

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zhodnocení energetického potenciálu vodního toku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Adam SLOVÁČEK
Osobní číslo:	E19N0012P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Komerční elektrotechnika
Téma práce:	Zhodnocení energetického potenciálu vodního toku
Zadávací katedra:	Katedra materiálů a technologií

Zásady pro vypracování

1. Popište aktuální využití energetického potenciálu zvoleného vodního toku.
2. Stanovte teoretickou hodnotu energetického potenciálu.
3. Zhodnoťte možnosti lepšího energetického využití modelového vodního toku.
4. Navrhněte konkrétní technické řešení.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Podle domluvy s vedoucím

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**




L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na zhodnocení energetického potenciálu vodního toku. Zjištění teoretického energetického potenciálu a jeho porovnání s aktuálním energetickým potenciálem vybraného toku. Dále je navrženo technické řešení pro zvýšení potenciálu. Zahrnuto je historie, vývoj a rozvoj vodních zdrojů energie a turbín.

Klíčová slova

Energetický potenciál vodního toku, vodní energie, vodní elektrárna, turbína, historie, vývoj

Abstract

The thesis presents an evaluation of the energy potential of water stream. Determination of the theoretical energy potential and its comparison with the current energy potential of selected water stream. Furthermore, a technical solution to increase the potential is proposed. Included are a basic analysis of hydro energy sources and turbines, their history and technical specifications.

Key words

Energy potential of a water stream, hydro energy, hydro power, turbine, history, development

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2022

Adam Slováček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
1 VODNÍ ENERGIE	11
1.1 HISTORIE VODNÍ ENERGIE	11
1.2 APLIKOVATELNOST VODNÍ ENERGIE	14
1.2.1 <i>Mechanická aplikace</i>	14
1.2.2 <i>Elektrina</i>	20
1.2.3 <i>Síla deště</i>	28
2 VODNÍ TURBÍNY	29
2.1 HISTORIE	29
2.2 VÍŘENÍ	29
2.3 TEORIE PROVOZU	32
2.4 ROZDĚLENÍ TURBÍN	32
2.4.1 <i>Reakční turbíny</i>	32
2.4.2 <i>Impulsní turbíny</i>	33
2.5 TYPY TURBÍN	33
2.5.1 <i>Francisova turbína</i>	33
2.5.2 <i>Kaplanova turbína</i>	35
2.5.3 <i>Tysonova turbína</i>	37
2.5.4 <i>Deriazova turbína</i>	37
2.5.5 <i>Peltonova turbína</i>	37
2.5.6 <i>Bánkiho turbína</i>	39
3 ZHODNOCENÍ ENERGETICKÉHO POTENCIÁLU ŘEKY BEROUNKY	42
3.1 MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY NA BEROUNCE.....	42
3.1.1 <i>MVE Černošice</i>	42
3.1.2 <i>MVE Dolní Mokropsy</i>	43
3.1.3 <i>MVE Dobřichovice</i>	44
3.1.4 <i>MVE Řevnice</i>	45
3.1.5 <i>MVE Zadní Třebáň</i>	46
3.1.6 <i>MVE Beroun</i>	47
3.1.7 <i>MVE Hýskov</i>	48
3.1.8 <i>MVE Nižbor</i>	49
3.1.9 <i>MVE Sýkořice</i>	50
3.1.10 <i>MVE Roztoky</i>	51
3.1.11 <i>MVE Nezabudice</i>	52
3.1.12 <i>MVE Šlovice</i>	53
3.1.13 <i>MVE Zvíkovec</i>	54
3.1.14 <i>MVE Lejskův mlýn</i>	55
3.1.15 <i>MVE Libštejnský mlýn</i>	56
3.1.16 <i>MVE Olešná I. a II.</i>	57
3.1.17 <i>MVE Kaceřovský mlýn</i>	58
3.1.18 <i>MVE Darová</i>	59
3.1.19 <i>MVE Valentovský mlýn</i>	60
3.1.20 <i>MVE Bukovec (mlýn)</i>	61
3.1.21 <i>MVE Bukovec (papírna)</i>	62
3.2 ZHODNOCENÍ ENERGETICKÉHO POTENCIÁLU	63
3.3 TEORETICKÝ HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL	63
3.4 ZHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ.....	64

3.5	VLASTNÍ TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	65
3.5.1	<i>Lokalita</i>	65
3.5.2	<i>Vodohospodářská situace</i>	66
3.6	NÁVRH MVE.....	66
ZÁVĚR		75
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		76
SEZNAM OBRÁZKŮ		82

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na zhodnocení energetického potenciálu vodního toku Berounka. Možnosti lepšího zužitkování možného potenciálu.

Text je rozdělen do 3 částí. První část se zabývá vodní energií. Na začátku je zmíněn vývoj od starověku, kdy se vodní energie používala pro pohody různých zařízení např. mlýnů a hamrů. Dále v průběhu staletí až po Průmyslovou revoluci. Následuje aplikovatelnost vodní energie. Z hlediska mechanického využití vodního kola a jeho rozdělení. Z hlediska elektrické energie rozdělení vodních elektráren podle typu, velikosti a druhu. Jejich výhody a nevýhody.

Druhá část uvádí vodní turbíny. První úsek obecně popisuje historii turbín, navazuje rozdělení vodních turbín na regulační a impulzní. Pokračuje představení jednotlivých typu, začínající Francisovo turbínou, Kaplanovo, Tysonova, Deriazova následně Peltonova a nakonec Bánkiho turbína. U každé turbíny je vysvětlen její princip a konstrukce.

Třetí a poslední část je zaměřena na zhodnocení aktuálního vodního potenciálu toku Berounka. Představeny jsou všechny malé vodní elektrárny (MVE) na jejím toku. Je určen teoreticky maximální energetický potenciál a zda je naplněn. Závěrečný úsek je soustředěn na vlastní návrh technického řešení pro zlepšení energetického potenciálu toku.

1 Vodní energie

Vodní energie je použití padající nebo rychle tekoucí vody k výrobě elektřiny nebo k pohonu strojů. Toho je dosaženo přeměnou gravitačního potenciálu nebo kinetické energie vodního zdroje na výrobu energie. Vodní energie je metoda udržitelné výroby energie.

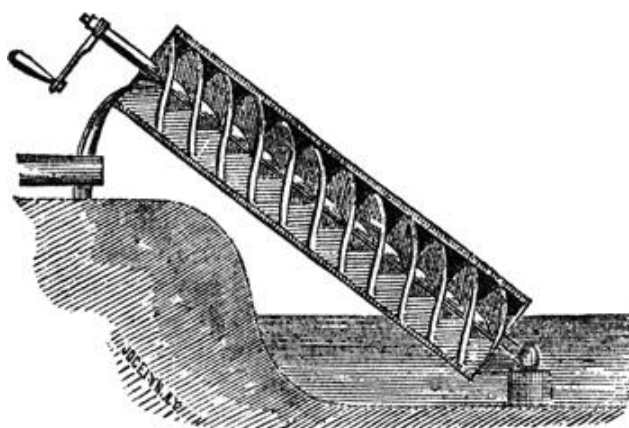
Od starověku se vodní energie z vodních mlýnů používala jako obnovitelný zdroj energie pro zavlažování a provoz mechanických zařízení, jako jsou mlýny, pily, textilky, kladiva, přístavní jeřáby, domácí výtahy a rudné mlýny. Trompe, který produkuje stlačený vzduch z padající vody, je někdy používán k pohonu jiných strojů na dálku.

Vodní energie se nyní používá hlavně pro výrobu energie z vodních elektráren a také se používá jako systém skladování energie známého jako přečerpávací vodní elektřina.

Vodní energie je atraktivní alternativou k fosilním palivům, protože přímo neprodukuje oxid uhličitý ani jiné látky znečišťující ovzduší a poskytuje relativně konzistentní zdroj energie. Má však ekonomické, sociologické a ekologické nevýhody a vyžaduje dostatečně energetický zdroj vody, jako je řeka nebo vyvýšené jezero. Mezinárodní instituce považují vodní energii za nízkouhlíkový prostředek hospodářského rozvoje. [8,9]

1.1 Historie vodní energie

Lidé využívají vodu k výkonu práce po tisíce let. Řekové používali vodní kola k mletí pšenice na mouku před více než 2000 lety, zatímco Egypťané používali Archimedovy vodní šrouby (*Obr. 1.*) k zavlažování během třetího století před naším letopočtem. [8,9]



Obrázek 1: Archimedův vodní šroub

Koncem 18. století poskytovala hydraulická energie zdroj energie potřebný pro začátek průmyslové revoluce. V polovině 70. let 18. století publikoval francouzský inženýr Bernard Forest de Bélidor (*Obr. 2.*) *Architecture Hydraulique*, která popisovala hydraulické stroje s vertikální a horizontální osou, a v roce 1771 sehrála významnou roli kombinace vodní síly a nepřetržité výroby Richarda Arkwrighta k rozvoji továrního systému s moderními postupy zaměstnávání. [8,9]



Obrázek 2: Bernard Forest de Bélidor

Ve 40. letech 19. století byla vyvinuta hydraulická energetická síť k výrobě a přenosu vodní energie ke koncovým uživatelům. Koncem 19. století byl vyvinut elektrický generátor a mohl být nyní spojen s hydraulikou. Potenciál rostoucí poptávky pocházející z průmyslové revoluce byl také jedním z největších příčin pro rozvoj. V roce 1878 byl v Anglii vyvinut první hydroelektrický systém na světě Williamem Armstrongem v Cragside v Northumberlandu. Tento systém byl používán k napájení jedné obloukové lampy v jeho

umělecké galerii. V roce 1880 bylo dynamo poháněné vodní turbínou použito k osvětlení oblouku – technika, kdy elektrická jiskra ve vzduchu mezi dvěma vodiči vytváří světlo – pro divadlo a výlohu v Grand Rapids v Michiganu. V roce 1881 poskytlo dynamo připojené k turbíně v mlýně na mouku pouliční osvětlení u Niagarských vodopádů v New Yorku. Oba používali technologii stejnosměrného proudu. První Edisonova vodní elektrárna, Vulcan Street Plant, zahájila provoz 30. září 1882 v Appletonu ve Wisconsinu s výkonem asi 12,5 kW. V roce 1886 bylo ve Spojených státech a Kanadě 45 vodních elektráren; a v roce 1889 jich bylo jen ve Spojených státech 200. Průlom ve střídavém proudu, metoda používaná dnes, umožnil přenos energie na delší vzdálenosti a zahájil první komerční instalaci v USA: vodní elektrárnu na střídavý proud v Redlands Power Plant v Kalifornii v roce 1893 (*Obr. 3.*). Elektrárna Redlands využívala Peltonova vodní kola, byla poháněná vodou z nedalekého Mill Creek a používala třífázový generátor, který zajistil konzistentní dodávku energie do širokého okolí. [8,9,12]

Na počátku 20. století bylo v horách poblíž metropolitních oblastí stavěno obchodními společnostmi mnoho malých vodních elektráren. Ve francouzském Grenoblu se konala Mezinárodní výstava vodní energie a cestovního ruchu s více než milionem návštěvníků. V roce 1920, kdy 40 % elektřiny vyrobené ve Spojených státech bylo vodních elektráren, vstoupil do zákona Federal Power Act. Zákon vytvořil Federal Power Commission k regulaci vodních elektráren na federální půdě a vodě. Jak se elektrárny zvětšovaly, jejich související přehrady vyvinuly další účely, včetně protipovodňové ochrany, zavlažování a navigace. Federální financování se stalo nezbytným pro rozvoj ve velkém měřítku a byly vytvořeny federálně vlastněné korporace, jako je Tennessee Valley Authority (1933) a Bonneville Power Administration (1937). Navíc Bureau of Reclamation, které zahájilo sérii západních amerických zavlažovacích projektů na počátku 20. století, nyní stavělo velké hydroelektrické projekty, jako je Hoover Dam z roku 1928. Armádní sbor inženýrů Spojených států byl také zapojen do rozvoje hydroelektráren, dokončil přehradu Bonneville v roce 1937 a byl uznán zákonem o kontrole povodní z roku 1936 jako přední federální agentura pro kontrolu povodní. [8,9,12]



Obrázek 3: Vodní elektrárna Redlands

Vodní elektrárny se v průběhu 20. století stále zvětšovaly. Vodní energie byla označována jako bílé uhlí. Počáteční elektrárna Hoover Dam o výkonu 1 345 MW byla v roce 1936 největší vodní elektrárnou na světě; to bylo zastíněno 6809 MW přehradou Grand Coulee v roce 1942. Přehrada Itaipu byla otevřena v roce 1984 v Jižní Americe jako největší s výkonem 14 GW, ale v roce 2008 ji překonala přehrada Three Gorges Dam v Číně s výkonem 22,5 GW. Vodní elektřina bude nakonec zásobovat některé země, včetně Norska, Demokratické republiky Kongo, Paraguaye a Brazílie, více než 85 % jejich elektřiny. [8,9,12]

1.2 Aplikovatelnost vodní energie

1.2.1 Mechanická aplikace

Vodní kolo

Vodní kolo je zařízení pro přeměnu energie padající či proudící vody na užitečné formy energie, často na hamru nebo ve vodním mlýně. Vodní kolo se skládá z kola, s řadou lopatek nebo kbelíků uspořádaných na vnějším okraji tvořícím hnací vůz. Vodní kola byla ještě ve 20. století komerčně využívána. Použití zahrnovalo mletí mouky v mlýnech, mletí dřeva na buničinu pro výrobu papíru, tepání tepaného železa, strojní obrábění, drcení rudy a drcení vláken pro použití při výrobě látek. [8,12,17,25,28]

Některá vodní kola jsou napájena vodou z mlýnského rybníka, který vzniká při přehrazení protékajícího potoka. Kanál pro vodu tekoucí do nebo z vodního kola se nazývá mlýnský náhon. Kanál přivádějící vodu z mlýnského rybníka do vodního kola se nazývá

náhon, část, kde voda opouští kolo a je zavedena zpět do vodního toku je odvodní kanál.

Vodní kola byla používána pro různé účely od zemědělství po metalurgii ve starověkých civilizacích zahrnujících helénistický řecký svět, Řím, Čínu a Indii. Vodní kola byla nadále používána ve středověké Evropě i v současném islámském světě. V polovině 18. století vědecké zkoumání vodního kola Johna Smeatona vedlo k významnému zvýšení účinnosti dodávající tolik potřebnou energii pro průmyslovou revoluci. Vodní kola začala nahrazovat menší, levnější a účinnější turbína, kterou vyvinul Benoît Fourneyron, počínaje jeho prvním modelem v roce 1827. Turbíny jsou schopny zvládnout vysoké spády nebo výšky, které přesahují možnosti vodních kol praktické velikosti. [8,12,17,25,28]

Hlavní obtíží vodních kol je jejich závislost na proudící vodě, což omezuje, kde mohou být umístěna. Moderní vodní elektrárny lze považovat za potomky vodního kola, protože také využívají pohybu vody dolů.

Základní typy vodních kol:

- a) vodorovné kolo se svislou nápravou
- b) svislé kolo s vodorovnou nápravou

Svislá kola s vodorovnou nápravou lze rozdělit podle místa dopadu vody, na horní, střední a spodní. Spodní může být jakékoli kolo, kde voda protéká pod kolem, ale obvykle to znamená, že vstup vody je na kolo nízko.

Vodní kola horní s přesahem a zpětným záběrem se obvykle používají tam, kde je dostupný výškový rozdíl větší než několik metrů. Střední kola jsou vhodnější pro velké toky s mírným náběhem. Spodní kola se vyskytovala pro velké průtoky s malým nebo žádným náběhem.

