



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

Využití energetického potenciálu jezera Milada

Utilization of the energy potential of Lake Milada

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.

Oldřich Sokol

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sokol** Jméno: **Oldřich** Osobní číslo: **474662**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Využití energetického potenciálu jezera Milada**

Název diplomové práce anglicky:

**Utilization of the energy potential of Lake Milada**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rekultivace krajiny po povrchové těžbě hnědého uhlí.
- 2) Přečerpávací vodní elektrárny a jejich význam pro energetiku.
- 3) Technické řešení Přečerpávací vodní elektrárny Milada.
- 4) Ekologické dopady přečerpávacích vodních elektráren.

Seznam doporučené literatury:

- 1) ČSN 75 0120. Vodní hospodářství: Terminologie hydrotechniky. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2009, 166 s.
- 2) HOLATA, Miroslav, Pavel GABRIEL, ed. Malé vodní elektrárny: projektování a provoz. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- 3) 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.
- 4) MELICHAR, Jan. Malé vodní turbíny. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1403-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha, 13. 5. 2022

Oldřich Sokol

## Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o možnostech a vlastnostech technických řešení přečerpávacích vodních elektráren a ukazuje na příkladu přečerpávací elektrárny Milada o jejíž stavbě se uvažuje, jak lze některá z nich použít. Významný důraz je přitom kladen na účinnost procesu přečerpávání. Přečerpávací elektrárny mají svůj význam v elektrizační soustavě, který se neustále vyvíjí. Proto je součástí práce analýza současných funkcí přečerpávacích elektráren doplněný krátkým rozbohem možných alternativ. Dále tato práce shrnuje znalosti o rekultivační činnosti po těžbě hnědého uhlí s ukázkou příkladů v severních Čechách s lehkým důrazem na oblast dnešního jezera Milada. Následky lidské činnosti se zabývá i poslední část práce, která popisuje různé ekologické následky stavby a provozu přečerpávacích vodní elektrárny a aplikuje tyto poznatky na elektrárnu Milada.

## Abstract

This magister thesis is about technical possibilities and attributes of pumped-storage hydroelectric powerplants. It displays the usage of these possibilities on specific example of would-be powerplant Milada. Emphasis is given to the efficiency of energy storing and recovering. Pumped-storage powerplant has ever evolving purpose in electrical grid. Therefore, is study of present functions of pumped-storage powerplants and analysis of possible alternatives part of this thesis. Part of this thesis is also given to land reclamation efforts after conclusion of open-pit mining of lignite or brown coal. Included are examples of finished and ongoing processes in northeastern part of Czechia. A little emphasis is given to the area of today lake Milada. The last part of this thesis describes ecological consequences of building and operation of pumped-storage powerplants and applies this on powerplant Milada.

## Klíčová slova

Přečerpávací vodní elektrárna, PVE, Milada, rekultivace, účinnost

## Key words

Pumped-storage powerplant, Milada, land reclamation, efficiency

## Obsah

1	Seznamy.....	8
1.1	Seznam obrázků .....	8
1.2	Seznam tabulek .....	9
1.3	Seznam grafů.....	9
1.4	Seznam zkratk.....	10
1.5	Seznam veličin .....	11
2	Úvod .....	12
3	Mapa.....	13
4	Těžba uhlí v oblasti a rekultivace po povrchové těžbě.....	14
4.1	Uhlí .....	14
4.2	Budoucnost lomů .....	14
4.3	Rekultivace lomů .....	15
4.3.1	Typy rekultivace.....	15
4.3.2	Provedené rekultivace v severních Čechách .....	16
4.3.3	Využití lomových jezer.....	19
4.3.4	Rekultivace lomu Chabařovice .....	21
5	Přečerpávací elektrárna .....	23
5.1	Příklady PVE.....	23
5.2	Výkon PVE.....	23
5.3	Akumulační kapacita PVE .....	23
5.4	Hráze nádrží.....	24
5.5	Turbína .....	26
5.6	Přivaděče .....	26
5.7	Generátor .....	27
6	Účinnost.....	28
6.1	Ztráty v přivaděčích .....	28
6.1.1	Rychlost vody v přivaděči .....	32
6.2	Ztráty v turbíně.....	33
6.3	Ztráty v generátoru-motoru .....	34
6.4	Ztráty v přenosu elektřiny .....	35
7	Role Přečerpávacích vodních elektráren v energetice .....	37
7.1	Podpůrné služby .....	37
7.1.1	Obchodování s podpůrnými službami .....	39
7.2	Využití PVE pro poskytování podpůrných služeb .....	39
7.3	Běžné využití PVE.....	40

7.4	Alternativy k PVE .....	43
8	Technické řešení přečerpávací vodní elektrárny Milada.....	46
8.1	Vodní nádrže.....	46
8.1.1	Hladina dolní nádrže.....	47
8.1.2	Varianta 1 .....	51
8.1.3	Varianta 2 .....	54
8.1.4	Varianta 3 .....	55
8.2	Turbína-čerpadlo .....	57
8.2.1	Varianta 1 .....	58
8.2.2	Varianta 2 .....	59
8.2.3	Varianta 3 .....	59
8.3	Přivaděče .....	60
8.3.1	Varianta 1 .....	61
8.3.2	Varianta 2 .....	63
8.3.3	Varianta 3 .....	64
8.4	Generátor-Motor.....	65
8.4.1	Varianta 1 .....	66
8.4.2	Varianta 2 .....	66
8.4.3	Varianta 3 .....	66
8.5	Transformátor .....	67
8.5.1	Varianta 1 .....	67
8.5.2	Varianta 2 .....	68
8.5.3	Varianta 3 .....	69
8.6	Porovnání variant .....	70
8.7	Vyvedení do rozvodny .....	70
9	Ekologické následky stavby a provozování Přečerpávací vodních elektráren.....	73
9.1	Vlivy působící na přírodu .....	73
9.2	Vlivy působící na člověka.....	75
9.3	Ekologické následky stavby a provozu PVE Milada .....	76
10	Závěr .....	78
11	Seznamy zdrojů .....	80
11.1	Seznam použité literatury .....	80
11.2	Online zdroje .....	80
12	Přílohy.....	85
12.1	Seznam příloh.....	85
12.2	Přílohy.....	86

12.2.1	Příloha 1 účinnost transformátoru.....	86
12.2.2	Příloha 2 Model horní nádrže PVE Milada a přivaděčů.....	88
12.2.3	Příloha 3 Výpočtový soubor pro kapitolu 8.....	89

