekorozivní a bezpečné. Vhodné vlastnosti v tomto směru mají freony, které se v chladicí technice široce používaly. Odhalení potenciálně zhoubných účinků tvrdých freonů (CFC) na konci 80. let minulého století a později měkkých freonů (HCFC) na ozonovou vrstvu vedlo k jejich postupné náhradě chladivy na bázi fluorovaných uhlovodíků (HFC) ve většině chladicích systémů. Rozšířenými chladivy jsou v současnosti např. látky s označením R-410a (bod varu  $-51,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), R-407c, R-134a a jiné., které nepoškozují ozonovou vrstvu ale patří mezi skleníkové plyny. V současné době jsme svědky postupného přechodu od syntetických chladiv k přírodním.

Zajímavou alternativou se stává čpavek (bod varu  $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), který byl doposud tradičně používán ve velkých chladírenských průmyslových systémech. Je levný, ekologický a energeticky účinný. Jeho jedinou nevýhodou je jeho toxicita, která díky použití nových technologií již není rozhodující. Nejúčinnější způsob, jak zmírnit riziko spojené s jeho toxicitou, je snížit objem chladiva pomocí nových typů výměníků tepla. Za velmi nadějná řešení jsou považovány technologie využívající k chlazení oxid uhličitý.

.

## Systémy tepelných čerpadel

Podle toho jakým způsobem se děje odsávání par z výparníku a zvyšování jejich tlaku se dělí tepelná čerpadla na:

- Kompresorová tepelná čerpadla – to je nejběžnější typ. Kompresor může být poháněn elektromotorem (to je nejčastější typ) ale může také k pohonu využívat spalovací motor (plynový, benzinový, diesel)

- Absorpční tepelná čerpadla – tlak par je zvyšován pochodem absorpce chladiva do roztoku, jeho přečerpáním do vypuzovače a následným vypuzením chladiva z roztoku při kondenzační teplotě. Hnací energie je dodávána ve formě tepla (pára, horká voda, spalování)
- Hybridní tepelná čerpadla - kombinují prvky kompresorových a absorpčních chladicích cyklů. Pracovní látka je vícesložková (chladiivo + absorbent), transport a stlačování par chladiva zajišťuje kompresor.

## Druhy tepelných čerpadel

Podle toho jaké medium ochlazujeme a jaké ohříváme dělíme tepelná čerpadla na:

vzduch/voda – univerzální typ, pro ústřední vytápění

vzduch/vzduch – pro teplovzdušné vytápění, klimatizaci

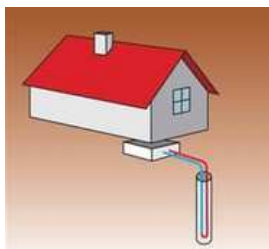
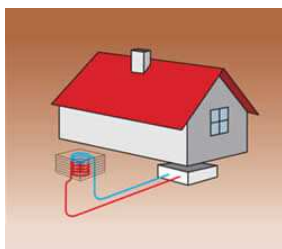
voda/voda – univerzální typ, pro ústřední vytápění

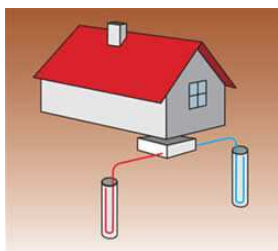
voda/vzduch – pro teplovzdušné vytápění

nemrznoucí kapalina/voda – univerzální typ, pro ústřední vytápění

## Zdroje nízkopotenciálního tepla pro tepelná čerpadla

- A. Z okolního vzduchu – ve výměníku se ochlazuje vzduch. Výměník může být vně nebo uvnitř budovy
- B. Z podloží – využívají se hlubinné vrty s plastovým výměníkem. Na 1 kW výkonu TČ je potřeba 12 až 18 m vrtu podle geologických podmínek. Výhodou je velmi dobrý celoroční topný faktor. TČ země/voda.
- C. Z půdy – půda se ochlazuje plastovým výměníkem ve formě půdního kolektoru umístěného v nezamrzlé hloubce (plocha musí být 3x větší než plocha vytápěná) nebo výkopovým kolektorem uloženým ve formě smyček v hloubce 2 m (na 1 kW výkonu TČ je potřeba 5 až 8 m výkopu dle geologických podmínek.
- D. Z podzemní vody – systém dvou studní – zdrojová odkud teplo odebíráme a vsakovací kam ochlazenou vodu vracíme
- E. Z povrchových vod – výměník naplněný nemrznoucí kapalinou ve vodním toku, rybníku, apod.
- F. Z odpadního tepla - odpadní teplo z technologických procesů., z odpadního vzduchu