Často je zde přidružené mlýnská nádrž, rezervoár pro skladování vody a tedy i energie, dokud není potřeba. Větší náběhy akumulují více gravitační potenciální energie pro stejné množství vody, takže rezervoáry pro kola s předkusem a zadním záběrem bývají menší než pro kola s předkusem. [8,12,17,25,28]

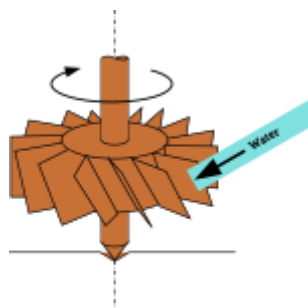
Horizontální kolo s vertikální osou

Běžně nazývané jako vanové kolo, norský mlýn nebo řecký mlýn. Horizontální kolo je primitivní a neefektivní forma moderní turbíny. Pokud však dodává požadovaný výkon, je účinnost až druhořadá. Obvykle se montuje uvnitř budovy mlýna pod pracovní podlahu. Proud vody je nasměrován na lopatky vodního kola a způsobuje jejich otáčení. Jedná se o jednoduchý systém obvykle bez ozubení, takže svislá osa vodního kola se stává hnacím vřetenem mlýna. [8,12,17,25,28]

Jízdní plochy – radlice

Voda – malý objem, vysoký tlak

Účinnost – špatná



Obrázek 4: Horizontální kolo s vertikální osou

Vertikální spodní kolo s horizontální osou

Potoční kolo je svisle namontované vodní kolo, které se otáčí vodou ve vodním toku a naráží na lopatky ve spodní části kola. Tento typ vodního kola je nejstarším typem kol vodorovné osy. Jsou také známí jako kola s volným povrchem, protože voda není omezena mlýnskými náhony nebo kolovými jámami. [8,12,17,25,28]

Tyto typy kola jsou levnější a jednodušší na stavbu a mají menší dopad na životní prostředí než jiné typy kol. Nepředstavují zásadní změnu pro řeku. Jejich nevýhodou je nízká účinnost, což znamená, že generují méně energie a lze je použít pouze tam, kde je dostatečný průtok. Typické ploché kolo s předkusem využívá asi 20 procent energie v proudu vody dopadající na kolo, jak změřil anglický stavební inženýr John Smeaton v 18. století. Modernější kola mají vyšší účinnost. [8,12,17,25,28]

Spodní kola namontovaná na plovoucích plošinách se často označují jako valbová kola a mlýn jako lodní mlýn. Někdy byly namontovány bezprostředně po proudu od mostů, kde omezení toku mostních pilířů zvýšilo rychlost proudu.

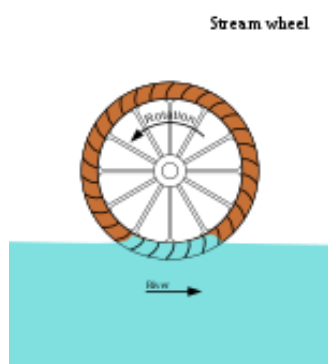
Historicky byly velmi neefektivní, ale v osmnáctém století došlo k velkému pokroku.

Spodní část kola je umístěna do tekoucí vody

Hnací plochy – lopatky – před 18. stoletím ploché, poté zakřivené

Voda – velmi velký objem, bez hlavy

Účinnost – asi 20 % před 18. stoletím a později 50 až 60 % [8,12,17,25,28]



Obrázek 5: Vertikální spodní kolo s horizontální osou

Vertikální střední kolo s horizontální osou

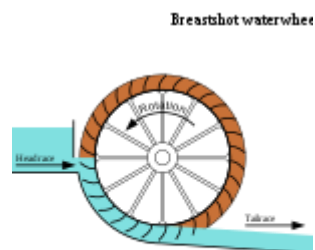
Střední kola jsou méně účinná než horní kola, ale zvládnou vysoké průtoky a následně vysoký výkon. Jsou upřednostňovány pro stálé, velkoobjemové toky. Střední kola jsou nejběžnějším typem ve Spojených státech amerických a říká se, že poháněly průmyslovou revoluci.

Voda dopadá na kolo zhruba uprostřed, obvykle mezi jednou čtvrtinou a třemi čtvrtinami výšky.

Pojezdové – polatky – pečlivě tvarované, aby bylo zajištěno hladké vnikání vody

Voda – velký objem, mírná výška

Účinnost – 50 až 60 % [8,12,17,25,28]



Obrázek 6: Vertikální střední kolo s horizontální osou

Vertikální horní kolo s horizontální osou

Vertikálně namontované vodní kolo, které se otáčí vodou vstupující do kbelíků těsně za vrcholem kola, se říká, že je přestřeleno.

Typické kolo má vodu směřovanou ke kolu nahoře a mírně za nápravu. Voda se shromažďuje v kbelících na této straně kola, takže je těžší než druhá „prázdná“ strana. Závaží otáčí kolem a voda vytéká do ocasní vody, když se kolo otáčí natolik, že převrací kbelíky. Přesahový design je velmi účinný, může dosáhnout 90 % a nevyžaduje rychlý průtok.

Téměř veškerá energie se získává z hmotnosti vody spouštěné na zadní nápravu, i když malý příspěvek může představovat kinetická energie vody vstupující do kola. Jsou vhodné pro větší hlavy než ostatní typy kol, takže se ideálně hodí do kopcovitých zemí. Nicméně i největší vodní kolo, Laxey Wheel na Isle of Man, využívá pouze hlavu kolem 30 m

Předsazená kola vyžadují ve srovnání s jinými typy kol velkou hlavu, což obvykle znamená značné investice do konstrukce hlavového kola

Pojezdové plochy – lopaty

Voda – malý objem, velká hlava

Účinnost – 80 až 90 % [8,12,17,25,28]



Obrázek 7: Vertikální horní kolo s horizontální osou

1.2.2 Elektřina

Vodní elektřina je největší vodní aplikace. Výroba vodní energie začíná přeměnou buď potenciální energie vody, která je přítomna v důsledku nadmořské výšky místa, nebo kinetické energie pohybující se vody na elektrickou energii.

Vodní elektrárny se liší způsobem, jakým sbírají energii. Jeden typ zahrnuje přehradu a nádrž. Voda v nádrži je na vyžádání k dispozici pro výrobu elektřiny průchodem kanály, které spojují přehradu s nádrží. Voda roztáčí turbínu, která je napojena na generátor vyrábějící elektřinu.

Druhý typ se nazývá průtočná. V tomto případě je postavena hráz pro kontrolu průtoku vody, chybí nádrž. Průtočná říční elektrárna potřebuje nepřetržitý průtok vody, a proto má menší schopnost poskytovat energii na vyžádání. Kinetická energie proudící vody je hlavním zdrojem energie. [8,12,25,28,30,63,64,67,69]

1.2.2.1 Typové rozdělení vodních elektráren

Akumulační

Většina vodní energie pochází z potenciální energie přehrazené vody pohánějící vodní turbínu a generátor. Výkon odebraný z vody závisí na objemu a na výškovém rozdílu mezi zdrojem a odtokem vody. Tento výškový rozdíl se nazývá spád. Velký kanál ("přivaděč") dodává vodu z nádrže do turbíny. [8,12,25,28,30,63,64,67,69]

Přečerpávací

Přečerpávací elektrárna je druh akumulace hydroelektrické energie, kterou používají elektrické energetické systémy pro vyrovnávání zátěže. Metoda ukládá energii ve formě gravitační potenciální energie vody, čerpané z nádrže s nižší nadmořskou výškou do vyšší nadmořské výšky. Nízkonákladová přebytečná elektrická energie mimo špičku se obvykle používá k provozu čerpadel. Během období vysoké spotřeby elektřiny je uložená voda uvolňována přes turbíny k výrobě elektrické energie. Přestože ztráty v procesu čerpání dělají z elektrárny celkově čistého spotřebitele energie, systém zvyšuje příjmy tím, že prodává více elektřiny v obdobích špičkové poptávky, kdy jsou ceny elektřiny nejvyšší. Pokud horní

jezero sbírá značné množství srážek nebo je napájeno řekou, může být elektrárna čistým výrobcem energie na způsob tradiční vodní elektrárny. [8,12,25,28,30,63,64,67,69]

Přečerpávací vodní elektrárna umožňuje ušetřit energii z přerušovaných zdrojů (jako je slunce, vítr) a dalších obnovitelných zdrojů nebo přebytečnou elektřinu ze zdrojů nepřetržitého základního zatížení (jako je uhlí nebo jaderná energie) na období vyšší poptávky. Nádrže používané s přečerpávacími nádržemi jsou poměrně malé ve srovnání s konvenčními vodními elektrárnami s podobnou energetickou kapacitou a doba výroby je často kratší než půl dne.

V době nízké spotřeby elektřiny se přebytečná výrobní kapacita využívá k čerpání vody do horní nádrže. Při vyšší poptávce se voda uvolňuje zpět do spodní nádrže prostřednictvím turbíny, kde se vyrábí elektřina. Sestavy reverzibilní turbína/generátor fungují jako kombinovaná jednotka čerpadla a turbogenerátoru (obvykle konstrukce Francisovy turbíny). Provoz s proměnnou rychlostí dále optimalizuje účinnost okružní jízdy v přečerpávacích vodních elektrárnách [8,12,21,25,28,30,63,64,67,69]

Průtokové – malé vodní elektrárny

Průtoková hydroelektrárna je typ elektrárny na výrobu vodní energie, kde je zajištěno malé nebo žádné skladování vody. Průtokové elektrárny nemusí mít vůbec žádnou zásobu vody nebo jen omezenou zásobu, v takovém případě se zásobní nádrž označuje jako zásobník. Závod bez zásobníku podléhá sezónním říčním tokům, takže zařízení bude fungovat jako přerušovaný zdroj energie. Konvenční vodní elektrárny využívají nádrže, které regulují vodu pro kontrolu povodní, přenosnou elektrickou energii a zásobování sladkou vodou pro zemědělství.

Malá hráz je obvykle postavena pro vytvoření menšího zásobníku, aby se zajistil dostatek vody vstupující do potrubí přivaděče, které vedou k turbínám. Ty jsou uloženy v níže. Obecně platí, že průtokové elektrárny odkloní část nebo většinu toku řeky (až 95 % průměrného ročního vypouštění) potrubím a/nebo tunelem vedoucím k turbínám vyrábějícím elektřinu a poté vracejí vodu zpět do řeky po proudu. [8,12,24,25,28,30,63,64,67,69]

Přilivové

Přilivová elektrárna využívá každodenního vzestupu a poklesu oceánské vody v důsledku přílivu a odlivu; takové zdroje jsou vysoce předvídatelné, a pokud podmínky umožňují výstavbu nádrží, mohou být také použitelné pro výrobu energie během období vysoké poptávky. Méně běžné typy vodních schémat využívají kinetickou energii vody nebo nepřehrazené zdroje, jako jsou vodní kola pod hladinou. Přilivová energie je životaschopná v relativně malém počtu míst po celém světě. [8,12,25,28,30,63,64,67,69]

1.2.2.2 Velikostní rozdělení vodních elektráren

Velké

Velké vodní elektrárny jsou častěji považovány za největší zařízení na výrobu elektřiny na světě, přičemž některá vodní zařízení jsou schopna generovat více než dvojnásobek instalovaného výkonu současných největších jaderných elektráren. [28,36,63,65]

Elektrárny s výkonem více než 200 MW jsou obecně považována za velká vodní zařízení.

Střední

Elektrárny s výkonem od 10 MW do 200 MW jsou považovány za střední velikosti.

Malé

Malá vodní elektrárna je rozvoj vodní energie v měřítku vhodném pro místní komunitu a průmysl nebo jako příspěvek k distribuované výrobě v regionální elektrické síti. Přesná definice výkonu je do 10 MW v ČR.

Malé vodní projekty mohou být postaveny v izolovaných oblastech, které by bylo neekonomické obsluhovat ze státní elektrické sítě, nebo v oblastech, kde státní rozvodná síť neexistuje.

Vzhledem k tomu, že malé vodní projekty mají obvykle odpovídající malé stavební práce a malou nebo žádnou nádrž, jsou považovány za mající relativně nízký dopad na životní prostředí ve srovnání s velkými vodními elektrárnami. [28,36,63,65]

Mikro

Mikrovodní elektrárna je typ vodní elektrárny, která typicky vyrábí od 5 kW do 100 kW elektřiny pomocí přirozeného toku vody. Instalace pod 5 kW se nazývají pico hydro. Tyto instalace mohou dodávat energii izolovanému domovu nebo malé komunitě nebo jsou někdy připojeny k sítím elektrické energie, zejména tam, kde je nabízeno čisté měření. Po celém světě je mnoho těchto zařízení, zejména v rozvojových zemích, protože mohou poskytnout ekonomický zdroj energie bez nákupu paliva. Mikrovodní systémy doplňují solární fotovoltaické systémy, protože v mnoha oblastech je průtok vody a tím i dostupná vodní energie nejvyšší v zimě, kdy je solární energie na minimum. Micro elektrárna se často provádí pomocí peltonova kola pro vysoký tlak a nízký průtok vody. [28,36,63,65]

1.2.2.3 Druhové rozdělení vodních elektráren

Jezová

Elektrárna je umístěna přímo ve stavbě jezu, které pak vytváří daný spád.

Derivační

Voda je přiváděna kanálem nebo potrubím mimo řeku. Po průchodu turbínou je voda vrácena zpět.

Břehová

Elektrárna je postavena v bezprostřední blízkosti jezu na břehu vodního toku.

Přehradní

Elektrárna je vestavěna do hráze přehrady. Hráz tvoří nádrž pro akumulaci vod.

[12,28,36,63,65]

1.2.2.4 Vlastnosti vodních elektráren

Výhody

Flexibilita

Vodní energie je flexibilním zdrojem elektřiny, protože stanice lze velmi rychle zvyšovat a snižovat, aby se přizpůsobily měnícím se požadavkům na energii. Vodní turbíny mají dobu náběhu v řádu několika minut. Přestože je baterie rychlejší, její kapacita je ve srovnání s vodními bateriemi malá. Převodění většiny vodních jednotek ze studeného startu do plného zatížení trvá méně než 10 minut; to je rychlejší než jaderná energie a téměř všechna fosilních paliv. Výroba energie může být také rychle snížena, pokud existuje přebytek výroby energie. Omezená kapacita vodních elektráren se proto obecně nepoužívá k výrobě základní energie, kromě vyprázdnění povodňového bazénu nebo uspokojení potřeb po proudu. [12,28,36,63,65]

Výkon s vysokou hodnotou

Hlavní výhodou konvenčních vodních elektráren s nádržemi je jejich schopnost ukládat vodu s nízkými náklady pro pozdější expedici jako vysoce hodnotná čistá elektřina. V roce 2021 IEA odhadla, že „nádrže všech stávajících konvenčních vodních elektráren dohromady mohou uložit celkem 1 500 TWh elektrické energie v jednom úplném cyklu“, což bylo „asi 170krát více energie než celosvětová flotila přečerpávací vodní elektrárny“. Při použití jako špičkový výkon k uspokojení poptávky má vodní elektřina vyšší hodnotu než výkon základního zatížení a mnohem vyšší hodnotu ve srovnání s přerušovanými zdroji energie, jako je vítr a slunce.

Vodní elektrárny mají dlouhou ekonomickou životnost, přičemž některé elektrárny jsou stále v provozu i po 50–100 letech. Provozní mzdové náklady jsou také obvykle nízké, protože závody jsou automatizované a během normálního provozu mají na místě málo personálu.