# 1 Seznamy

## 1.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Mapa oblasti projektu PVE Milada s vyznačeným jezerem Milada a potenciálním místem horní nádrže. Převzato z mapy.cz. Upraveno v programu malování. ....	13
Obrázek 2: Výsypka Malé Březno .....	18
Obrázek 3: Umístění Ervěnického koridoru na mapě mezi lomy ČSA a Vršany .....	19
Obrázek 4: Rekultivační oblast jezera Milada s barevným rozlišením dle typu rekultivace a stavu dokončení k březnu 2011. Červenou šipkou jsem přioznačil oblast (bohužel částečně zakrytou legendou) potenciálního umístění horní nádrže PVE.....	21
Obrázek 5: Hráz nádrže Lipno I. Jsou zde vidět oba výše zmiňované typy hrází.....	25
Obrázek 6: Schéma přečerpávací elektrárny Dlouhé Stáně s vyznačením objektů. ....	27
Obrázek 7: Význam veličin v tabulce 3. Kresleno vlastní myší v programu Malování podle příslušného obrázku 7.10 v . ....	31
Obrázek 8: Zatížení elektrizační soustavy ČR ve dni minima roku 2020 (5. 7.).....	41
Obrázek 9: Cena elektřiny a obchodované množství na denním trhu ve dni minima roku 2020 (5. 7.)	41
Obrázek 10:Zatížení elektrizační soustavy ČR ve dni maxima roku 2020 (22. 1.) .....	42
Obrázek 11:Cena elektřiny a obchodované množství na denním trhu ve dni maxima roku 2020 (22. 1.) .....	42
Obrázek 12: Jezero Milada s vyznačenými vrstevnicemi dna. Přeloženo autorem. ....	47
Obrázek 13:Grafické znázornění práce s obdélníkem. Vytvořeno autorem práce ve Wordu a Malování. ....	48
Obrázek 14: Měření poměru stran naznačeného obdélníka, jezera Milada. Měřeno v Google Earth. Graficky upraveno v Malování.....	48
Obrázek 15: Model horní nádrže pro varianty 1 a 2 - Umístění v terénu. Pohled ve směru Trmice. ...	51
Obrázek 16: Horní nádrž pro variantu 1 s prohloubeným dnem. ....	51
Obrázek 17:Model horní nádrže pro variantu 3 - Umístění v terénu. Pohled ve směru Trmice.....	55
Obrázek 18: Mapa sítě přenosové soustavy. Upraveno v malování. Modrým křížkem vyznačena lokalita jezera Milada. ....	71
Obrázek 19: Mapa s vyznačeným umístěním rozvodny Chotějovice a umístěním PVE Milada. Převzato z <a href="http://www.google.cz/maps">www.google.cz/maps</a> . Upraveno v malování. ....	71
Obrázek 20: Spektrum Slunečního záření dopadajícího na povrch Země. Převzato z:. Upraveno v malování. ....	74



## 1.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Nahoře: výměra dokončených rekultivací do konce roku 1980. Uprostřed: Výměra rozpracovaných rekultivací na začátku roku 1981. ....	17
Tabulka 2: Závislost vtokového a výtokového ztrátového činitele na tvaru vtoku/výtoku.....	30
Tabulka 3: Ztrátové činitele v ohybu pro oblouková kolena se změnou směru o 90° v závislosti na geometrii kolene a drsnosti potrubí.....	31
Tabulka 4: Závislost hladiny jezera Milada na objemu vyčerpané vody .....	50
Tabulka 5: Parametry vodního režimu varianty 1 .....	52
Tabulka 6: Parametry vodního režimu varianty 2 .....	54
Tabulka 7: Parametry vodního režimu varianty 3 .....	56
Tabulka 8: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 1 v závislosti na teplotě vody a drsnosti betonové trubky.....	61
Tabulka 9: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 2 v závislosti na drsnosti betonové trubky. ....	63
Tabulka 10: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 3 v závislosti na drsnosti betonové trubky. ....	64
Tabulka 11: Technická data pro 220 kV dvouvinuťové transformátory. Převzato. Přeloženo autorem. ....	67
Tabulka 12: Účinnost cyklu při optimálním průběhu cyklu pro jednotlivé varianty. ....	70
Tabulka 13: Základní parametry 3 variant řešení.....	70
Tabulka 14: spektrální odrazivost vody, vegetace a zeminy. ....	74
Tabulka 15: Zábor plochy horní nádrží.....	77
Tabulka 16: Pokles hladiny jezera Milada při plném načerpání horní nádrže. ....	78
Tabulka 17: Parametry elektrárny při realizaci autorem preferované varianty 1.....	78

## 1.3 Seznam grafů

Graf 1: Průběh účinnosti transformátoru v závislosti na přenášeném výkonu.....	36
Graf 2: Funkční závislost poklesu hladiny jezera Milada na vyčerpaném objemu vody .....	50
Graf 3: Funkční závislost velikosti vodní plochy na výšce hladiny.....	52
Graf 4: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 1. ....	53
Graf 5: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 2. ....	55
Graf 6: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 3. ....	57
Graf 7: Vývoj hodnot výparu během let provozu měřící stanice Hlasivo. ....	76

#### 1.4 Seznam zkratk

BS	Start ze tmy
ČR	Česká republika
DT	Denní trh
FCR	Zálohy pro automatickou regulaci frekvence
FVE	Fotovoltaická elektrárna
mFRR	zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací
mFRR <sub>5</sub>	Specifický produkt mFRR
mFRR <sub>12,5</sub>	Standardní produkt mFRR
MUS	Mostecká uhelná společnost, a. s.
OP	Ostrovní provoz
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
RR	Zálohy pro náhradu
SRUQ	Sekundární regulace U/Q
SVR	Služby výkonové rovnováhy
VŘ	Výběrové řízení
VVE	Větrná elektrárna