A [2]

B [2]

C [2]

D [2]

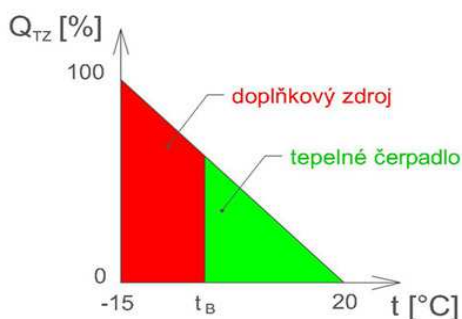
## Využití tepelných čerpadel

Používají k vytápění objektů a k ohřevu užitkové vody. Tepelné čerpadlo dokáže ohřát vodu na 55 °C, v některých případech dokonce až na 65 °C a speciální vysokoteplotní čerpadlo dokáže ohřát vodu až na 75 °C. Používání tepelného čerpadla je výhodné ve spojení s nízkoteplotním vytápěcím systémem – nejlépe s podlahovým vytápěním.

Důležité je také uvážit jakým způsobem pokrýt spotřebu tepla v objektu během roku. Pro pokrytí celé spotřeby tepelným čerpadlem bychom museli zvolit takový výkon (drahé TČ) aby i v největších mrazech byla spotřeba pokryta. Tato situace trvá jen pár dní v roce. Je pak běžná situace, že tepelné čerpadlo je kombinováno ještě s jiným zdrojem (většinou elektrokotlem.) a pracuje v bivalentním provozu. Obvykle je výkon navržen tak aby TČ pokrylo 60% až 80% potřebného topného výkonu a zbytek pokrývá doplňkový zdroj. Bod bivalence udává teplotu venkovního vzduchu (obvykle se volí -5°C), pod kterou již výkon tepelného čerpadla nestačí pokrýt potřebu tepla vytápěného objektu a je třeba „chybějící“ výkon pokrýt doplňkovým zdrojem tepla. Varianty bivalentního provozu mohou být různé (viz dále):

### Alternativně-bivalentní provoz [1]

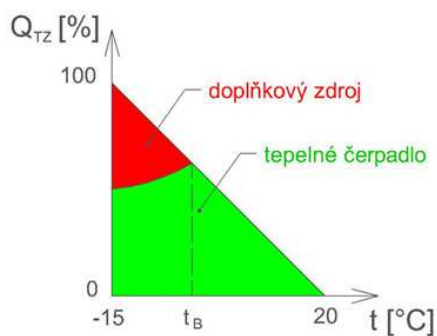
Při nízkých teplotách je tepelné čerpadlo odstaveno a teplo dodává doplňkový zdroj



### Paralelně-bivalentní provoz [1]

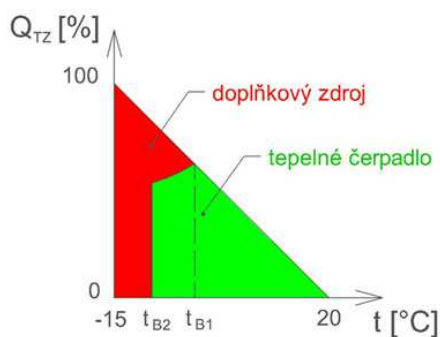
Celou topnou sezonu je tepelné čerpadlo v provozu. Při nízkých teplotách je v provozu společně s doplňkovým zdrojem.





### Částečně paralelně-bivalentní provoz [1]

Při nízkých teplotách je tepelné čerpadlo odstaveno, před tím pracuje společně s doplňkovým zdrojem.