Tam, kde přehrada slouží více účelům, lze přidat vodní elektrárnu s relativně nízkými stavebními náklady, což poskytuje užitečný tok příjmů pro kompenzaci nákladů na provoz přehrady. Bylo spočítáno, že prodej elektřiny z přehrady Tři soutěsky pokryje náklady na

výstavbu po 5 až 8 letech plné výroby. Některé údaje však ukazují, že ve většině zemí budou velké vodní přehrady příliš nákladné a jejich výstavba bude trvat příliš dlouho, než aby přinesly pozitivní výnos přizpůsobený riziku, pokud nebudou zavedena vhodná opatření k řízení rizik. [12,28,36,63,65]

Vhodnost pro průmyslové aplikace

Zatímco mnoho projektů vodních elektráren zásobuje veřejné elektrické sítě, některé jsou vytvořeny tak, aby sloužily konkrétním průmyslovým podnikům. Vyhrazené projekty vodních elektráren se často staví tak, aby poskytovaly značné množství elektřiny potřebné například pro průmyslové závody. [12]

Snížené emise CO₂

Vzhledem k tomu, že vodní přehrady nepoužívají palivo, při výrobě energie nevzniká oxid uhličitý. Zatímco oxid uhličitý je zpočátku produkován během výstavby projektu a část metanu je každoročně uvolňována z nádrží, vodní elektrárny mají jednu z nejnižších emisí skleníkových plynů během životního cyklu při výrobě elektřiny. Nízký dopad vodních elektráren na emise skleníkových plynů se vyskytuje zejména v mírném podnebí. Větší dopady emisí skleníkových plynů se nacházejí v tropických oblastech, protože nádrže elektráren v tropických oblastech produkují větší množství metanu než ty v mírných oblastech.

Stejně jako jiné zdroje nefosilních paliv, ani vodní energie nemá žádné emise oxidu siřičitého, oxidů dusíku nebo jiných částic. [12,28,36,63,65]

Další využití nádrže

Nádrže vytvořené hydroelektrickými schémata často poskytují zázemí pro vodní sporty a samy se stávají turistickými atrakcemi. V některých zemích je akvakultura v nádržích běžná. Víceúčelové přehradu instalované pro zavlažování podporují zemědělství s relativně konstantní dodávkou vody. Velké vodní přehradu mohou kontrolovat povodně, které by jinak postihly lidi žijící po proudu od projektu. Správa přehrad, které se používají i pro jiné účely, jako je zavlažování, je komplikovaná. [12]

Nevýhody

V roce 2021 IEA vyzvala k „pevným standardům udržitelnosti pro veškerý rozvoj vodní energie se zjednodušenými pravidly a předpisy“.

Poškození ekosystému a ztráta půdy

Velké nádrže spojené s tradičními vodními elektrárnami mají za následek zaplavení rozsáhlých oblastí proti proudu přehrad, což někdy ničí biologicky bohaté a produktivní nížinné a říční údolní lesy, bažiny a pastviny. Přehrazení přerušuje tok řek a může poškodit místní ekosystémy a budování velkých přehrad a nádrží často znamená vytlačování lidí a divoké zvěře. Ztráta půdy je často umocněna fragmentací stanovišť okolních oblastí způsobenou nádrží.

Projekty vodních elektráren mohou narušit okolní vodní ekosystémy jak proti proudu, tak po proudu od areálu elektrárny. Výroba vodní energie mění prostředí po proudu řeky. Voda vycházející z turbíny obvykle obsahuje velmi málo suspendovaných sedimentů, což může vést k vymývání říčních koryt a ztrátě říčních břehů. Vzhledem k tomu, že vrata turbín se často otevírají přerušovaně, jsou pozorovány rychlé nebo dokonce denní výkyvy průtoku řeky.

Sucho a ztráta vody výparem

Sucho a sezónní změny ve srážkách mohou výrazně omezit vodní energii. Voda se může ztrácet také odpařováním. [12,28,36,63,65]

Zanášení a nedostatek průtoku

Když voda teče, má schopnost transportovat částice těžší než ona po proudu. To má negativní vliv na přehradu a následně jejich elektrárny, zejména na řekách nebo v povodích s vysokým zanášením. Odbahnění může naplnit nádrž a snížit její schopnost kontrolovat povodně a způsobit další horizontální tlak na horní část přehrad. Nakonec se některé nádrže mohou stát během povodní plné sedimentů a neúčinné nebo převýšené a selžou.

Změny v množství toku řeky budou korelovat s množstvím energie vyrobené přehradou. Nižší průtoky řek sníží množství živých zásob v nádrži, čímž se sníží množství vody, kterou lze použít pro vodní elektřinu. Výsledkem sníženého průtoku řeky může být nedostatek energie v oblastech, které jsou silně závislé na vodní energii. Riziko nedostatku toku se může zvýšit v důsledku změny klimatu. Jedna studie z řeky Colorado ve Spojených státech naznačuje, že mírné změny klimatu, jako je zvýšení teploty o 2 stupně Celsia, které má za následek 10% pokles srážek, by mohly snížit odtok řeky až o 40 %. Zejména Brazílie je zranitelná kvůli své velké závislosti na vodní elektřině, protože rostoucí teploty, nižší průtok vody a změny v dešťovém režimu by mohly do konce století snížit celkovou produkci energie o 7 % ročně. [12,28,36,63,65]

Emise metanu (z nádrží)

Nižší pozitivní dopady se nacházejí v tropických oblastech. V nížinných oblastech deštných pralesů, kde je nutná záplava části lesa, bylo zaznamenáno, že nádrže elektráren produkují značné množství metanu. To je způsobeno rostlinným materiálem v zaplavených oblastech, který se rozkládá v anaerobním prostředí a tvoří metan, skleníkový plyn. Podle zprávy Světové komise pro přehrady, kde je nádrž velká ve srovnání s výrobní kapacitou (méně než 100 wattů na metr čtvereční plochy) a žádné mýcení lesů v oblasti nebylo provedeno před zabavením vodní nádrže. emise skleníkových plynů z nádrže mohou být vyšší než u konvenčních tepelných elektráren spalujících olej.

V boreálních nádržích Kanady a severní Evropy však emise skleníkových plynů obvykle tvoří pouze 2 až 8 % jakéhokoli druhu konvenční tepelné výroby fosilních paliv. Nová třída podvodních těžebních operací, která se zaměřuje na utopené lesy, může zmírnit účinek rozkladu lesů. [12,28,36,63,65]

Přemístění

Další nevýhodou vodních elektráren je nutnost přemístit obyvatele tam, kde jsou nádrže plánovány. V roce 2000 Světová komise pro přehrady odhadla, že přehrady fyzicky vysídlily 40–80 milionů lidí po celém světě.

Rizika selhání

Protože velká konvenční přehradní vodní zařízení zadržují velké objemy vody, selhání způsobené špatnou konstrukcí, přírodní katastrofou nebo sabotáží může být katastrofální pro osady a infrastrukturu po proudu řeky.

Během tajfunu Nina v roce 1975 přehrada Banqiao v jižní Číně selhala, když do 24 hodin spadlo více než roční déšť (viz porucha přehrady Banqiao z roku 1975). Výsledná povodeň měla za následek smrt 26 000 lidí a dalších 145 000 na epidemie. Miliony lidí zůstaly bez domova.

Vytvoření přehrady na geologicky nevhodném místě může způsobit katastrofy, jako byla katastrofa v roce 1963 na přehradě Vajont v Itálii, kde zemřelo téměř 2 000 lidí.

Porucha přehrady Malpasset ve Fréjus na Francouzské riviéře (Côte d'Azur), jižní Francie, se zhroutila 2. prosince 1959 a ve výsledné záplavě zahynulo 423 lidí.

Menší přehrady a mikro vodní zařízení představují menší riziko, ale mohou představovat pokračující nebezpečí i po vyřazení z provozu. Například malá hliněná hráz Kelly Barnes Dam selhala v roce 1977, dvacet let poté, co byla její elektrárna vyřazena z provozu, což způsobilo 39 úmrtí. [12,28,36,63,65]

1.2.3 Síla deště

Déšť byl označován jako "jeden z posledních nevyužitých zdrojů energie v přírodě. Když prší, mohou spadnout miliardy litrů vody, která má obrovský elektrický potenciál, pokud je využívána správným způsobem." Probíhá výzkum různé způsoby výroby energie z deště, jako je využití energie při dopadu dešťových kapek. Toto je ve velmi raných fázích, kdy se testují, prototypují a vytvářejí nové a vznikající technologie. Taková síla se nazývá dešťová síla. Jedna metoda, ve které se o to pokusili, je použití hybridních solárních panelů nazývaných „solární panely za každého počasí“, které mohou vyrábět elektřinu ze slunce i deště. [12,28,36,63,65]

2 Vodní turbíny

Vodní turbína je rotační stroj, který přeměňuje kinetickou energii a potenciální energii vody na mechanickou práci.

Vodní turbíny byly vyvinuty v 19. století a byly široce používány pro průmyslovou energii před elektrickými sítěmi. Nyní se většinou používají k výrobě elektrické energie. Vodní turbíny se většinou nacházejí v přehradách k výrobě elektrické energie z potenciální energie vody. [8,12,25,28,42,47]

2.1 Historie

Vodní kola se pro průmyslovou energii používají již stovky let. Jejich hlavním nedostatkem je velikost, která omezuje průtok a hlavu, kterou lze využít. Přejít od vodních kol k moderním turbínám trval asi sto let. Vývoj nastal během průmyslové revoluce, za použití vědeckých principů a metod. Také hojně využívali nových materiálů a výrobních metod vyvinutých v té době. [8,12,25,28,42,47]

2.2 Víření

Slovo turbína zavedl francouzský inženýr Claude Burdin na počátku 19. století a je odvozeno z řeckého slova „τύρβη“ pro „víření“ nebo „vír“. Hlavním rozdílem mezi ranými vodními turbínami a vodními koly je vířivá složka vody, která předává energii rotujícímu rotoru. Tato další složka pohybu umožnila, aby byla turbína menší než vodní kolo stejného výkonu. Dokázaly zpracovat více vody tím, že by se rychleji točily, a mohly využít mnohem větší hlavy. (Později byly vyvinuty impulsní turbíny, které nepoužívaly víření.)

Nejstarší známé vodní turbíny pocházejí z římské říše. V Chemtou a Testour, dnešním Tunisku, byly nalezeny dva mlýny se šroubovicovou turbínou téměř identického designu, datované do konce 3. nebo počátku 4. století našeho letopočtu. Horizontální vodní kolo s lomenými lopatkami bylo instalováno na dně vodou naplněné kruhové šachty. Voda z mlýnského náhonu vstoupila do jámy tangenciálně a vytvořila vířivý vodní sloupec, díky kterému se zcela ponořené kolo chovalo jako opravdová turbína.

Fausto Veranzio ve své knize *Machinae Novae* (1595) popsal mlýn s vertikální osou s rotorem podobným jako u Francisovy turbíny.

Johann Segner vyvinul v polovině 18. století v Uherském království reaktivní vodní turbínu (Segnerovo kolo). Měl vodorovnou osu a byl předchůdcem moderních vodních turbín. Jedná se o velmi jednoduchý stroj, který se dodnes vyrábí pro použití v malých vodních lokalitách. Segner pracoval s Eulerem na některých raných matematických teoriích konstrukce turbín. V 18. století vynalezl Dr. Robert Barker podobnou reakční hydraulickou turbínu, která se stala populární jako demonstrace v přednáškovém sále. Jediný známý dochovaný příklad tohoto typu motoru používaného při výrobě energie z roku 1851 se nachází na Hacienda Buena Vista v Ponce v Portoriku. [8,12,25,28,42,47]

V roce 1820 vyvinul Jean-Victor Poncelet turbínu s vnitřním prouděním.

V roce 1826 vyvinul Benoît Fourneyron turbínu s venkovním prouděním. Jednalo se o účinný stroj (~80 %), který posílal vodu žlabem s lopatkami zakřivenými v jednom rozměru. Stacionární výstup měl také zakřivená vedení.

V roce 1844 vyvinul Uriah A. Boyden turbínu s vnějším prouděním, která zlepšila výkon Fourneyronovy turbíny. Jeho oběžný tvar byl podobný jako u Francisovy turbíny.

V roce 1849 James B. Francis zlepšil vnitřní průtokovou reakční turbínu na účinnost přes 90 %. Prováděl také sofistikované testy a vyvinul inženýrské metody pro konstrukci vodních turbín. Francisova turbína, pojmenovaná po něm, je první moderní vodní turbínou. I dnes je to nejpoužívanější vodní turbína na světě. Francisova turbína se také nazývá radiální průtoková turbína, protože voda proudí z vnějšího obvodu směrem ke středu oběžného kola.

Vodní turbíny s vnitřním prouděním mají lepší mechanické uspořádání a všechny moderní reakční vodní turbíny jsou této konstrukce. Jak voda víří dovnitř, zrychluje se a předává energii běžci. Jak voda prochází lopatkami turbíny a ztrácí energii, tlak vody klesá na atmosférický, nebo v některých případech subatmosférický tlak.

V roce 1876 John B. McCormick na základě Francisových návrhů předvedl první moderní turbínu se smíšeným prouděním s vývojem turbíny Hercules, původně vyráběné

společností Holyoke Machine Company a následně vylepšené inženýry v Německu a Spojených státech. Konstrukce efektivně kombinovala principy vnitřního proudění Francisovy konstrukce s výtlakem Jonvalovy turbíny směrem dolů, s prouděním dovnitř na vstupu, axiálním skrz tělo kola a mírně ven na výstupu. Tento design, který zpočátku fungoval optimálně při 90% účinnosti při nižších rychlostech, by v následujících desetiletích zaznamenal mnohá vylepšení v derivátech pod jmény jako „Victor“, „Risdon“, „Samson“ a „New American“, což zahájí novou éru amerického turbínové inženýrství.

Vodní turbíny, zejména v Americe, by se do značné míry staly standardizovanými se zřízením Holyoke Testing Flume, popsaného jako první moderní hydraulická laboratoř ve Spojených státech Robertem E. Hortonem a Clemensem Herschelem. Hydraulická laboratoř v Holyoke v Massachusetts, původně vytvořená v roce 1872 Jamesem B. Emersonem z testovacích kanálů Lowellu, byla po roce 1880 standardizována Herschelem, který ji použil k vývoji Venturiho měřiče, prvního přesného prostředku k měření velkých průtoků, ke správnému měření účinnosti vodní energie u různých modelů turbín. Zatímco evropští hydrologové měli k některým výpočtům jezu skepsi, zařízení umožňovalo standardní testování účinnosti mezi hlavními výrobci až do roku 1932, do té doby se rozšířila modernější zařízení a metody.

Kolem roku 1890 bylo vynalezeno moderní fluidní ložisko, které se nyní všeobecně používá k podpoře vřeten těžkých vodních turbín. Od roku 2002 se zdá, že průměrná doba mezi poruchami je více než 130 let. [8,12,25,28,42,47]

Kolem roku 1913 vytvořil Viktor Kaplan Kaplanovu turbínu, stroj vrtulového typu. Byla to evoluce Francisovy turbíny a způsobila revoluci ve schopnosti vyvíjet hydrocentrály s nízkým spádem.

Všechny běžné vodní stroje do konce 19. století (včetně vodních kol) byly v podstatě reakční stroje, na stroj působila tlaková hlava vody a odváděla práci. Reakční turbína musí při přenosu energie plně pojmout vodu.