## 1.5 Seznam veličin

A	velikost vodní plochy [m <sup>2</sup> ]
D	průměr trubice [m]
E	energie [J]
g	gravitační zrychlení [m*s <sup>-2</sup> ]
h	výška [m]
h <sub>z</sub>	ztrátová výška [m]
H	převýšení [m]
l	délka potrubí [m]
m	hmotnost [kg]
ṁ	Hmotnostní tok [kg*s <sup>-1</sup> ]
n	jmenovité otáčky turbíny [ot*min <sup>-1</sup> ]
p	tlak vody [Pa]
P	Výkon [W]
r	poloměr kružnice nebo kruhu [m]
R	hydraulický poloměr potrubí [m]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
Q	průtok [m <sup>3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
Q <sub>T</sub>	hltnost turbíny [m <sup>3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
S	dodávaný zdánlivý výkon do transformátoru [VA]
S <sub>n</sub>	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]
S <sub>p</sub>	průřez potrubí [m <sup>2</sup> ]
T	Hloubka <sup>1</sup> [m]
v	rychlost proudící tekutiny [m*s <sup>-1</sup> ]
V	objem [m <sup>3</sup> ]
Δ	drsnost potrubí [m]
ΔP <sub>o</sub>	ztráty naprázdno [W]
ΔP <sub>k</sub>	ztráty nakrátko [W]
η	účinnost [-]
η <sub>c</sub>	účinnost výroby elektrické energie přečerpávací vodní elektrárnou [-]
η <sub>i</sub>	účinnost jednotlivých částí procesu výroby elektrické energie [-]
λ	součinitel tření [-]
ξ	součinitel ztráty [-]
ρ	hustota [kg*m <sup>-3</sup> ]
τ	kinematická viskozita [m <sup>2</sup> *s <sup>-1</sup> ]

---

<sup>1</sup> Při výpočtech s horní nádrží je hloubka vertikální vzdálenost od koruny hráze. Při výpočtech s jezerem Milada je hloubka vertikální vzdálenost od běžné hladiny jezera při prázdné horní nádrží.

## 2 Úvod

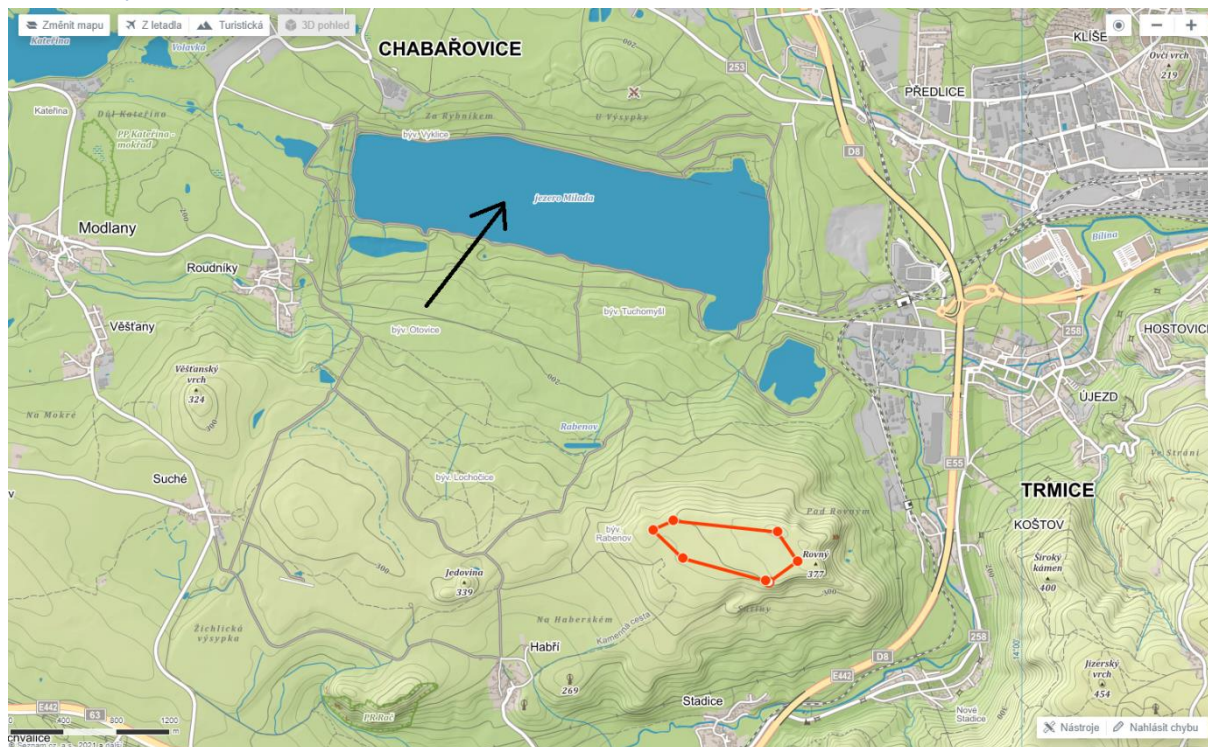
Téma přečerpávací vodních elektráren je v dnešní době více akutní než kdy dřív. Tlak na přechod energetiky k obnovitelným zdrojům jako jsou fotovoltaické elektrárny nebo elektrárny větrné má své následky. Vzhledem k nestálosti výroby elektřiny ze zmíněných zdrojů je nutné se stále více zabývat možnostmi akumulace elektřiny. Léty prověřenou a účinnou možností akumulace jsou přečerpávací elektrárny. Příležitostí postavit nějakou je v našich krajích nemnoho, a tak je zpracování technického návrhu k této jedné velké možnosti, jak v Česku posílit flexibilitu sítě velmi lákavé. Zároveň k elektrárně Milada doposud existuje pouze předběžná, velmi stručná, studie proveditelnosti, která nechává otevřený takřka celý prostor tématu k dalšímu zpracování.

Čtenář této diplomové práce se ovšem neseznámí pouze s mým návrhem řešení přečerpávací elektrárny Milada. Tato práce čtenáře rovněž seznámí s některými souvisejícími tématy. Jezero Milada vzniklo z bývalého lomu, proto hned na začátek věnuji prostor rekultivaci území zasaženého těžbou hnědého uhlí a jaké nové projekty umožnila a umožňuje obnova dříve zcela zničeného území. Význam budování přečerpávacích elektráren jsem již naznačil, nicméně v 5. kapitole čtenáře důkladně seznámím se všemi možnostmi, jak může být přečerpávací elektrárna v elektrizační soustavě užitečná a představím i jiné možnosti, které lze pro totéž použít.

Tím se dostávám k jádru celé práce, technickému návrhu elektrárny. Přečerpávací vodní elektrárna akumuluje energii, proto je pro její fungování zásadním údajem účinnost neboli kolik energie lze dodat zpět do sítě na jednu jednotku energie spotřebované pro akumulaci. Kolem tématu účinnosti se točí celý technický návrh elektrárny.

Začal jsem ekologií a také je skončím. Na konci diplomové práce se čtenář dozví, jaké ekologické následky na své okolí má stavba a provoz přečerpávací vodních elektráren a jak se tyto v případě realizace mohou projevit u přečerpávací vodní elektrárny Milada.