Použité odborné prameny:

[1] Tvrdý, M.: BIVALENTNÍ SYSTÉM S TEPELNÝM ČERPADLEM VZDUCH-VODA,

Bakalářská práce, VUT Brno, 2008

[2] <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-prostredi-geothermalni-energie-tepelna-čerpadla>

## Fotogalerie



Tepelná čerpadla vzduch – voda



Tepelná čerpadla země-voda (voda-voda)



#### 4.3 Cvičení:

1. Popište obecný princip tepelného čerpadla
2. K jakému účelu slouží u tepelného čerpadla výparník a srážník?
3. Jaké jsou hlavní části kompresorového tepelného čerpadla
4. Která plocha v T-s diagramu představuje tepelný ekvivalent práce, kterou musíme do oběhu tepelného čerpadla přivést?
5. Vysvětlete pojem topný faktor, uveďte jeho rozměr a obvyklou velikost.
6. Hlavní částí všech tepelných čerpadel je kompresor. Je toto tvrzení správné?

7. Jaký je bod varu čpavku?
8. Uveďte možné zdroje tepla pro tepelná čerpadla.
9. Který typ vytápění je vhodný pro spojení s tepelným čerpadlem a proč?
10. Jaká chladiva se užívají v tepelných čerpadlech a která jsou perspektivní?
11. Co si představujete pod pojmem bivalentní bod při provozu tepelných čerpadel?
12. Na jakou teplotu dokáže tepelné čerpadlo ohřát vodu?
13. Jaký je teoretický topný faktor v případě, že zdroj tepla má  $8^{\circ}\text{C}$  a teplota na výstupu z tepelného čerpadla je  $45^{\circ}\text{C}$ ?
14. Jaké množství vody je potřebné odebírat ze zdrojové studny (systém dvou studní) pro vytápění domu s potřebným topným výkonem  $6,5\text{ kW}$ , má-li TČ topný faktor 3,2 a ochlazení vody může být jen  $3^{\circ}\text{C}$ ?

## 4.4 Řešení

1. Viz text
2. Výparník slouží k odvodu tepla ze zdroje a srážník k předávání tepla k využití
3. Hlavní části jsou – výparník, kompresor, srážník a redukční ventil
4. Plocha 4-1-2-3-4
5. Topný faktor  $\varepsilon$  je poměr získaného tepla z oběhu k tomu které musím do oběhu dát.

Je to bezrozměrné číslo a skutečná hodnota bývá mezi 2,5 až 4

6. Není, absorpční tepelné čerpadlo kompresor nemá
7.  $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$
8. Podloží, půda, voda (povrchová i podzemní), vzduch, odpadní teplo.
9. Podlahové vytápění protože nevyžaduje vysoké výstupní teploty
10. Užívají se některé povolené druhy freonů, perspektivní je čpavek a oxid uhličitý
11. Je to venkovní teplota, do které tepelné čerpadlo pokrývá celý potřebný topný výkon
12. Obvyklá teplota je  $55^{\circ}\text{C}$ , nověji i výše
13. Vyjdeme ze vztahu pro teoretický topný faktor

$$\varepsilon = \frac{q}{w} = \frac{T_k}{[(T)_k - T_v]} = \frac{T_k}{[(T)_k - T_v]}$$

$T_k = 273,15 + 45 = 318,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $T_v = 273,15 + 8 = 281,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  . z toho pak po dosazení

vychází  $\varepsilon = 8,6$

14. Topný výkon  $P_t = 6,5 \text{ kW}$ , z toho při  $\epsilon = 3,2$  je příkon kompresoru  $P_k = \frac{P_t}{\epsilon} = 2,03 \text{ kW}$

Potřebuji tedy z vody získat výkon  $P_t - P_k = P_v = 6,5 - 2,03 = 4,47 \text{ kW}$

Pro výkon obsažený ve vodě platí vztah  $P_v = m \cdot c_p \cdot \Delta t \text{ kJ/kg}$

$c_p$  je pro vodu  $4,18 \text{ kJ/kgK}$ ;  $\Delta t = 3 \text{ }^\circ\text{C}$  a chceme vypočítat množství vody  $m$  v kg/s,

které **budeme potřebovat k získání výkonu  $P_v$**

$m =$

$$\frac{P_v}{\epsilon \cdot c_p} = 4, \frac{47}{3,2 \cdot 3} = 0,466 \text{ kg/s}$$