V roce 1866 vynalezl kalifornský mlynář Samuel Knight stroj, který posunul impulsní systém na novou úroveň. Inspirován vysokotlakými tryskovými systémy používanými při hydraulické těžbě v nalezištích zlata, vyvinul Knight lopatové kolo, které zachycovalo

Energie volného paprsku, který přeměnil vysokou hlavu (stovky svislých stop v potrubí nebo vřetenu) vody na kinetickou energii. Tato energie se nazývá impulsní nebo tangenciální turbína. Rychlost vody, zhruba dvojnásobek rychlosti kbelíku periferie, otočí se v lopatě a vypadne z běžce nízkou rychlostí.

V roce 1879 Lester Pelton, experimentující s Knight Wheel, vyvinul Peltonovo kolo (design dvojitého vědra), které vypouštělo vodu do strany, čímž se eliminovala určitá ztráta energie rytířského kola, která vyčerpala část vody zpět do středu kola. Přibližně v roce 1895 William Doble vylepšil Peltonovu půlválcovou formu lopaty eliptickou lopatou, která obsahovala řez, aby tryska mohla čistší vstup do lopaty. Jedná se o moderní formu Peltonovy turbíny, která dnes dosahuje účinnosti až 92 %. Pelton byl docela účinným propagátorem jeho designu, a přestože Doble převzal společnost Pelton, nezměnil jméno na Doble, protože byla známá.

Turgo a turbíny s příčným tokem byly pozdějšími impulsními konstrukcemi.
[8,12,25,28,42,47]

2.3 Teorie provozu

Proudící voda je nasměrována na lopatky oběžného kola turbíny a vytváří na lopatky sílu. Protože se oběžník otáčí, síla působí na vzdálenost (síla působící na vzdálenost je definicí práce). Tímto způsobem se energie se přenáší z proudu vody do turbíny.

2.4 Rozdělení turbín

Vodní turbíny se dělí na dvě skupiny: reakční turbíny a impulsní turbíny. Přesný tvar lopatek vodní turbíny je funkcí přírodního tlaku vody a typu zvoleného oběžného kola.

2.4.1 Reakční turbíny

Na reakční turbíny působí voda, která při pohybu turbínou mění tlak a odevzdává svou energii, musí být uzavřeny tak, aby udržely tlak vody (resp. sání), nebo musí být zcela ponořeny do proudu vody.

Většina používaných vodních turbín jsou reakční turbíny a používají se v aplikacích s nízkým (<30 m) a středním (30–300 m) spádem V reakční turbíně dochází k poklesu tlaku v pevných i pohyblivých lopátkách. Z velké části se používá v přehradách a velkých elektrárnách. [8,12,25,28,42,47]

2.4.2 Impulsní turbíny

Impulsní turbíny mění rychlost vodního paprsku. Proud tlačí na zakřivené lopatky turbíny, čímž se mění směr proudění. Výsledná změna hybnosti (impulzu) způsobuje sílu na lopatky turbíny. Vzhledem k tomu, že se turbína točí, síla působí na vzdálenost (práce) a odkloněný proud vody je ponechán se zmenšenou energií. Impulsní turbína je taková, ve které je tlak tekutiny proudící přes lopatky rotoru konstantní a veškerý pracovní výkon je způsoben změnou kinetické energie tekutiny.

Před dopadem na lopatky turbíny se tlak vody (potenciální energie) tryskou přemění na kinetickou energii a soustředí se na turbínu. Na lopátkách turbíny nedochází k žádné změně tlaku.

Impulsní turbíny se často používají v aplikacích s velmi vysokým (>300 m) spádem.

[8,12,25,28,42,47]

2.5 Typy turbín

2.5.1 Francisova turbína

Francisova turbína je druh vodní turbíny. Je to reakční turbína s vnitřním prouděním, která kombinuje koncepty radiálního a axiálního proudění. Francisovy turbíny jsou dnes nejběžnější vodní turbínou a mohou dosáhnout účinnosti přes 95 %.

Francisovy turbíny se používají především k výrobě elektrické energie. Výkon elektrických generátorů se obecně pohybuje od pouhých několika kilowattů do 1000 MW, i když mini-vodní instalace mohou být nižší. Nejlepší výkon je vidět, když je výška hlavy mezi 100–300 metry. Průměry vřetena jsou mezi 1 a 10 m. Otáčky různých turbínových jednotek se pohybují od 70 do 1000 ot./min. Brána kolem vnější strany rotujícího oběžného

kola turbíny řídí rychlost průtoku vody turbínou pro různé rychlosti výroby energie. Francisovy turbíny jsou obvykle namontovány s vertikální hřídelí, aby izolovaly vodu od generátoru. To také usnadňuje instalaci a údržbu.

Spirálové pouzdro: je kolem oběžného kola turbíny. Po celé své délce má četné otvory v pravidelných intervalech, které umožňují pracovní kapalině narážet na lopatky běžce. Tyto otvory přeměňují tlakovou energii tekutiny na kinetickou energii těsně předtím, než tekutina dopadá na lopatky. To udržuje konstantní rychlost navzdory skutečnosti, že bylo poskytnuto mnoho otvorů pro vstup tekutiny do lopatek, protože plocha průřezu tohoto pouzdra se po obvodu rovnoměrně zmenšuje.

Vodicí a vzpěrné lopatky: Primární funkcí vodicích a vzpěrných lopatek je přeměnit tlakovou energii tekutiny na kinetickou energii. Slouží také k nasměrování proudění v konstrukčních úhlech k lopatkám oběžného kola. [8,12,25,28,42,47,58]



Obrázek 8: Francisova turbína

Lopatky oběžného kola: Lopatky oběžného kola jsou srdcem každé turbíny. Jsou to středy, do kterých kapalina dopadá a tangenciální síla nárazu vytváří kroučící moment způsobující rotaci hřídele turbíny. Je třeba věnovat velkou pozornost návrhu úhlů lopatek na vstupu a výstupu, protože to jsou hlavní parametry ovlivňující výrobu energie.

Sací trubka: Sací trubka je potrubí, které spojuje výstup oběžného kola s ocasním kroužkem, kde je voda vypouštěna z turbíny. Jeho primární funkcí je snížit rychlost

vypouštěné vody, aby se minimalizovaly ztráty kinetické energie na výstupu. To umožňuje, aby byla turbína nastavena nad ocasní vodu bez znatelného poklesu dostupného spádu.

[8,12,25,28,42,47,58]

2.5.2 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína je vodní turbína vrtulového typu, která má nastavitelné lopatky. Byla vyvinuta v roce 1913 rakouským profesorem Viktorem Kaplanem, který zkombinoval automaticky nastavované listy vrtule s automaticky nastavovanými brankami pro dosažení účinnosti v širokém rozsahu průtoku a hladiny vody.



Obrázek 9: Kaplanova turbína

Kaplanova turbína byla evolucí Francisovy turbíny. Jeho vynález umožnil efektivní výrobu energie v aplikacích s nízkou spádem, což nebylo možné u Francisových turbín. Dosah se pohybuje od 1,5 do 70 metrů a výkon se pohybuje od 5 do 200 MW. Průměry běžců jsou mezi 2 a 11 metry. Turbíny rotují konstantní rychlostí, která se liší zařízení od zařízení.

Tato rychlost se pohybuje od pouhých 54,5 otáček za minutu (přehrada Albeni Falls) do 450 otáček za minutu.

Kaplanovy turbíny jsou nyní široce používány po celém světě při výrobě energie s vysokým průtokem a nízkou spádem. [8,12,25,28,37,42,47]

Kaplanova turbína je reakční turbína s vnitřním prouděním, což znamená, že pracovní tekutina při svém pohybu turbínou mění tlak a odevzdává svou energii. Energie se získává jak z hydrostatické hlavy, tak z kinetické energie proudící vody. Konstrukce kombinuje vlastnosti radiálních a axiálních turbín.

Vstup je spirálovitá trubka, která se ovíjí kolem brány turbíny. Voda je směřována tangenciálně skrz bránu a spirálovitě se stáčí na vrtuli ve tvaru běžce, což způsobuje, že se otáčí.

Výstup je speciálně tvarovaná sací trubice, která pomáhá zpomalovat vodu a obnovovat kinetickou energii.

Turbína nemusí být v nejnižším bodě průtoku vody, pokud sací trubka zůstává plná vody. Vyšší umístění turbíny však zvyšuje sání, které na lopatky turbíny působí sací trubka. Výsledný pokles tlaku může vést ke kavitaci.

Variabilní geometrie brány a lopatek turbíny umožňuje efektivní provoz pro řadu podmínek proudění. Účinnost Kaplanovy turbíny je typicky přes 90 %, ale může být nižší u aplikací s velmi nízkým spádem.

Vzhledem k tomu, že listy vrtule se otáčí na vysokotlakých hydraulických olejových ložiscích, je kritickým prvkem Kaplanovy konstrukce zachování správného těsnění, aby se zabránilo emisím oleje do vodní cesty. Vypouštění ropy do řek není žádoucí kvůli plýtvání zdroji a následným ekologickým škodám.

Levné mikroturbíny na modelu Kaplanovy turbíny jsou vyráběny pro individuální výrobu energie dimenzované na 3 m spádu, které mohou pracovat již s 0,3 m spádu při značně sníženém výkonu při dostatečném průtoku vody.

Velké Kaplanovy turbíny jsou individuálně navrženy pro každé místo tak, aby pracovaly s nejvyšší možnou účinností, typicky přes 90 %. Jejich návrh, výroba a instalace jsou velmi nákladné, ale fungují desítky let. [8,12,25,28,37,42,47]

2.5.3 Tysonova turbína

Tysonova turbína je kuželová vodní turbína se spirálovitými lopatkami vystupujícími částečně dolů z vrcholu, postupně se zvětšujícími v radiálním rozměru a zmenšujícími se stoupání, jak se spirálovitě pohybují směrem k základně kužele. Toto provedení nepotřebuje křídlo, protože se vkládá přímo do tekoucí vody.

Turbína, která se prodává jako součást hydroenergetického systému, který získává energii z toku vody, je namontována pod vorem a poháná energetický systém, obvykle zavlažovací čerpadlo nebo generátor, na vrcholu voru pomocí pásu nebo zařízení. Turbína je tažena doprostřed řeky nebo potoka, kde je tok nejrychlejší, a přivázána ke břehu. Nevyžaduje žádné místní inženýrství a lze jej snadno přesunout na jiná místa. [8,12,25,28,42,47]

2.5.4 Deriazova turbína

Deriazova turbína, představená inženýrem Paulem Deriazem, byla první diagonální hydraulická čerpadlo-turbína, která byla navržena. Na rozdíl od většiny hydraulických strojů proudění v turbíně nesleduje úplný axiální ani radiální směr, ale je diagonální směsí obou. Deriazovy turbíny, stejně jako Kaplanovy turbíny, mohou mít také nastavitelné lopatky pro dosažení nejvyšší účinnosti při proměnném výtlačku (dvojitá regulace).

Kombinované použití nastavitelných oběžných lopatek s pohyblivými vodicími lopatkami umožňuje čerpadlo-turbíně dosáhnout vysokého výkonu v širokém rozsahu pracovních podmínek. Díky tomu je turbína mimořádně vhodným řešením pro vysoké proměnné zatížení. [8,12,25,28,42,47]

2.5.5 Peltonova turbína

Peltonovo kolo nebo Peltonova turbína je impulsní vodní turbína vynalezená americkým vynálezcem Lesterem Allanem Peltonem v 70. letech 19. století. Peltonovo kolo získává energii z impulsu pohybující se vody, na rozdíl od mrtvé váhy vody jako tradiční vodní kolo. Existovalo mnoho dřívějších variant impulsních turbín, ale byly méně účinné než Peltonův návrh. Voda opouštějící tato kola měla obvykle stále vysokou rychlost a odváděla velkou část dynamické energie přenášené na kola. Peltonova geometrie lopatky byla navržena tak,

že když ráfek běžel poloviční rychlostí vodního proudu, voda opouštěla kolo velmi malou rychlostí; tak jeho návrh vytěžil téměř veškerou impulsní energii vody – což vedlo k velmi účinné turbíně. [8,12,25,28,42,45,47]

Trysky směřují silné, vysokorychlostní proudy vody proti sérii lžícovitých lopatek, známých také jako impulsní lopatky, které jsou namontovány kolem vnějšího okraje hnacího kola (také nazývaného běžec). Jak vodní paprsek dopadá na lopatky, mění se směr rychlosti vody tak, aby sledoval obrysy lopatek. Impulzní energie vodního paprsku vyvíjí točivý moment na systém lopatky a kola, čímž se kolo roztočí. Proud vody se otočí a vystupuje na vnějších stranách lopatky, zpomalen na nízkou rychlost. Při tom se hybnost vodního paprsku přenesou na kolo a tím na turbínu. „Impulzní“ energie tedy na turbínu skutečně funguje. Maximálního výkonu a účinnosti je dosaženo, když je rychlost vodního paprsku dvojnásobná než rychlost rotujících lopatek. Velmi malé procento původní kinetické energie vodního paprsku zůstane ve vodě, což způsobí, že lopatka bude vyprazdňována stejnou rychlostí, jako je naplněna, a tím umožní, aby vysokotlaký vstupní proud pokračoval nepřerušovaně a bez plýtvání energií.



Obrázek 10: Peltonova turbína

Typicky jsou dvě lopatky namontovány vedle sebe na kolo, přičemž proud vody je rozdělen do dvou stejných proudů. To vyrovnává síly bočního zatížení na kolo a pomáhá zajistit hladký a účinný přenos hybnosti z vodního paprsku na kolo turbíny. [8,12,25,28,42,45,47]

Protože voda je téměř nestlačitelná, téměř veškerá dostupná energie se získává v prvním stupni hydraulické turbíny. Proto mají Peltonova kola pouze jeden turbínový stupeň, na rozdíl od plynových turbín, které pracují se stlačitelnou kapalinou.

Peltonova kola jsou preferovanou turbínou pro vodní energii, kde dostupný vodní zdroj má relativně vysokou hydraulickou výšku při nízkých průtocích. Vyrábí ve všech velikostech. Ve vodních elektrárnách existují mnohatunová Peltonova kola namontovaná na vertikálních ložiskách olejové vložky.

V závislosti na průtoku vody a designu fungují Peltonova kola nejlépe s hlavami 15 - 800 metrů, i když neexistuje žádný teoretický limit. [8,12,25,28,42,45,47]

2.5.6 Bánkiho turbína

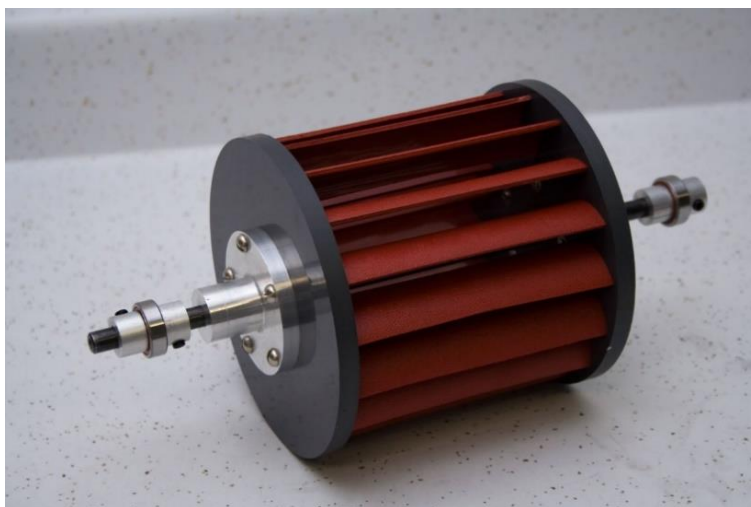
Turbína s příčným prouděním, Bánki-Michellova turbína nebo Ossbergerova turbína je vodní turbína vyvinutá Australanem Anthonyem Michellem, Maďarem Donátem Bánkim a Němcem Fritzem Ossbergerem. Michell získal patenty na svůj design turbíny v roce 1903 a výrobní společnost Weymouth ji vyráběla mnoho let.