### 3 Mapa



Obrázek 1: Mapa oblasti projektu PVE Milada s vyznačeným jezerem Milada a potenciálním místem horní nádrže. Převzato z mapy.cz. Upraveno v programu malování.

V této kapitole se seznámíme s oblastí, ve které je uvažována nová PVE. Pro orientaci si nejprve řekněme, že v pravém horním rohu mapy je Ústí nad Labem. Černá šipka ukazuje na jezero Milada, které by mělo tvořit spodní nádrž přečerpávací elektrárny. Červený šestiúhelník označuje oblast horní nádrže u vrchu Rovný. Světle šedé oblasti na jih a sever od jezera Milada označují bývalé výsypky hnědouhelného lomu Chabařovice, které jsou dnes již úspěšně zrekultivovány.

Jezero Milada je primárně napájeno ze západu Zalužanským potokem, ve kterém se sbírá voda z části Krušných hor. Odtok z Milady je na východ do řeky Bíliny. Milada svým tvarem je jezerem poměrně rozlehlým s ne moc velkou hloubkou. Při rozloze 252 hektarů a maximální hloubce 24,7 metrů obsahuje v naplněném stavu 35 600 000 m<sup>3</sup> vody<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> *O jezeře* [online]. Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <http://www.jezeromilada.cz/o-jezere>

## 4 Těžba uhlí v oblasti a rekultivace po povrchové těžbě

Oblast, se kterou v této práci pracuji je silně poznamenána těžbou uhlí. Její následky jsou ostatně důvodem, proč je vůbec možné uvažovat o postavení přečerpávací vodní elektrárny.

V oblasti Severočeské hnědouhelné pánve se vyskytují tyto významné povrchové lomy<sup>3,4,5,6</sup>:

lom Chabařovice, kde je těžba již ukončena a po zatopení se z něj stal hlavní objekt zájmu této práce, jezero Milada.

lom Bílina (předpokládaná těžba do roku 2055)

lom Most – Ležáky, který po ukončení těžby skončil též jako jezero (Jezero Most)

lom ČSA (v době tvorby této práce se těžba utlumuje a ukončení se předpokládá v roce 2024)

lom Vršany, jehož součástí je po propojení důlních jam i bývalý lom Jana Švermy (ukončení těžby očekáváno k roku 2050)

lom Nástup – Tušimice (předpokládaná těžba do roku 2040)

Všechny zmíněné lomy jsou ovlivněny existencí těžebních limitů, které od roku 1990, kdy byly vytvořeny, přes dílčí úpravy určují jak konečný rozsah lomů, tak v důsledku i čas, po který bude možno uhlí v lomech těžit.

### 4.1 Uhlí

V lomech v oblasti mezi Ústím nad Labem a Chomutovem se těží hnědé uhlí, které se primárně využívá lokálně k provozu lokálních tepláren a elektráren. Pro lom Bílina je primárním odběratelem Elektrárna Ledvice. Pro lom Nástup-Tušimice jsou primárním odběratelem Elektrárny Prunéřov a Tušimice II<sup>7</sup>. Uhlí z lomů ČSA a Vršany se zpracovává ve společné lokalitě úpravny uhlí Komořany<sup>8</sup>. Ze zmíněných dvou lomů je mimo jiné uhlím zásobována elektrárna Počeradý<sup>9</sup>.

### 4.2 Budoucnost lomů

Po ukončení těžby uhlí v lomech je samozřejmě otázkou, co s těžbou narušenou krajinou. Její obnovování se nazývá rekultivace<sup>10</sup>. Jak jsem již zmínil výše, některé lomy byly po ukončení těžby zatopeny a staly se z nich rybníky (lom Chabařovice, lom Most-Ležáky), některé byly prozatím propojeny s jinými, stále ještě funkčními lomy (například lom Jana Švermy tvoří spolu se stále funkčním lomem Vršany jednu jámu). Co se bude dít s ještě neuzavřenými lomy a jaký bude vývoj jejich okolí v souvislosti s ukončením těžby a obnovou krajiny je otázka na niž se pokusím na dalších stranách alespoň částečně odpovědět. Jednou z možných odpovědí je i nosné téma celé práce, přečerpávací elektrárna na jezeru Milada.

<sup>3</sup> Severočeské doly data a fakta [online]. Severočeské doly a.s. [citováno 1. 2. 2022]. strana 11

Dostupné z: [https://www.sdas.cz/images/681161750\\_brozura-sd-fakta-a-cisla\\_2015\\_web.pdf](https://www.sdas.cz/images/681161750_brozura-sd-fakta-a-cisla_2015_web.pdf)

<sup>4</sup> Útlum lomu ČSA pokračuje, končí hlubinná těžba v bočních svazích [online]. Zdarbuh.cz. [citováno 1. 2. 2022]

Dostupné z:

<https://www.zdarbuh.cz/reviry/mus/utlum-lomu-csa-pokracuje-konci-hlubinna-tezba-v-bocnich-svazich/>

<sup>5</sup> Těžíme a rekultivujeme [online]. Skupina Sev.en [citováno 1. 2. 2022]

Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/cinnosti/#tezba-a-rekultivace>

<sup>6</sup> Severočeské doly data a fakta [online]. Severočeské doly a.s. [citováno 1. 2. 2022]. strana 11

Dostupné z: [https://www.sdas.cz/images/681161750\\_brozura-sd-fakta-a-cisla\\_2015\\_web.pdf](https://www.sdas.cz/images/681161750_brozura-sd-fakta-a-cisla_2015_web.pdf)

<sup>7</sup> Severočeské doly data a fakta [online]. Severočeské doly a.s. [citováno 1. 2. 2022]. strany 5,6

Dostupné z: [https://www.sdas.cz/images/681161750\\_brozura-sd-fakta-a-cisla\\_2015\\_web.pdf](https://www.sdas.cz/images/681161750_brozura-sd-fakta-a-cisla_2015_web.pdf)

<sup>8</sup> Těžíme a rekultivujeme [online]. Skupina Sev.en [citováno 1. 2. 2022]

Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/cinnosti/#tezba-a-rekultivace>

<sup>9</sup> Vyrábíme elektřinu a teplo, Elektrárna Počeradý [online]. Skupina Sev.en [citováno 1. 2. 2022]

Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/cinnosti/#elektrarna-pocerady>

<sup>10</sup> Pojem rekultivace [online]. www.slovník-cizích-slov.abz.cz [online]

Dostupné z: <https://slovník-cizích-slov.abz.cz/web.php/slovo/rekultivace>

### 4.3 Rekultivace lomů

Kromě samotných lomů, jejichž osud jsem již naznačil v kapitole 4.2 a v čemž budu pokračovat i zde, je nutné se podívat i na osud výsypky. Výsypky jsou tvořeny nadložní vrstvou zeminy, která tvořila neúžitnou vrstvu nad vrstvou uhlí, a tedy ji bylo před samotnou povrchovou těžbou uhlí odstranit.