Na rozdíl od většiny vodních turbín, které mají axiální nebo radiální proudění, v turbíně s příčným prouděním voda prochází turbínou příčně nebo přes lopatky turbíny. Stejně jako u vodního kola je voda přiváděna na okraj turbíny. Po průchodu dovnitř běžce odchází na opačnou stranu a jde ven. Dvojitě projetí běžcem poskytuje další efektivitu. Když voda opustí běžec, pomáhá jej také vyčistit od malých nečistot a znečištění. Turbína s příčným průtokem je nízkootáčkový stroj, který se dobře hodí pro místa s nízkou spádem, ale vysokým průtokem.

Turbíny s příčným prouděním jsou často konstruovány jako dvě turbíny různé kapacity, které sdílejí stejnou hřídel. Turbínová kola mají stejný průměr, ale různé délky, aby zvládla různé objemy při stejném tlaku. Dělená kola jsou obvykle stavěna s objemy v poměru 1:2. Dělená regulační jednotka, systém rozváděcích lopatek v předřazené části turbíny, poskytuje flexibilní provoz s výkonem 33, 66 nebo 100 % v závislosti na průtoku. Díky relativně jednoduché konstrukci turbíny jsou dosahovány nízké provozní náklady.

Turbína se skládá z válcového vodního kola nebo oběžného kola s vodorovnou hřídelí, složeným z četných lopatek (až 37), uspořádaných radiálně a tangenciálně. Břity lopatek jsou nabroušené, aby se snížil odpor proti proudění vody. Lopatka je vyrobena v částečném kruhovém průřezu (trubka seříznutá po celé délce). [8,12,25,28,42,46,47]

Voda proudí nejprve z vnější strany turbíny do jejího vnitřku. Regulační jednotka ve tvaru lopatky nebo jazyka mění průřez toku. Proud vody je tryskou nasměrován na válcový běhoun. Voda vstupuje do běžce pod úhlem asi 45/120 stupňů a přenáší část kinetické energie vody na aktivní válcové lopatky.



Obrázek 11: Bánkiho turbína

Výhody

Špičková účinnost turbíny s příčným prouděním je o něco nižší než u Kaplanovy, Francisovy nebo Peltonovy turbíny. Turbína s příčným prouděním má však plochou křivku účinnosti při různém zatížení. S děleným oběžným kolem a komorou turbíny si turbína zachovává svou účinnost, zatímco průtok a zatížení se mění od 1/6 do maxima.

Vzhledem k nízké ceně a dobré regulaci se křížové turbíny používají převážně v mini a mikro vodních elektrárnách do dvou tisíc kW a se spádem menším než 200 m.

Zejména u malých průtočných elektráren poskytuje plochá křivka účinnosti lepší roční výkon než jiné turbínové systémy, protože voda v malých řekách je obvykle v některých

měsících nižší. Účinnost turbíny určuje, zda se elektřina vyrábí v obdobích, kdy mají řeky nízké průtoky. Pokud mají použité turbíny vysokou špičkovou účinnost, ale chovají se špatně při částečném zatížení, dosáhne se nižšího ročního výkonu než u turbín, které mají plochou křivku účinnosti.

Díky svému vynikajícímu chování při částečném zatížení je příčná turbína vhodná pro bezobslužnou výrobu elektřiny. Jednoduchá konstrukce usnadňuje údržbu než u jiných typů turbín; musí být udržována pouze dvě ložiska a jsou zde pouze tři rotační prvky. Mechanický systém je jednoduchý, takže opravy mohou provádět místní mechanici.

Další výhodou je, že se často umí sám vyčistit. Jakmile voda opustí žlab, listí, tráva atd. nezůstane v žlabu, čímž se zabrání ztrátám. Proto, i když je účinnost turbíny poněkud nižší, je spolehlivější než jiné typy. Běžně není nutné žádné čištění žlabu, např. inverzí toku nebo změnami rychlosti. Jiné typy turbín se snadněji ucpávají a v důsledku toho čelí ztrátám výkonu i přes vyšší nominální účinnosti. [8,12,25,28,42,46,47]

3 Zhodnocení Energetického potenciálu řeky Berounky

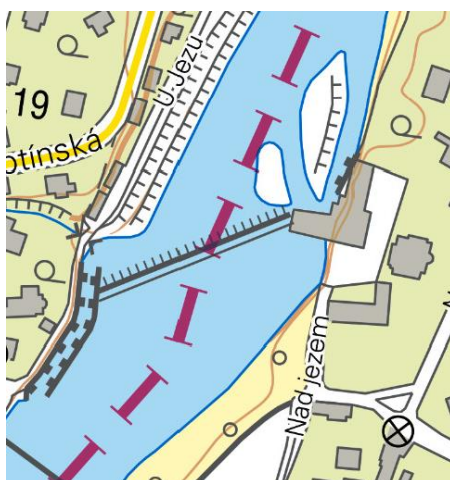
Berounka začíná soutokem dvou řek v Plzni. Jsou jimi Radbuza a Mže. Řeka je takzvaně bez vlastního pramene. Protéká přes Plzeňský a Středočeský kraj, končí v Praze soutokem s Vltavou. Celková délka řeky je 139 km.

3.1 Malé vodní elektrárny na Berounce

3.1.1 MVE Černošice

MVE Černošice	
Výška jezu/ Druh MVE	2,5 m / jezová
Počet zdrojů	4
Turbíny	2x Kaplan, 2x Fancis
Odhadovaný odběr vody	21,93 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	350 kW

Tabulka 1: Technické parametry MVE Černošice [5,7,8,16,18,22,26,40,43,70,71]

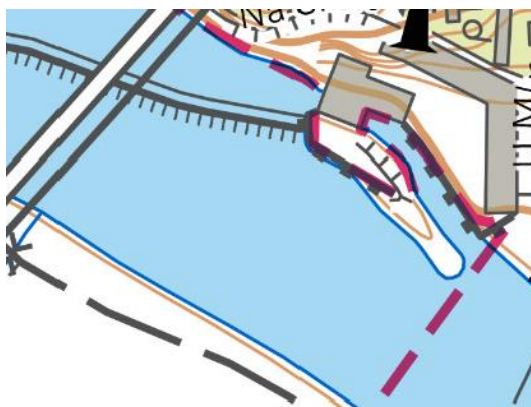


Obrázek 12: MVE Černošice

3.1.2 MVE Dolní Mokropsy

MVE Dolní Mokropsy	
Výška jezu/ Druh MVE	0,75 m / břehová
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	15,68 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	90 kW

Tabulka 2: Technické parametry MVE Dolní Mokropsy [7,8,16,18,22,40,51,70,71]



Obrázek 13: MVE Dolní Mokropsy

3.1.3 MVE Dobřichovice

MVE Dobřichovice	
Výška jezu/ Druh MVE	1,85 m / břehová
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	9,66 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	84 kW

Tabulka 3: Technické parametry MVE Dobřichovice [7,8,11,18,22,40,48,70,71]

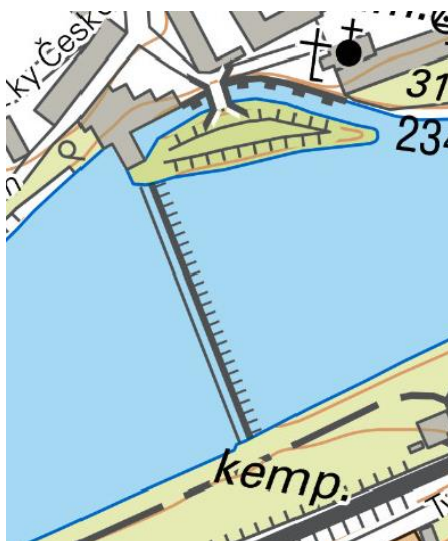


Obrázek 14: MVE Dobřichovice

3.1.4 MVE Řevnice

MVE Řevnice	
Výška jezu/ Druh MVE	0,77 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	21,72 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	200 kW

Tabulka 4: Technické parametry MVE Řevnice [7,8,18,22,40,57,70,71]

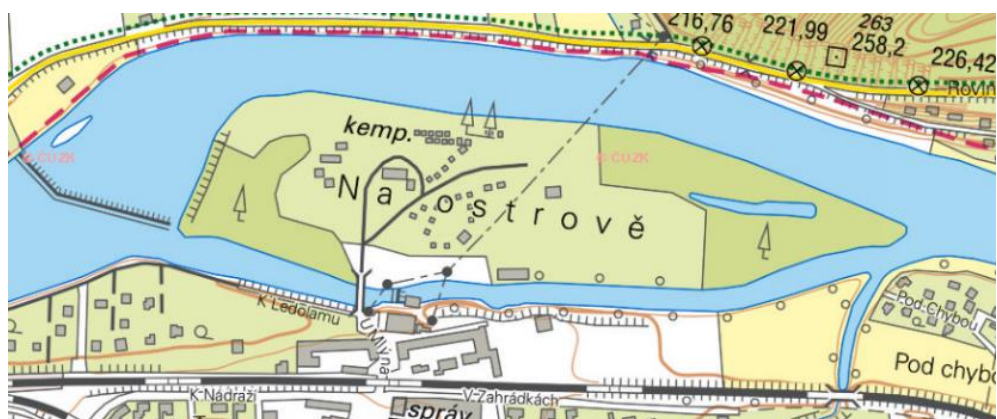


Obrázek 15: MVE Řevnice

3.1.5 MVE Zadní Třebáň

MVE Zadní Třebáň	
Výška jezu/ Druh MVE	1,22 m / derivační
Počet zdrojů	1
Turbíny	1x Francis
Odhadovaný odběr vody	12,70 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	120 kW

Tabulka 5: Technické parametry MVE Zadní Třebáň [7,8,18,22,40,55,70,71]

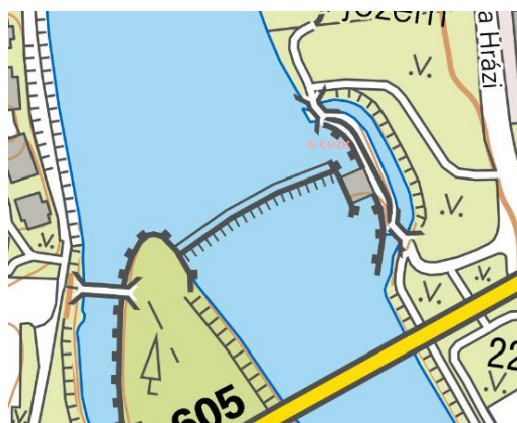


Obrázek 16: MVE Zadní Třebáň

3.1.6 MVE Beroun

MVE Beroun	
Výška jezu/ Druh MVE	3,40 m / jezová
Počet zdrojů	4
Turbíny	4x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	28,10 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	720 kW

Tabulka 6: Technické parametry MVE Beroun [7,8,18,22,38,40,70,71]

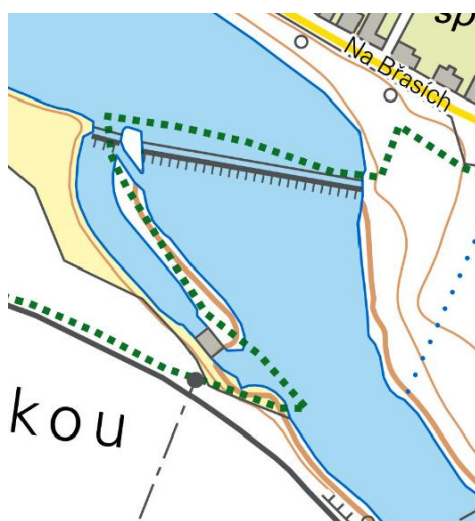


Obrázek 17: MVE Beroun

3.1.7 MVE Hýskov

MVE Hýskov / derivační	
Výška jezu/ Druh MVE	1 m
Počet zdrojů	3
Turbíny	3x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	29,60 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	297 kW

Tabulka 7: Technické parametry MVE Hýskov [7,8,18,22,29,40,70,71]

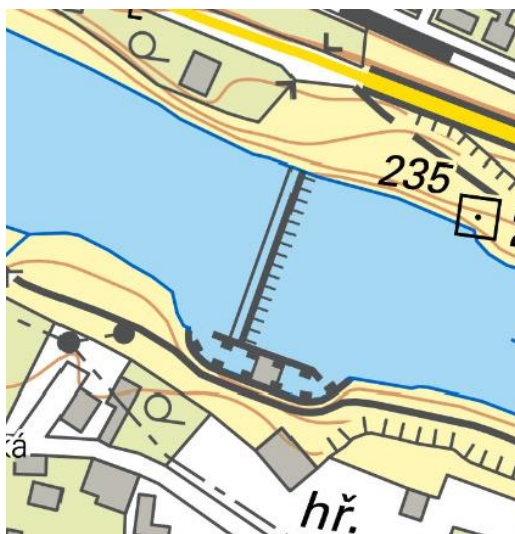


Obrázek 18: MVE Hýskov

3.1.8 MVE Nižbor

MVE Nižbor	
Výška jezu/ Druh MVE	1,30 m / jezová
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Semikaplan
Odhadovaný odběr vody	26,30 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	280 kW

Tabulka 8: Technické parametry MVE Nižbor [7,8,18,22,40,70,71]

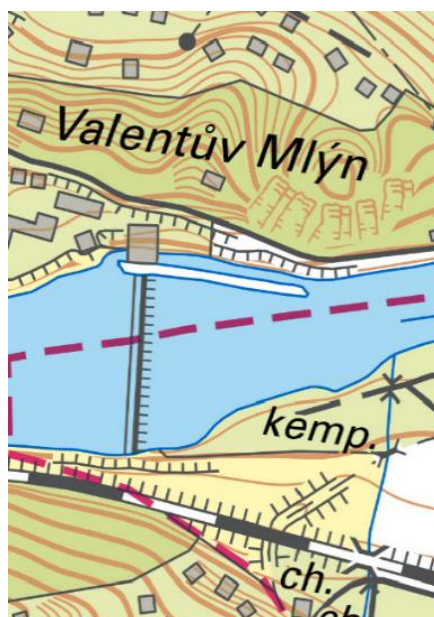


Obrázek 19: MVE Nižbor

3.1.9 MVE Sýkořice

MVE Sýkořice	
Výška jezu/ Druh MVE	1,30 m / břehová
Počet zdrojů	1
Turbíny	1x Francis
Odhadovaný odběr vody	Neznámý
Celkový instalovaný výkon	22 kW

Tabulka 9: Technické parametry MVE Sýkořice [7,8,18,22,40,60,70,71]

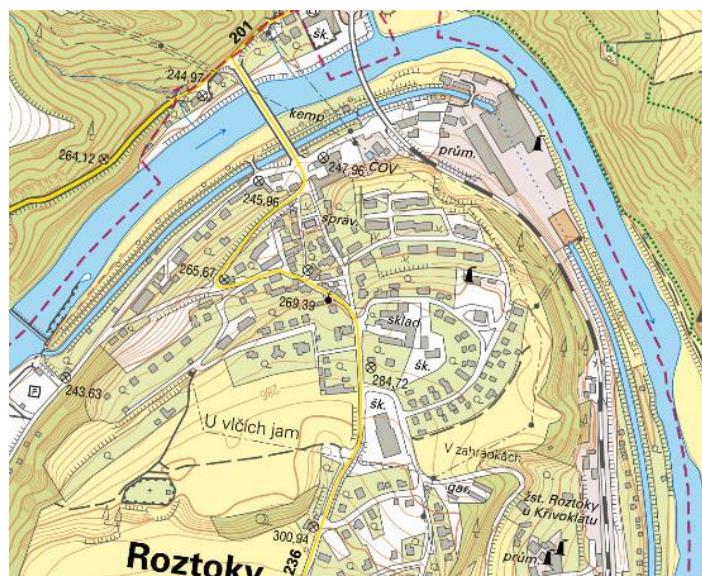


Obrázek 20: MVE Sýkořice

3.1.10 MVE Roztoky

MVE Roztoky	
Výška jezu/ Druh MVE	1,50 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	12,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	400 kW

Tabulka 10: Technické parametry MVE Roztoky [7,8,18,22,40,49,70,71]

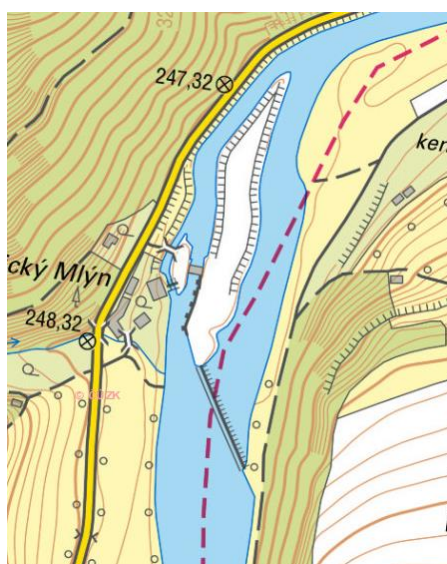


Obrázek 21: MVE Roztoky

3.1.11 MVE Nezabudice

MVE Nezabudice		
	MVE I.	MVE II.
Výška jezu/ Druh MVE	0,80 m / derivační	0,80 m / derivační
Počet zdrojů	1	4
Turbíny	1x Francis	4x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	4,00 m ³ .s ⁻¹	13,58 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	45 kW	220 kW

Tabulka 11: Technické parametry MVE Nezabudice [4,7,8,18,22,40,70,71]

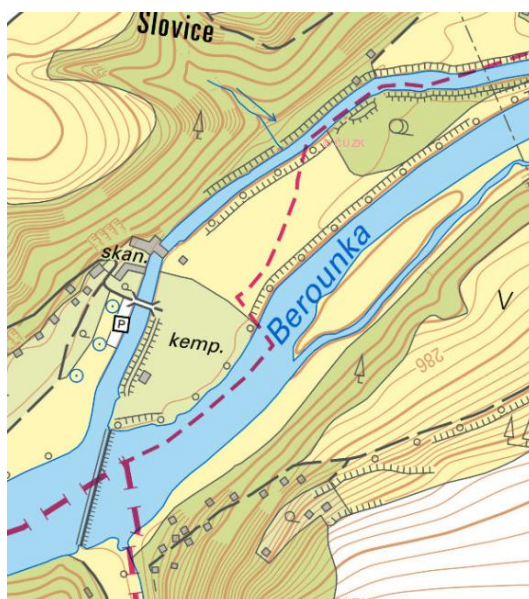


Obrázek 22: MVE Nezabudice

3.1.12 MVE Šlovice

MVE Šlovice	
Výška jezu/ Druh MVE	1,20 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	1x Kaplan, 1x Francic
Odhadovaný odběr vody	17,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	300 kW

Tabulka 12: Technické parametry MVE Šlovice [7,8,13,16,18,22,40,44,70,71]



Obrázek 23: MVE Šlovice

3.1.13 MVE Zvíkovec

MVE Zvíkovec	
Výška jezu/ druh MVE	1,60 m / břehová
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	10,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	150 kW

Tabulka 13: Technické parametry MVE Zvíkovec [7,8,18,22,40,56,70,71]



Obrázek 24: MVE Zvíkovec

3.1.14 MVE Lejskův mlýn

MVE Lejskův mlýn	
Výška jezu/ Druh MVE	1,20 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	8,75 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	90 kW

Tabulka 14: Technické parametry MVE Lejskův mlýn [6,7,8,18,22,40,70,71]



Obrázek 25: MVE Lejskův mlýn

3.1.15 MVE Libštejnský mlýn

MVE Libštejnský mlýn	
Výška jezu/ Druh MVE	1,60 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	7,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	140 kW

Tabulka 15: Technické parametry MVE Libštejnský mlýn [7,8,18,22,40,50,70,71]

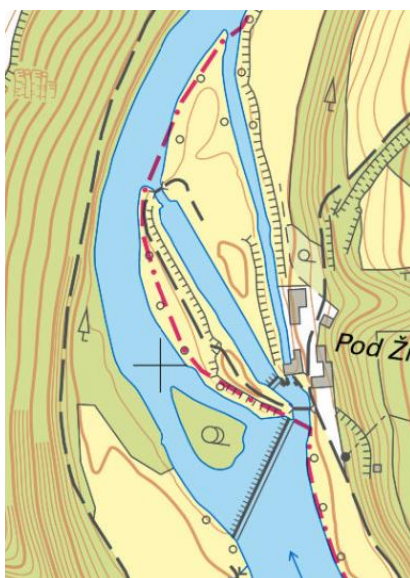


Obrázek 26: MVE Libštejnský mlýn

3.1.16 MVE Olešná I. a II.

MVE Olešná		
	MVE I.	MVE II.
Výška jezu/ Druh MVE	2,00 m / derivační	2,00 m / derivační
Počet zdrojů	2	2
Turbíny	2x Kaplan	2x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	5,40 m ³ .s ⁻¹	12,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	70 kW	180 kW

Tabulka 16: Technické parametry MVE Olešná I. a II. [2,3,7,8,18,22,40,70,71]



Obrázek 27: MVE Olešná

3.1.17 MVE Kaceřovský mlýn

MVE Kaceřovský mlýn	
Výška jezu/ Druh MVE	1,40 m / jezová
Počet zdrojů	4
Turbíny	4x Archimédův šroub
Odhadovaný odběr vody	18,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	220 kW

Tabulka 17: Technické parametry MVE Kaceřovský mlýn [7,8,18,22,39,40,70,71]

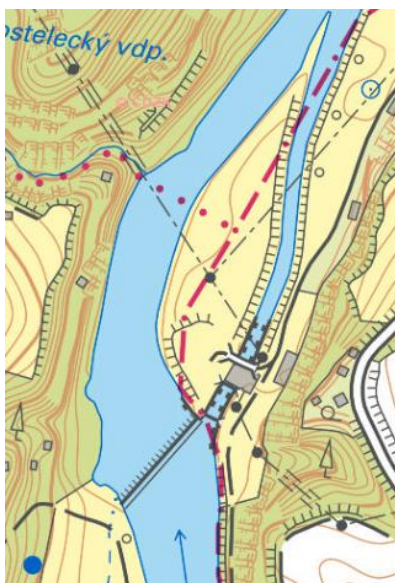


Obrázek 28: MVE Kaceřovský mlýn

3.1.18 MVE Darová

MVE Darová	
Výška jezu/ Druh MVE	2,50 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Francis
Odhadovaný odběr vody	25,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	525 kW

Tabulka 18: Technické parametry MVE Darová [7,8,18,22,40,54,70,71]

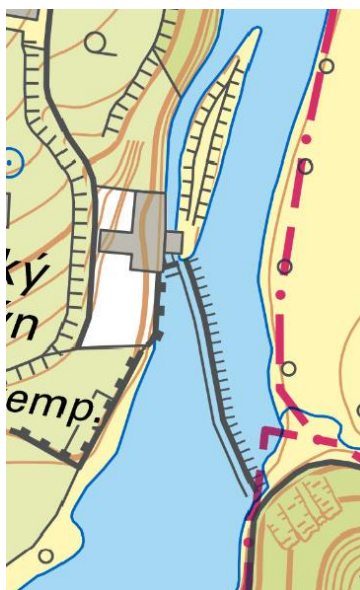


Obrázek 29: MVE Darová

3.1.19 MVE Valentovský mlýn

MVE Valentovský mlýn	
Výška jezu/ Druh MVE	1,10 m / břehová
Počet zdrojů	3
Turbíny	2x Vrtulová, 1x Bánki
Odhadovaný odběr vody	15,55 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	137 kW

Tabulka 19: Technické parametry MVE Valentovský mlýn [1,7,8,18,22,40,59,70,71]

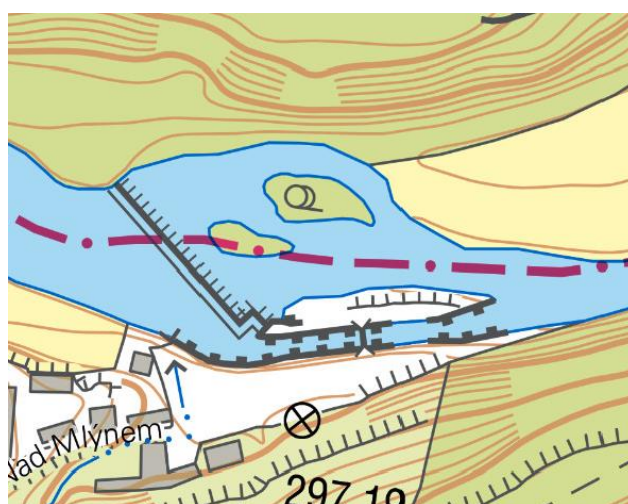


Obrázek 30: MVE Valentovský mlýn

3.1.20 MVE Bukovec (mlýn)

MVE Bukovec (mlýn)	
Výška jezu/ Druh MVE	1,50 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Semikaplan
Odhadovaný odběr vody	24,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	540 kW

Tabulka 20: Technické parametry MVE Bukovec (mlýn) [7,8,18,22,31,40,53,70,71]

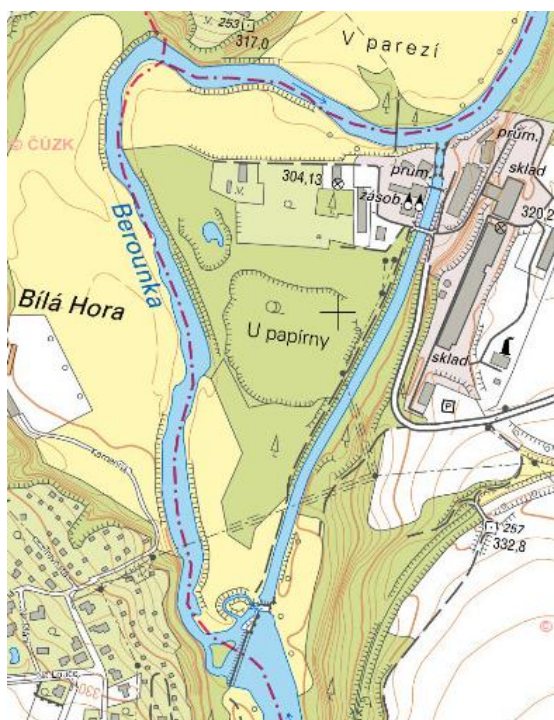


Obrázek 31: MVE Bukovec (mlýn)

3.1.21 MVE Bukovec (papírna)

MVE Bukovec (papírna)	
Výška jezu/ Druh MVE	1,60 m / derivační
Počet zdrojů	2
Turbíny	2x Kaplan
Odhadovaný odběr vody	25,00 m ³ .s ⁻¹
Celkový instalovaný výkon	630 kW

Tabulka 21: Technické parametry MVE Bukovec (papírna) [7,8,18,22,26,40,70,71]



Obrázek 32: MVE Bukovec (papírna)

3.2 Zhodnocení energetického potenciálu

Na řece je postaveno celkem 23 funkčních MVE. Z konstrukčního hlediska 21 MVE je postaveno u jezů pevného typu. Zbylé dvě jsou situovány u jezů s nastavitelnou (pohyblivou) výškou přepadu. Jedná se o nověji vybudované elektrárny v Nižboru a Berouně.

Z celkového hlediska žádné z instalovaných děl není schopné pracovat ve špičkovém, či pološpičkovém režimu. Postavené elektrárny na toku Berounky spadají do třídy nízkotlakých a průtočných. 4 z 21 mohou být považovány za elektrárny jezového typu, z hlediska situování strojovny v daném jezu nebo v jeho blízkosti. 7 z 21 jsou v uspořádání, kde stojovna je postavena u břehu. Převažující částí je 10 elektráren derivačního typu.

Výstavby elektráren lze zařadit do dvou etap. První etapa jsou elektrárny postavené do první poloviny 20. století a následně renovovány. Druhá etapa jsou elektrárny vybudované za účelem znovu obnovení již zaniklých staveb, nebo postaveny vedle stávajících děl rekonstruovaných v období po roce 1989. Obnovení se týkalo i technického řešení.

Celkový instalovaný výkon na řece je 5,8 MW. V roce 2021 bylo elektrárnami vyrobeno přibližně 29,1 GWh elektrické energie. [7,8,18,22,26,40,62,70,71]

3.3 Teoretický hydroenergetický potenciál

Celkový teoretický hydroenergetický potenciál vodního toku byl vyčíslen na 24,75 MW.

Kdy jsme vzali v úvahu dvě místa na začátku a konci řeky, zjistili jejich nadmořskou výšku.

Začínající bod jsem vzal MVE Bukovec (papírna) s nadmořskou výškou 298 m n. m. a konečný bod MVE Černošice 211 m n. m. Dále jejich Průměrné roční průtoky, MVE Bukovec $19,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a MVE Černošice $38,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Veškeré uvedené údaje byly dosazeny do rovnice (1) pro výpočet teoretického hydroenergetického potenciálu.

$$P_T = g \cdot \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \cdot H_{1-2}$$

Kde:

P_T – teoretický hydroenergetický potenciál [kW]

g – gravitační konstanta

Q_1 – průměrný roční průtok prvního místa [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_2 – průměrný roční průtok druhého místa [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

H_{1-2} – rozdíl nadmořských výšek daných míst [m]

Dosazení do rovnice (1):

$$P_T = 9,81 \cdot \frac{(19,9 + 38,1)}{2} \cdot 87 = 24750,63 \text{ kW}$$

Z této hodnoty vyplývá, že aktuální instalovaný výkon na řece využívá pouhých 23 % z možného teoretického. V reálném případě však není nikdy možné dosáhnout teoretického maxima. V teoretickém výpočtu se počítá se 100% účinností a se stálým konstantním průtokem. [20,23,28,32,62,64]

3.4 Zhodnocení možností

Hlavním směrem pro možnosti vylepšování dané situace je navyšování instalovaného výkonu. Jednou z variant je rekonstrukce a inovace stávajících děl.