Tento materiál tak byl nejprve přesunován na výsypky mimo dobývací prostor. Dnes se výsypky tvoří uvnitř lomů na již odtěžených místech a nezvětšují tak oblast těžbou přímo zasaženou.

Rekultivace krajiny může mít za cíl obnovit původní krajinný ráz a vlastnosti krajiny, nebo vytvořit na zničené ploše krajinu novou, která na místě původně nebyla. Protože odstraněním nadložních vrstev do výsypky bylo přesunuto obrovské množství materiálu a vytěžením uhlí další obrovské množství materiálu zmizelo v uhlí spalujících zařízeních, není obnova krajiny typograficky ani z hlediska životního prostředí do původního stavu možná. Proto byla historicky tvořena, je tvořena, a i v budoucnu bude tvořena rekultivačními pracemi krajina nová<sup>11</sup>.

#### 4.3.1 Typy rekultivace

Podle knihy *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*<sup>12</sup>, kterou používám jako hlavní teoretický zdroj na téma rekultivací dělí možnosti rekultivací území na tyto typy:

Rekultivace zemědělská – nejen pole či ovocné sady, ale i louky, pastviny a další se zemědělskou produkcí související typy ploch

Rekultivace lesnická

Rekultivace vodohospodářská – tvorba různých druhů vodních nádrží nebo i tekoucích vod

Rekultivace rekreační – například parky, hřiště, ...

Rekultivace stavební

Rekultivace přirozená – tj. výsypka se nechá bez dalších zásahů člověka

Jiné využití – využití výsypkových materiálů jako suroviny, využití jako skládka, volné skladiště, ...

Rekultivace jako taková samozřejmě probíhá v závislosti na socio-ekonomických podmínkách a požadavcích. Je třeba vyvažovat potřeby na ekonomické využití krajiny, potřeby místního obyvatelstva i požadavky ekologických organizací. Přípravy k rekultivaci krajiny poškozené povrchově těžební činností často probíhají již během těžby. Kupříkladu navážení výsypky je organizováno tak, aby byl již při její tvorbě dosažen pro budoucí rekultivaci vhodných terénních profilů. Při odstraňování zeminy, pod kterou je uhelná sloj také bývá samostatně odstraněna a uskladněna úrodná svrchní vrstva půdy, kterou je možné později použít při zemědělské rekultivaci jako základ nové úrodné půdy.<sup>13</sup>

Stejně tak je uskladněna i úrodná vrstva půdy v místech, která mají být zasypána při tvorbě výsypky<sup>14</sup>.

Zemědělská rekultivace je spolu s rekultivací lesnickou nejčastějším druhem rekultivace mimo blízká okolí měst<sup>15</sup>. Jak při rekultivaci zemědělské, tak i rekultivaci lesnické je obvykle k vytvoření prostředí vhodného pro pěstování potřeba provést dočasné pěstování melioračních rostlin (respektive stromů), které nejsou ani tak hospodářsky využitelné, nýbrž zušlechťují půdu do cílového stavu. Tento krok je jedním ze závěrečných kroků zúrodnování půdy (meliorace), což je dlouhodobý proces zahrnující,

<sup>11</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strana 22

<sup>12</sup> Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981.

<sup>13</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strany 24, 26,30

<sup>14</sup> Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981. strana 579

<sup>15</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strana 32,34

kromě již zmíněného pěstování vhodných porostů a navážení uschované úrodné zeminy, terénní úpravy (pokud nebyly dostatečně provedeny již při navážení zeminy na výsypky), také úpravy vodního režimu (odvodňování/zavodňování), úpravy kyselosti půdy, a obecně úprava chemicko-fyzikálních vlastností (např. obsah minerálů, zrnitost, schopnost absorbovat vodu a další) půdy dosahovaná přidáváním a zaoráváním přídatných příměsí do zeminy.<sup>16</sup>

Rekreační způsob rekultivace je zaměřen na volnočasové vyžití obyvatelstva. Zahrnuje způsoby rekultivace, které nejsou spojeny s výraznou stavební činností, ale ty způsoby, které tvoří přírodní prostředí vhodné k rekreaci člověka. Z této definice tak lze do rekreační rekultivace zahrnout do jisté míry i některé ostatní zmíněné způsoby rekultivace<sup>17</sup>. Kupříkladu hydrická rekultivace do jezera může sloužit ke koupání. Výsledky lesnické rekultivace mohou sloužit k procházkám a turistice. Rekultivace, které lze označit za opravdu rekreační, jsou rekultivace jejichž výsledkem jsou různé, a nyní cituji: „*parky, hřiště, sportoviště, arborety, zahrádkářské kolonie apod*“<sup>18</sup>. I u těchto, citovaných podtypů rekultivace, je možné si všimnout, že alespoň některé z nich (parky, arborety, zahrádkářské kolonie) opět stojí na již v předchozích odstavcích rozebíraných rekultivacích zemědělských a lesnických.

#### 4.3.2 Provedené rekultivace v severních Čechách

Tak jako v celé části zaměřené na rekultivační práce, i zde se zaměřím na provedené rekultivace prostoru po hnědouhelné povrchové těžební činnosti, a to se zvláštním zaměřením na Severočeskou uhelnou pánev.

Náprava následků po těžbě uhlí v severních Čechách je stará více než 150 let. V roce 1852 (nebo 1854) Rakouská monarchie ve svém horním zákoně požadovala návrat pozemků porušených těžbou jejich původnímu účelu a stanovovala úhradu případných odškodnění. Myšlenka rekultivace jako taková je tedy již poměrně stará. Do podoby, jakou mají rekultivační předpisy a zákony dnešní podobu se ale přirozeně dostávaly až s masivním rozvojem povrchové těžby ve 20. století<sup>19,20</sup>.