Druhá možnost je obnova nefunkčních, či již zbouraných děl. Některá místa s historickými kořeny a potenciálem k výstavbě nových elektráren jsou např. Klučický mlýn,

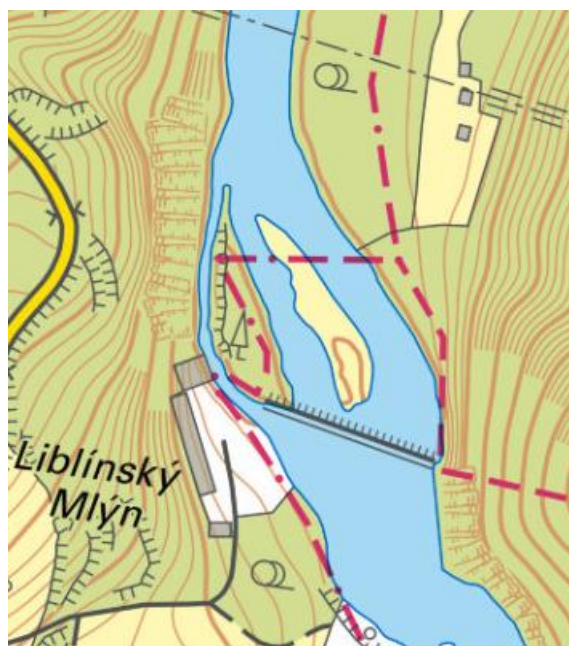
Liblínský mlýn a Dolanský mlýn. [62,71]

3.5 Vlastní technické řešení

Pro technické řešení bylo vybráno rekonstrukce již předem zmíněné lokality Liblínského mlýna. [22,52,62,71]

3.5.1 Lokalita

Liblínský mlýn je situovaný na stejnojmenném jezu na 101,3 km řeky Berounky. Jez je v polorozpadlém stavu a tak neplní zcela svůj účel. Stavba mlýnu slouží pouze jako rekreační místo. Jez měl za úkol zužovat koryto řeky a směřovat tok k levému břehu, kde je mlýn postaven. [7,8,18,22,40,52,70,71]



Obrázek 33: Liblínský mlýn

3.5.2 Vodohospodářská situace

Měřicí stanice ČHMÚ, která má údaje o průtoku nejbližší lokalitě je přímo Liblín. Pro technický návrh je potřeba znalosti statistiky průtoků co nejbližší místa. Z daných údajů lze vytvořit čáru trvání průtoků, která je na *Obrázku 34*.



Obrázek 34: Graf čáry trvání průtoků – Liblínský mlýn

[20,23,28,32,71]

3.6 Návrh MVE

V první části je potřeba se zaměřit na průtok, který se nedá využít. Nazývá se minimální zůstatkový průtok (MZP). Je to množství vody, kterou je nutno nechat přetéct přes jez. Pro Liblínský mlýn není specifikován, proto je nezbytné se obrátit na § 36 zákona č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů. [10] Bohužel daný zákon nestanovuje hodnotu MZP. Nejbližší možné stanovení je uvedeno v normě ČSN 75 2601 – Malé vodní elektrárny – Základní požadavky. [10] Zde je doporučeno pro průtoky Q_{355d} (průtok trvající po dobu 355 dní) větší než $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

výpočet rovnici (2):

$$MZP = (Q_{355d} + Q_{364d}) \cdot 0,5$$

kde:

MZP – minimální zůstatkový průtok

Q_{355d} – průměrný průtok přetrvávající po dobu 355 dní

Q_{364d} – průměrný průtok přetrvávající po dobu 364 dní

Pro dosažení do rovnice(2) vybereme příslušné hodnoty $Q_{355d} = 7,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_{364d} = 6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$MZP = (7,1 + 6,3) \cdot 0,5 = 6,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Což nám dá MZP roven $6,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

[16,19,23,25,28,32]

V další části se zaměříme na hydroenergetický potenciál. Ten lze vypočítat pomocí rovnice (3):

$$P_{pot.} = k_T \cdot Q \cdot H$$

kde:

$P_{pot.}$ – potenciální výkon elektrárny [kW]

k_T – násobný činitel udávaný velikostí a typem vybrané turbíny [-]

Q – průtok turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

H – spád turbíny [m]

Průtok musíme vybrat z interval 90 a 120 dní. Jelikož tento interval je podle statistiky zvolený pro maximální využití a tedy maximální výkon navrhované elektrárny. [15,19,23,25,28]

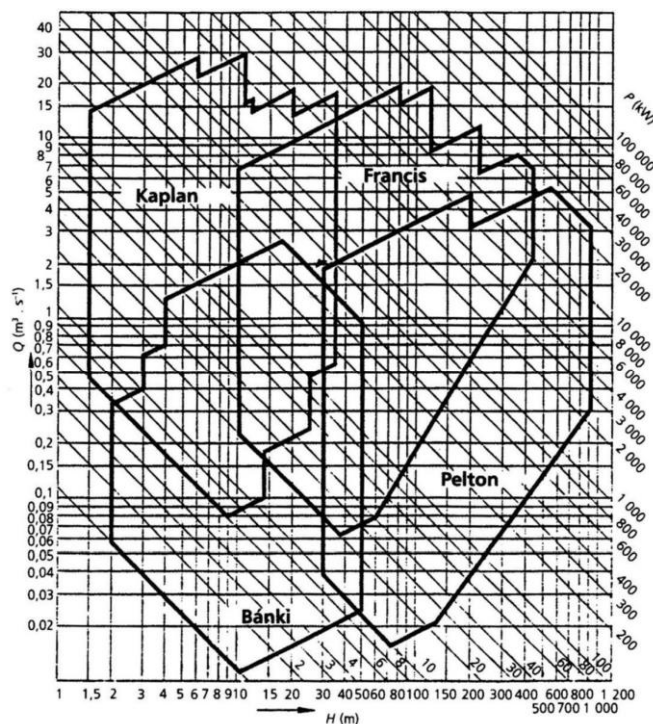
Ten dostaneme výpočtem obledníku pod křivkou průtoku. Mezi průtokem a výkonem platí přímá úměra. Z grafu vychází nejlepší průtok na hodnotu $Q_{109} = 23,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Další hodnoty rovnice – spád turbíny bude uvažovat stejný jako v minulosti 1,5 m. Násobný činitel má hodnotu 8 pro velikosti poloměru turbín větší než 0,5 m. Po dosazení do rovnice (3):

$$P_{pot.} = 8 \cdot 23,2 \cdot 1,5 = 278,4 \text{ kW}$$

Tato velikost nám udává maximální možný hydropotenciál navrhované elektrárny. [16,19,23,25,28,32]

V neposlední řadě musíme zvolit vhodnou turbínu a jejich počet. Podle normy ČSN 75 2601 – *Malé vodní elektrárny v části 9.1.1* se: „*Při více než dvou soustrojích se mají všechna soustrojí navrhovat o stejné velikosti.*“ [10] Z toho usuzujeme, že dané turbíny budeme rozdělovat v poměru 2:1 nebo 1:1 nebo 1:1:1.

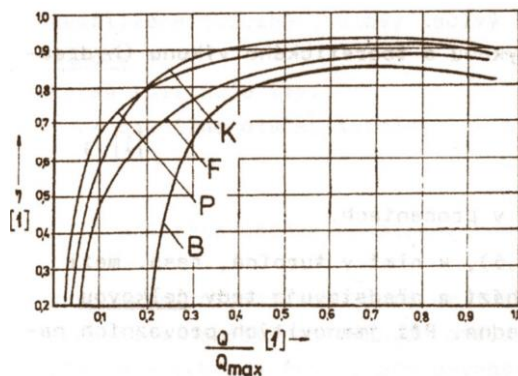
Výběr turbín závisí na několika faktorech. Proměnnost toku, neboli jak moc budeme potřebovat regulovat turbínu. Spád, ovlivnění celkového výkonu a funkčnost stroje. A nakonec hltnost turbíny, jak velké množství vody roztáčí lopatky. Provedeme prvotní odhad z (obrázku 35.). [16,19,23,25,28,32,68]



Obrázek 35: Diagram oblastí použití turbín

Náš navrhovaný spád je 1,5 m, což nás již posouvá na hranici Kaplanovi turbíny. Odhadovaný průtok $23,2 m^3 \cdot s^{-1}$ budeme muset rozdělit, abychom se vešli do funkční oblasti. Poměrem 1:1 jsme na průtocích $11,6 m^3 \cdot s^{-1}$ a $11,6 m^3 \cdot s^{-1}$. Tento poměr je ideální, jelikož jsme bezpečně ve funkční oblasti. Poměr 2:1 má průtoky $15,4 m^3 \cdot s^{-1}$ a $7,73 m^3 \cdot s^{-1}$. Uvedený poměr nás staví velice blízko funkční hranice v případě prvního průtoku. Proto budeme dále postupovat s poměrem 1:1. [16,19,23,25,28,32,42,67]

Správný výběr účinnosti turbíny je další faktor pro zamyšlení.



Obrázek 36: Graf účinností turbín

Z (obrázku 36.) je patrné, že Kaplanova turbína si zachovává průměrnou účinnost 0,9 (90%) v intervalu od 0,2 (20%) k 1 (100%) hltnosti. Pro další výpočty použijeme hodnotu účinnosti 0,9.

[16,19,23,25,28,32,42,67]

Přesuneme se na výkon turbíny na hřídeli. Pro výpočet použijeme rovnici (4):

$$P_T = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T$$

kde:

P_T – výkon na hřídeli turbíny [kW]

Q – průtok turbínou [m³·s⁻¹]

H – spád turbíny [m]

η_T – účinnost turbíny [-]

Rovnici(4) použijeme pro variantu s poměrem 1:1. Výkon pro každou turbínu spočítáme zvlášť a nakonec celkový výkon na hřídeli součtem dílčích výkonů. Turbíny jsou značeny T1 a T2.

$$P_{T1} = 9,81 \cdot 11,6 \cdot 1,5 \cdot 0,9 = 153,6 \text{ kW}$$

$$P_{T2} = 9,81 \cdot 11,6 \cdot 1,5 \cdot 0,9 = 153,6 \text{ kW}$$

Celkový výkon pak spočítáme podle vztahu rovnice (5):

$$P_T = P_{T1} + P_{T2} = 153,6 + 153,6 = 307,2 \text{ kW}$$

[16,19,23,25,28,32,42,67]

Další nutností pro další výpočty jsou otáčky daných turbín. Rovnice (6) je:

$$n = 1,166 \frac{n_s \cdot H \cdot \sqrt[4]{H}}{\sqrt{P_T}}$$

kde:

n – jmenovité otáčky turbíny [min^{-1}]

n_s – specifické otáčky geometricky podobné turbíny [min^{-1}]

H – spád turbíny [m]

P_T – výkon turbíny na hřídeli [W]

Ze znalosti spádu, výkonu turbíny na hřídeli a pomocí doporučených materiálů pro zjištění specifických otáček $n_s = 800 \text{ min}^{-1}$. Dosadíme do rovnice(6).

$$n_{T1} = 1,166 \frac{800 \cdot 1,5 \cdot \sqrt[4]{1,5}}{\sqrt{153,6}} = 125 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{T2} = 1,166 \frac{800 \cdot 1,5 \cdot \sqrt[4]{1,5}}{\sqrt{153,6}} = 125 \text{ min}^{-1}$$

Posledním komponentem do technického řešení jsou generátory. Jelikož poměr turbín je 1:1 s celkovým mechanickým výkonem 307,2 kW, je nutné mít dva generátory s minimálním jmenovitým výkonem 154 kW. Uvedená elektrárna nebude pracovat v ostrovním režimu, může se proto využít asynchronních motorů pro generaci elektrické energie. Pro ochranu možným přetížením bude uvažováno 95% přeměna mechanického výkonu turbíny na jmenovitý výkon generátoru. [16,19,23,25,28,32,42,67]

Rovnice (7) pro přepočet je:

$$P_{NG} = \frac{P_T \cdot \eta_P}{0,95}$$

kde:

P_{NG} – jmenovitý výkon generátoru [kW]

P_T – výkon turbíny na hřídeli [kW]

η_P – účinnost převodů [-]

Po dosazení do rovnice (7) s účinností převodů 0,96:

$$P_{NG1} = \frac{153,6 \cdot 0,96}{0,95} = 155,2 \text{ kW}$$

$$P_{NG2} = \frac{153,6 \cdot 0,96}{0,95} = 155,2 \text{ kW}$$

Z vypočítaných jmenovitých výkonů generátorů lze vybrat motory z typizované výkonové řady s jmenovitým výkonem 160 kW, třífázové asynchronní motory se sdruženým napětím 400 V. Konstrukčně mají 8 pólů a pracovní otáčky 740 min^{-1} . Z uvedených informací od výrobce účinnost motorů je 0,942. Motory musí přejít do generátorového režimu, proto z 8 pólů konstrukce jejich synchronní otáčky jsou 750 min^{-1} . Otáčky musí překročit danou hranici 750 min^{-1} , to značí že v generátorovém režimu budou motory mít 765 min^{-1} . Motory tedy bude potřeba převádět z hřídele turbíny do rychla. [16,19,23,25,28,32,41,42,61,67]

Převod lze spočítat z rovnice (8):

$$p_P = \frac{n_G}{n_T}$$

kde:

p_P – převodní poměr otáček

n_G – otáčky generátoru [min^{-1}]

n_T – otáčky turbíny [min^{-1}]

Z rovnice (8) získáme převodní poměr:

$$p_{P1} = \frac{765}{125} = 6,12$$

$$p_{P2} = \frac{765}{125} = 6,12$$

Díky vypočtenému převodnímu poměru je možné vybrat řemenové převody. Ploché řemenové převody mají výhodu ve vysokém možném převodu až 1:15. Jsou také nejstarším možným způsobem přenosu výkonů. Dojde-li k přetížení jedné či druhé strany převodu, řemeny mohou proklouznout. Řemenové převody mají danou účinnost v intervalu od 0,96 až 0,98. [16,19,23,25,28,32,42,67]

Posledním dílkem v technickém řešení je výkon na výstupních svorkách generátorů (elektrárny). Ten lze získat z rovnice (9):

$$P_{MVE} = \sum_{i=1}^k P_{Ti} \eta_{Gi} \eta_{Pi}$$

kde:

P_{MVE} – celkový dosažitelný výkon vodní elektrárny [kW]

k – počet soustrojí [-]

i – číselný index označení soustrojí [-]

P_{Ti} – výkon na hřídeli i -té turbíny [kW]

η_{Gi} – účinnost i -tého generátoru [-]

η_{Pi} – účinnost i -tého převodu [-]

Po dosazení všech potřebných hodnot a vybráním účinnosti převodu 0,96 jako v rovnici (7), získáme celkový dosažitelný výkon elektrárny z rovnice(9):

$$P_{MVE} = 2 \cdot (153,6 \cdot 0,942 \cdot 0,96) = 277,8 \text{ kW}$$

Získaná hodnota je nepatrně menší než teoretický maximální hydropotenciál dané lokality, což je zcela v mezích. Pokud by celkový dosažitelný výkon elektrárny přesahoval teoreticky možný potenciál lokality, navrhovaná elektrárna by nebyla efektivní. Postavením navržené elektrárny by se aktuální instalovaný výkon zvýšil z 5,8 MW na 6,077 MW. Vzrůst není rapidní, ale elektrárny podobného výkonu je možno vystavět i na dalších místech. [16,19,23,25,28,32,35,42,66,67]

Závěr

Ve své diplomové práci jsem shrnul historii vodní energie. Její pokroky od starověku až po Průmyslovou revoluci. Jak důležitá byla vodní energie pro lidstvo v jeho vývoji. Pokračoval jsem samotnou aplikovatelností vodní energie. Mechanická energie vody v podobě vodního kola, jeho druhů a účinností. Elektrická energie z pohledu elektráren. Jejich rozdělení podle typů na akumulární, přečerpávací, průtočné a přílivové. Z pohledu velikostí na velké, střední a malé. Zakončil jsem první kapitolu výhodami vodních elektráren, např. velice nízkými emisemi oproti elektrárnám vyrábějící elektrickou energii z fosilních paliv. Nezapomněl jsem i některé nevýhody.

V další části své práce jsem se snažil seskupit informace o vodních turbínách. Na začátku obecná historie jejich vývoje. Zmiňuji rozdělení na typy regulační a impulzní. Následná část vysvětluje více do hloubky jednotlivé druhy turbín. Začínám Francisovo turbínou. Pokračuji na Kaplanovu přes Tysonovu a Deriazovu, dále Bánkiho a končím u Peltonovi turbíny.