---

<sup>16</sup> Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981. strany 380 – 411, 416 – 421, 447

<sup>17</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strana 34

<sup>18</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strana 35

<sup>19</sup> Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981. strany 54

<sup>20</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strana 16-18



	ha	%
celkem	2 930,98	100
z toho: zemědělská rekultivace	1 844,24	62,9
lesnická rekultivace	943,29	32,2
vodní plochy	14,40	0,5
ostatní	129,05	4,4
Se stavem k 1. 1. 1981 byly v rekultivační rozpracovanosti koncernu SHD tyto výměry:		
	ha	%
celkem	4 139,47	100
z toho: zemědělská rekultivace	1 526,88	37,0
lesnická rekultivace	2 335,81	56,0
vodní plochy	98,92	3,0
ostatní	177,86	4,0

Tabulka 1: Nahoře: výměra dokončených rekultivací do konce roku 1980. Uprostřed: Výměra rozpracovaných rekultivací na začátku roku 1981<sup>21</sup>.

Jak můžeme vidět v tabulce (1), podle údaje z roku 1981 bylo do roku 1980 v oblasti Severočeské uhelné pánve zrekultivováno 29,3 km<sup>2</sup> plochy. Z toho takřka dvě třetiny byly zrekultivovány zemědělským způsobem, necelá třetina lesnický, 14,4 ha plochy bylo přeměněno v jezera. V rozpracovaných rekultivacích (41 km<sup>2</sup>) se počítalo s vyšším zastoupením lesních ploch (více jak polovičním) a výrazně vyšším zastoupením vodní plochy (šestinásobný nárůst). To vše přirozeně na úkor plochy zemědělské, se kterou se v rozpracovaných projektech nepočítalo ani se 40 %.

Již modernější shrnutí rekultivačních prací jsem našel v materiálu vydaném Mosteckou uhelnou společností, a. s. (dále též MUS)<sup>22</sup> z roku 1997 pojednává již konkrétněji o proběhlých a té době probíhajících rekultivacích v souvislosti s těžbou v lomech patřících v roce 1997 MUS. Jedná se o lomy: Jan Šverma, ČSA, Hrabák, Ležáky, Centrum, Kohinoor, bývalý lom Vrbenský. Dále s lomy související výsypky a hlubinný důl Jan Žižka.

Lom Jan Šverma a lom Hrabák byly, jak je psáno na začátku kapitoly 6. později propojeny do dnešního lomu Vršany, proto již v roce 1997, kdy bylo spojení teprve plánováno se rekultivace mezi těmito dvěma lomy prováděly dohromady v jednom celku. Na Velebudické výsypce lomu Jan Šverma bylo postaveno dostihové závodiště Hipodrom Most se zázemím, které zabírá značnou část plochy 785 ha veliké výsypky. V prostoru výsypky se též nachází golfové hřiště a přibližně polovina území byla zrekultivována na lesnické pozemky se zemědělským středem oblasti. Výsypka lomu Hrabák: Malé Březno o rozloze přibližně 200 ha (měřeno nástrojem „Měření vzdálenosti a plochy“ na stránkách [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz) je rekultivována lesnickým a zemědělským způsobem)<sup>23,24</sup>.

<sup>21</sup> Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981. strana 605

<sup>22</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strany 38–59

<sup>23</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strany 40, 44

<sup>24</sup> Větvička V. a Štýs S., *Most v zeleném*. Most: Nakladatelství Hněvín, 2008



Obrázek 2: Výsypka Malé Březno<sup>25</sup>

V oblasti výsypky lomu Slatinice VII vzniklo dětské dopravní hřiště obklopené parkem. Na některých výsypkách (hlavně bývalých lomů Htabák a Slatinice) se v roce 2008 chystala či již probíhala výstavba rodinných domů.<sup>26</sup>

Čepirožská výsypka bývalého lomu Šmeral o rozloze 126,8 ha byla rekultivována na kombinaci lesa, jedné zahrádkářské kolonie a vinohradu. Z bývalého lomu Vrbenský se stala vodní nádrž, která slouží k letní i zimní (když je led) rekreaci, čemuž je přizpůsobeno i okolí nádrže. V oblasti výsypky tohoto lomu se kromě 135 ha lesa a 70 ha sadů nachází též autodrom.<sup>27</sup>

Lom Československé armády (též lom ČSA) je od lomu Vršany oddělen Ervěnickým koridorem, který sám je tvořen vnitřní výsypkou lomů a je zrekultivován. Kromě toho, že po něm vede silnice první třídy I/13 a železniční trať 130 z Ústí nad Labem do Chomutova, byla také přes něj přeložena řeka Bílina a zbylé území náspu mezi lomy bylo úspěšně zalesněno<sup>28</sup>.

ISBN 978-80-86654-22-5, strany 144, 145, 225

<sup>25</sup> Mapy.cz [online] seznam.cz [citováno 30. 3. 2022]

Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka?mereni-vzdalenosti&x=13.5516065&y=50.4623954&z=15&rm=9ec54x-CBBgY1il2gb1gxZfi0-Ofj0ZhemOgbTe91gcAfd14vfc1ew6fb03-eY0fTNgT0f3v5L0eyogc0LE>

<sup>26</sup> Větvička V. a Štýs S., *Most v zeleném*. Most: Nakladatelství Hněvín, 2008

ISBN 978-80-86654-22-5, strany 225, 244

<sup>27</sup> Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997, strany 40, 44

<sup>28</sup> *Ervěnický koridor je stále unikátem* [online]. pHmedia Czech Republic, s.r.o [citováno 4. 3. 2022]

Dostupné z: <https://iuhli.cz/ervenicky-koridor-je-stale-unikatem/>



Obrázek 3: Umístění Ervěnického koridoru na mapě mezi lomy ČSA a Vršany

Rekultivace některých území došla dokonce tak daleko a je natolik úspěšná, že se z nich stala území chráněná. Příkladem budíž Kopistská výsypka, která se po ukončení návozu skrývky z lomu Obránců míru stala zhruba velké většiny lesem a ve zbytku oblasti jsou travnaté porosty či malé vodní plochy. Obnova přírody zde proběhla natolik úspěšně, že se z Kopistské výsypky stala Evropsky významná lokalita<sup>29, 30</sup>.

#### 4.3.3 Využití lomových jezer

Ve zbytkových jamách lomů v severních Čechách vznikly, vznikají a ve stále ještě funkčních lomech vznikají budou jezera, jejichž plochy jsou, protože odpovídají velikostně vytěženému prostoru, značné a, pro která se tedy hledají a nachází různá další využití nad rámec pouhé existence vodní plochy.