V poslední části své práce se zaměřuji na energetický potenciál vybraného vodního toku. Vybral jsem řeku Berounku, jelikož je mi geograficky nejbližší. Postupně představuji všechny malé vodní elektrárny na celé řece. Jejich podstatné technické parametry, např. počet zdrojů (turbín), celkový jmenovitý výkon. Příkládám i obrázek uložení elektráren na řece. V další části počítám teoretický maximální energetický potenciál celého toku. Porovnávám ho s aktuálním instalovaným výkonem na řece. Energetický potenciál Berounky je využit pouze z 23 %. V poslední části práce se zabývám vlastním technickým řešením ke zlepšení aktuálního energetického potenciálu ve formě rekonstrukce již neaktivní malé vodní elektrárny Liblínský mlýn. Návrhem je konstrukce dvou stejně velkých Kaplanových turbín v poměru 1:1 a k nim příslušným asynchronním motorů v generátorickém režimu s celkovým instalovaným výkonem 277,8 kW. Aktuální instalovaný výkon na řece by implementováním navrhované elektrárny vzrostl z 5,8 MW na 6,077 MW.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. Valentovský mlýn. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/atlas/detail.php?kat=1&id=649>
- [2] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. Olešná II. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/atlas/detail.php?id=648>
- [3] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. Olešná I. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/atlas/detail.php?id=647>
- [4] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. Nezabudlce. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <https://www.calla.cz/atlas/detail.php?kat=1&id=772>
- [5] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. MVE Černošice. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/atlas/detail.php?id=1014>
- [6] *Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie*. Lejskův mlýn. [online]. [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/atlas/detail.php?id=646>
- [7] Berounka-letecky.unas.cz. Jezy na řece Berounce. [online]. [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <http://www.berounka-letecky.unas.cz/index-vodactvi-jezy%20na%20berounce.htm>
- [8] *Wikipedia: the free encyclopedia.: Hydroelectricity* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectricity>
- [9] *Department of Energy: History of Hydropower* [online]. Washington, DC 20585, 2002- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower>
- [10] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz*[online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 5. 3. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254#p36>
- [11] DOBNET. Jak se z mlýna v Dobřichovicích stala elektrárna. [online]. 2016, 2016(9), 24 str. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: https://idobnet.cz/wp-content/uploads/2016/09/DZ9_2016e.pdf
- [12] *Wikipedia: the free encyclopedia: Hydropower* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydropower>
- [13] Elektroskanzen Čechův mlýn. Historie. [online]. [cit. 2022-1-15]. Dostupné z: <https://www.elektroskanzen-slovice.cz/>

- [14] ENECOS, s. r. o.: Měřicí a řídicí technika pro vodní elektrárny [online]. [cit. 2022-2-10]. Dostupné z: <https://enecos.cz/>
- [15] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. POZE. [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/poze>
- [16] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Roční zpráva o provozu ES ČR 2019. [online]. 2020 [cit. 2022-1-30]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [17] *Wikipedia: the free encyclopedia: Water wheel* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel
- [18] HLADÍK, Milan, HÁLA, Robin, HÁNOVÁ, Kateřina K.. Studie proveditelnosti zprůchodnění migračních překážek na vodních tocích v povodí Vltavy: 4. Katalog příčných překážek-Berounka [online]. Praha: Vodohospodářský rozvoj a výstavba, 2011 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/migrace-vltava/index.html#>
- [19] HOLATA, Miroslav, GABRIEL, Pavel, ed. Malé vodní elektrárny: projektování a provoz. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [20] Hlásná a předpovědní povodňová služba ČHMI. Liblín. [online]. [cit. 2022-1-06]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfdyn.php?seq=2505275
- [21] *Wikipedia: the free encyclopedia: Pumped-storage hydroelectricity* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity
- [22] HOŠEK, Ladislav. Energetická studie části toku Berounky [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/handle/11025/10132>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [23] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [24] *Wikipedia: the free encyclopedia: Run-of-river hydroelectricity* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Run-of-the-river_hydroelectricity
- [25] MELICHAR, Jan. Malé vodní turbíny. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01403-7.
- [26] *Naše voda: informační portál o vodě*. Ministři zemědělství a životního prostředí otevřeli jez v Černošicích. [online]. 2017 [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/ministri-zemedelstvi-zivotniho-prostredi-otevrel-i-jez-cernosicich/>

- [27] *Operační program podnikání a inovace*. 3.1 EED03/845 MVE Nižbor - kraj Středočeský. [online]. [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: <http://www.mpo-oppi.cz/odkazy/337-uspesne-projekty-programu-ekoenergie.html>
- [28] MASTNÝ, P. *ANZDOC: Malé zdroje elektrické energie Vodní energie* [online]. UEEEN VUT FEKT v Brně [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://adoc.pub/male-zdroje-elektricke-energie-vodni-energie.html>
- [29] *Nejen hornictví.info*. Stará Huť - Hýskov. [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/techpam/hyskov/hyskov.htm>
- [30] *Wikipedia: the free encyclopedia: Small hydro* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_hydro
- [31] *Plzen.cz: zpravodajský portál*. Malá vodní elektrárna v Plzni-Bukovci oslavila 10. narozeniny. [online]. 2017 [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: <https://www.plzen.cz/mala-vodni-elektrarna-v-plzni-bukovci-oslavila-10-narozeniny/>
- [32] *Portál ČHMÚ*. Denní data dle zákona 123/1998 Sb. [online]. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb; zpracováno autorem
- [33] RenoEnergie, a. s.: energie efektivně [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <http://renoenergie.cz/>
- [34] *Středočeská vědecká knihovna v Kladně: příspěvková organizace*. Malá vodní elektrárna (Zadní Třeboň, Česká republika). [online]. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: https://ipac.svkk1.cz/ar1-kl/cs/detail-kl_us_auth-0247763-Mala-vodni-elektrarna-Zadni-Treban-cesko/
- [35] *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů*. Malé vodní elektrárny (MVE) v ČR: Reálně využitelný potenciál rozvoje MVE pro období 2020 - 2030. In: *Malé vodní elektrárny (MVE) v ČR: Reálně využitelný potenciál rozvoje MVE pro období 2020 - 2030* [online]. Praha: Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, 2018, 2018, s. 44 [cit. 2022-1-18]. Dostupné z: http://www.spvez.cz/files/MVE_v_%C4%8CR.pdf
- [36] ŠTOLL, Čestmír, Stanislav KRATOCHVÍL a Miroslav HOLATA. *Využití vodní energie*. Praha 1: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1977. DT 621.22.
- [37] *Wikipedia: the free encyclopedia: Kaplan turbine* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine
- [38] *TV-ADams.wz.cz*. Berounský jez. [online]. [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: http://www.tv-adams.wz.cz/jez_beroun.html
- [39] *Topenářství, instalace*. Malá vodní elektrárna Kaceřov (Ber. km 111,4). [online]. 2018, **2018**(1), 22 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/casopis/1-detail-3487>

- [40] *TV-ADams.wz.cz*. Seznam vodních elektráren na Berounce. [online]. [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <http://tv-adams.wz.cz/berounka-mve.html>
- [41] *TZB-info - Stavebnictví, Úspory energií, technická zařízení budov* [online]. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/>
- [42] *VODNÍ TURBÍNY s. r. o. - Václav Jiříček* [online]. [cit. 2022-3-11]. Dostupné z: <http://vodniturbiny.com/>
- [43] *Vodnimlyny.cz*. Bluuský mlýn. [online]. [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/437-bluksky-mlyn>
- [44] *Vodnimlyny.cz*. Čechův mlýn. [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/278-cechuv-mlyn>
- [45] *Wikipedia: the free encyclopedia: Pelton wheel* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pelton_wheel
- [46] *Wikipedia: the free encyclopedia: Cross-flow turbine* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-flow_turbine
- [47] *Wikipedia: the free encyclopedia: Water Turbine* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine
- [48] *Vodnimlyny.cz*. Havlíkův, Špitální, Panský mlýn. [online]. 2012 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/434-havlikuv-spitalni-pansky-mlyn>
- [49] *Vodnimlyny.cz*. Hut' Marie Anny, Maria Anna Hütte, Fürstenberské železářny, Eisenhämmer, Permon. [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/1105-hut-marie-anny-maria-anna-hutte-furstenberske-zelezarny-eisenhammer-permon>
- [50] *Vodnimlyny.cz*. Libštejnský mlýn. [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/471-libstejnsky-mlyn>
- [51] *Vodnimlyny.cz*. Kadečkův mlýn. [online]. 2019 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/272-kadeckuv-mlyn>
- [52] *Vodnimlyny.cz*. Liblínský, Kozojedský, Šejnovský mlýn. [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/hr/mlyny/estates/detail/470-liblinsky-kozojedsky-sejnovsky-mlyn>
- [53] *Vodnimlyny.cz*. Mlýn Bukovec. [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/4872-mlyn-bukovec>
- [54] *Vodnimlyny.cz*. Mlýn Darová. [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/8740-mlyn-darova>
- [55] *Vodnimlyny.cz*. Mlýn v Zadní Třebani. [online]. [cit. 2020-10-23]. Dostupné z:

<http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/1712-mlyn-v-zadni-trebani>

- [56] *Vodnimlyny.cz*. Mlýn Zvíkovec, Rečkův mlýn, Fišerova elektrárna. [online]. [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/2706-mlyn-zvikovec-reckuv-mlyn-fiserova-elektrarna>
- [57] *Vodnimlyny.cz*. Mudrův, Řevnický mlýn. [online]. [cit. 2020-10-04]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/3348-mudruv-revnicky-mlyn>
- [58] *Wikipedia: the free encyclopedia: Francis turbine* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine
- [59] *Vodnimlyny.cz*. Valentovský mlýn. [online]. [cit. 2020-10-12]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/473-valentovsky-mlyn>
- [60] *Vodnimlyny.cz*. Valentův mlýn. [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/827-valentuv-mlyn>
- [61] *VYBO Electric*. Elektromotory 1AL - 8 pólové. [online]. [cit. 2022-4-28]. Dostupné z: <https://www.elektro-motor.cz/kategoria-produktu/elektromotory-700ot/>
- [62] *Wikipedia: the free encyclopedia*. Berounka. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-09-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Berounka>
- [63] *Wikipedia: the free encyclopedia*. Vodní elektrárna [online]. [cit. 2021-10-12]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna
- [64] VÍT, Petr. Vývoj využití vodní energie v MVE v Čechách. *Ing. Petr Vít www.hydrotechnika.cz* [online]. 2012 [cit. 2021-09-16]. Dostupné z: <https://www.hydrotechnika.cz/upload/hydrotechnika/docs/V%C3%BDvoj%20MVE.pdf>
- [65] VOBOŘIL, David. Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OENERGETICE.CZ* [online]. 24. listopad 2016 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [66] SKUPINA ČEZ. Využívání vodní energie v ČR. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice.html>
- [67] WIKIPADIE. Vodní elektrárna. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2002, 2019 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna
- [68] VOJÁČEK, Antonín. Vodní elektrárna. *Automatizace.HW.cz* [online]. 2002, 13. prosinec 2006 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006121301>
- [69] NOVÁK, Libor. Vodní energie (I) - zdroje vodní energie. *TBZ-info* [online].

2001, 6.listopad 2006 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3645-vodni-energie-i-zdroje-vodni-energie>

- [70] WIKIDEPÍE. Seznam vodních elektráren v Česku. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2002, 2018 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_vodn%C3%ADch_elektr%C3%A1ren_v_%C4%8Cesku
- [71] TV-ADAMS.WZ.CZ. Malé vodní elektrárny. *TV-ADams.wz.cz* [online]. 2009 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <http://www.tv-adams.wz.cz/mve.html>

Seznam Obrázků

[1] *Obrázek 1:* Archimédův vodní šroub

Wikipedia: the free encyclopedia. Archimédův šroub [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Archim%C3%A9d%C5%AFv_%C5%A1roub

[2] *Obrázek 2:* Bernard Forest de Bélidor

Wikipedia: the free encyclopedia. Bernard Forest de Bélidor [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bernard_Forest_de_B%C3%A9lidor

[3] *Obrázek 3:* Vodní elektrárna Redlands

Edison Tech Center: Redlands Power Plant 1893 [online]. 2013 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://edisontechcenter.org/Redlands.html>

[4] *Obrázek 4:* Horizontální kolo s vertikální osou

Wikipedia: the free encyclopedia. Water wheel [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel

[5] *Obrázek 5:* Vertikální spodní kolo s horizontální osou

Wikipedia: the free encyclopedia. Water wheel [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel

[6] *Obrázek 6:* Vertikální střední kolo s horizontální osou

Wikipedia: the free encyclopedia. Water wheel [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel

[7] *Obrázek 7:* Vertikální horní kolo s horizontální osou

Wikipedia: the free encyclopedia. Water wheel [online]. [cit. 2021-10-12].San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel

[8] *Obrázek 8: Francisova turbína*

Wikipedia: the free encyclopedia. Francisova turbína [online]. [cit. 2021-10-12]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Francisova_turb%C3%ADna

[9] *Obrázek 9: Kaplanova turbína*

Wikipedia: the free encyclopedia. Kaplan turbine [online]. [cit. 2021-10-12]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine

[10] *Obrázek 10: Peltonova turbína*

Mechanical Booster: Pelton Turbine Working, Main Parts, Application with Diagram [online]. 2016 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.mechanicalbooster.com/2016/10/pelton-turbine-working-main-parts-application-with-diagram.html>

[11] *Obrázek 11: Bánkiho turbína*

Wikipedia: the free encyclopedia. Bánkiho turbína [online]. [cit. 2021-10-12]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/B%C3%AAnkiho_turb%C3%ADna

[12] *Obrázek 12: MVE Černošice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[13] *Obrázek 13: MVE Dolní Mokropsy*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[14] *Obrázek 14: MVE Dobřichovice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[15] *Obrázek 15: MVE Řevnice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[16] *Obrázek 16: MVE Zadní Třebáň*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[17] *Obrázek 17: MVE Beroun*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[18] *Obrázek 18: MVE Hýskov*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[19] *Obrázek 19: MVE Nižbor*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[20] *Obrázek 20: MVE Sýkořice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[21] *Obrázek 21: MVE Roztoky*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[22] *Obrázek 22: MVE Nezabudice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[23] *Obrázek 23: MVE Šlovice*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[24] *Obrázek 24: MVE Zvíkovec*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[25] *Obrázek 25: MVE Lejskův mlýn*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[26] *Obrázek 26: MVE Libštejnský mlýn*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[27] *Obrázek 27: MVE Olešná*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[28] *Obrázek 28: MVE Kaceřovský mlýn*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[29] *Obrázek 29: MVE Darová*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[30] *Obrázek 30: MVE Valentovský mlýn*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[31] *Obrázek 31: MVE Bukovec (mlýn)*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[32] *Obrázek 32: MVE Bukovec (papírna)*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[33] *Obrázek 33: Liblínský mlýn*

Výřez z mapy ČÚZK – 2022. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

[34] *Obrázek 34: Graf čáry trvání průtoků – Liblínský mlýn*

Denní data dle zákona 123/1998 Sb. *Portál ČHMÚ* [online]. [cit. 2022-02-15].
Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb; zpracováno autorem

[35] *Obrázek 35: Diagram oblastí použití turbín*

MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

[36] *Obrázek 36: Graf účinností turbín*

MELICHAR, Jan. *Malé vodní turbíny*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01403-7. Str. 34