V severních Čechách se z rekultivačních jezer po povrchové důlní činnosti kromě jezera Milada nachází také jezera Most (dříve lom Ležáky), Barbora (lom Barbora), Matylda (lom Vrbenský). V oblasti Sokolovské uhelné pánve se nachází jezera Medard (lom Medard-Libík) a jezero Michal (lom Michal). Další jezera budou vznikat i v budoucnu spolu s pokračujícím utlumováním těžby. V následujícím desetiletí to ze severočeských lomů bude lom ČSA, který se po napuštění stane jezerem Centrum<sup>31</sup>.

<sup>29</sup> 44 - Kopistská výsypka [online] Ústecký kraj [citováno 30. 3. 2022]

Dostupné z: <http://www.usteckykraj-priroda.cz/44>

<sup>30</sup> Seznam lokalit soustavy Natura 2000 [online] Agentura ochrany přírody a krajiny ČR [citováno 30. 3. 2022], kód lokality: CZ0423216

Dostupné z: <https://natura2000.cz/Lokalita/Lokalita>

<sup>31</sup> Rekultivací po těžbě uhlí v ČR vznikla tři jezera, největší je Medard [online] oEnergetice.cz [citováno 8. 3. 2022]

Dostupné z: <https://oenergetice.cz/uhli/rekultivaci-po-tezbe-uhli-v-cr-vznikla-tri-jezera-nejvetsi-je-medard>

Základním využitím těchto jezer je rekreace obyvatelstva<sup>32,33,34,35</sup>. Jezero Michal je dokonce placeným koupalištěm<sup>36</sup>. Najdou se ovšem i jiná využití jezer. Například pro jezero Medard byla schválena koncepce výstavby nového města na břehu jezera, včetně budov zapuštěných do jezerního dna. Do projektu města je integrována i myšlenka elektrické soběstačnosti v podobě elektráren na obnovitelné zdroje, a to i včetně elektrárny vodní přečerpávací<sup>37</sup>.

V případě lomu ČSA, z něž se stane jezero Centrum se kromě využití pro vodní radovánky počítá například též se solárním parkem na hladině jezera. Dále bude na hladině postaven skleník, který bude kombinovat pěstování zeleniny s produkcí ryb. Uvažuje se rovněž opět o možnosti postavit přečerpávací vodní elektrárnu<sup>38</sup>.

Uvažuje se také o propojení rekultivačních jezer, což by udělalo z některých jezer, ve kterých se udržuje hladina připouštěním vody z jiných vodních zdrojů, jezera průtočná. Umožnilo by to také mezi jezery postavit vodní elektrárny. Spolu s uvažovanou možností postavit na hladině jezer solární farmy (a to nejen na hladině jezera Centrum, ale i na dalších jezerech) by mohl být souhrnný instalovaný výkon ve výši 1 až 2 GW<sup>39</sup>.

---

<sup>32</sup> Jezero Barbora v Oldřichově u Teplic [online] CzechTourism [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné z: <https://www.kudyznudy.cz/aktivity/jezero-barbora-v-oldrichove-u-teplic>

<sup>33</sup> Jezero Most [online] Statutární město Most [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné: <https://www.imostecko.cz/jezero-most/>

<sup>34</sup> Sportovně-rekreační areál Matylda [online] Statutární město Most [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné z: <https://www.imostecko.cz/matylda/>

<sup>35</sup> Bydlení na vodě a výhledy na hory. Jezero Medard má na Sokolovsko vrátit život [online]

MediaRey, SE [citováno 10. 3. 2022] Dostupné z:

<https://forbes.cz/bydleni-na-vode-a-vyhledy-na-hory-jezero-medard-ma-na-sokolovsko-vratit-zivot/>

<sup>36</sup> Pro vás [online] Koupaliště Michal s.r.o. [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné z: <https://www.michal-sokolov.cz/pro-vas>

<sup>37</sup> Bydlení na vodě a výhledy na hory. Jezero Medard má na Sokolovsko vrátit život [online]

MediaRey, SE [citováno 10. 3. 2022] Dostupné z:

<https://forbes.cz/bydleni-na-vode-a-vyhledy-na-hory-jezero-medard-ma-na-sokolovsko-vratit-zivot/>

<sup>38</sup> Lom ČSA se dočká zatopení. Vznikne zde jezero, skleníky i solární park [online]

CZECH NEWS CENTER a. s. [citováno 11. 3. 2022] Dostupné z:

<https://www.e15.cz/domaci/lom-csa-se-docka-zatopeni-vznikne-zde-jezero-skleniky-i-solarni-park-1381630>

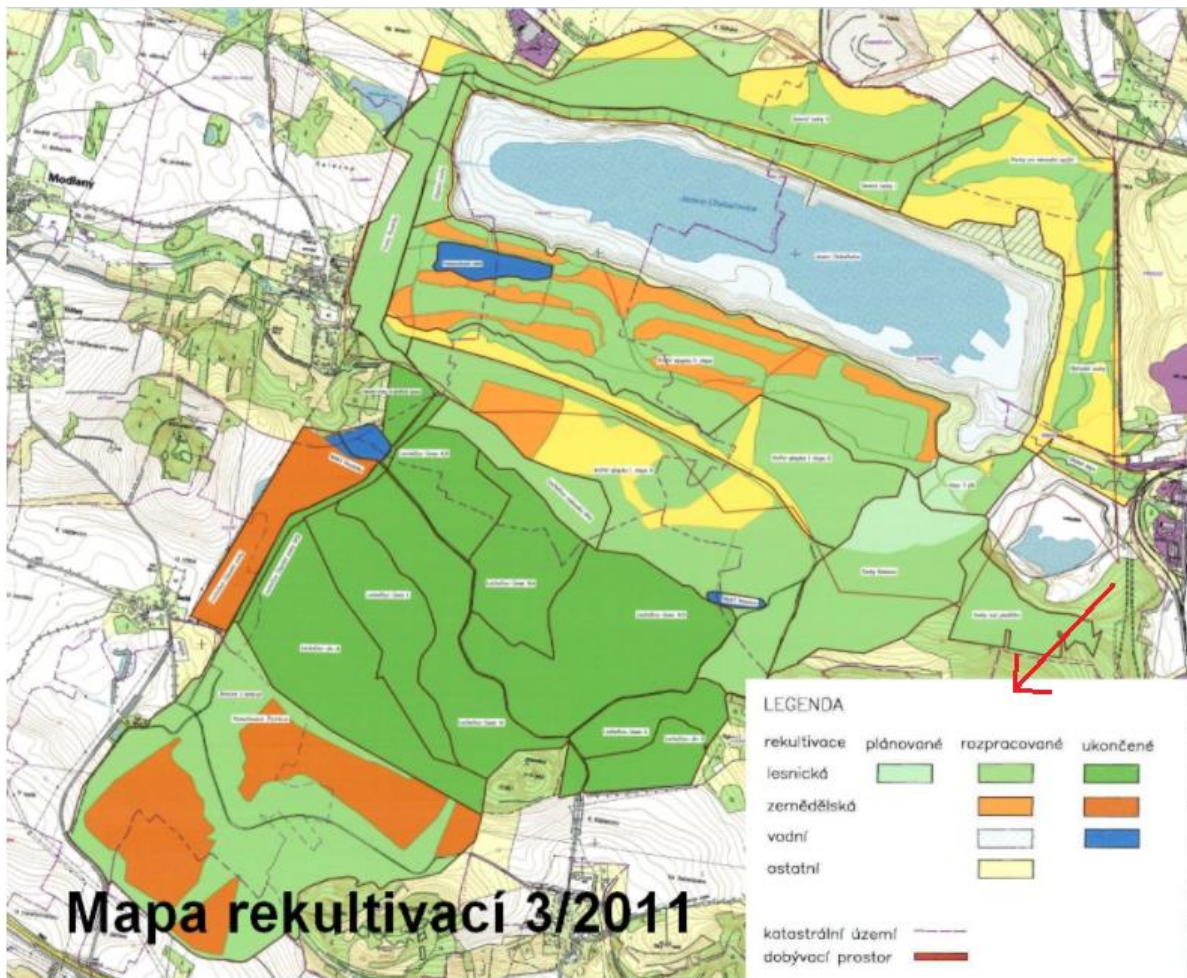
<sup>39</sup> MPO chce propojit jezera vzniklá rekultivací hnědouhelných dolů a lomů [online]

MPO [citováno 11. 3. 2022] Dostupné z:

<https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/mpo-chce-propojit-jezera-vznikla-rekultivaci-hnedouhelnych-dolu-a-lomu--248294/>

#### 4.3.4 Rekultivace lomu Chabařovice

Lom Chabařovice jsem se rozhodl vzhledem k jeho důležitosti v této práci sepsat do samostatné podkapitoly.



Obrázek 4: Rekultivační oblast jezera Milada s barevným rozlišením dle typu rekultivace a stavu dokončení k březnu 2011. Červenou šipkou jsem přioznačil oblast (bohužel částečně zakrytou legendou) potenciálního umístění horní nádrže PVE.<sup>40</sup>

Rekultivační prostor má rozlohu 1457 ha bez jezera Milada, které tvoří 252 ha plochy<sup>41</sup>. Jak můžeme vidět z mapky na obrázku 1 valná většina rekultivačního prostoru byla rekultivována lesnickým způsobem. V menším množství se na území vyskytuje rekultivace zemědělského typu a také několik menších vodních ploch.

Zemědělská plocha zde nepředatuje prostor, kde se pěstuje obilí, ovocné stromy, víno nebo chmel, ale prostor, který je intenzivně zatravněn vysokými travami určenými pro intenzivní hospodaření. Ostatní rekultivace (žlutá barva na mapce) zahrnuje užitkové komunikace, rekreační plochy kolem

<sup>40</sup> Středisko Chabařovice [online]. DIAMO, státní podnik, odštěpný závod PKÚ [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné z: <https://www.pku.cz/cs/stredisko-chabarovice-55/>

<sup>41</sup> Komplexní revitalizace území v rámci zahlazování následků hornické činnosti[online] Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 5. 3. 2022]

Dostupné: <http://www.jezeroMilada.cz/stezky/naucne-stezky?showall=&start=4>

Milady (např. parkoviště, pláže) a veřejnou zeleň bez zemědělských ambicí. Tato zeleň ostatně roste na půdě, která nebyla ve své plodnosti podpořena překrytím dříve uskladněnou úrodnou půdou<sup>42</sup>.

Jezero Milada bylo spolu se zbytek zrehabilitovaného území zpřístupněno k užívání veřejností na jaře roku 2015. Kolem jezera se nachází 7 písčiny a kamenitých pláží jejichž uživatelé mají v letních měsících k dispozici různé stánky, ať už s občerstvením, nebo různým sportovním vybavením. Kromě samotného jezera je možné k aktivnější rekreaci možno využít též cyklostezek i pěších turistických tras, které vedou obnoveným územím. V roce 2020 byla vyhlášena soutěž na koncepci rozvoje území kolem jezera Milada, s jejímž vítězem již byla v lednu roku 2022 podepsána smlouva<sup>43</sup>.

Vítězem je ateliér Mandaworks AB s návrhem<sup>44</sup>, který má dále zatraktivnit jezero Milada jak z hlediska aktivního rekreačního využití, tak z hlediska využití přírodních krás oblasti. Mimo jiné bude postaveno několik mol na jezeře pro malá rekreační plavidla, zaveden přívoz, zlepšena dostupnost veřejnou dopravou i na kole a další. Pro užívání si přírodních krás bude vystavěna rozhledna, udělán přístup na vyhlídky, pikniková místa a další.<sup>45</sup>

Jak je možné vidět, počítá se do budoucna s výrazně rekreačním využitím nádrže, s čímž bude nutné počítat při návrhu přečerpávací vodní elektrárny. Určitě například nebude možné (minimálně přes letní sezónu) operovat s nějakými významnějšími změnami hladiny Milady.

---

<sup>42</sup> Komplexní revitalizace území v rámci zahlazování následků hornické činnosti[online] Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 5. 3. 2022]

Dostupné: <http://www.jezeromilada.cz/stezky/naucne-stezky?showall=&start=4>

<sup>43</sup> Jezero Milada [online] Statutární město Ústí nad Labem [citováno 7. 3. 2022]

Dostupné z:

<https://www.usti-nad-labem.cz/cz/volny-cas/turistum/turisticke-cile/prirodni-zajimavosti/jezero-milada.html>

<sup>44</sup> Jezero Milada: Živá krajina [online] DIAMO, státní podnik, odštěpný závod PKÚ [citováno 7. 3. 2022]

Dostupné z: <https://vizemilada.cz/uploads/files/price-1.pdf>

<sup>45</sup> Jezero Milada: Živá krajina [online] DIAMO, státní podnik, odštěpný závod PKÚ [citováno 7. 3. 2022]

Dostupné z: <https://vizemilada.cz/uploads/files/price-1.pdf>, strany 30, 33, 36

## 5 Přečerpávací elektrárna

Přečerpávací elektrárna je energetický zdroj umístěný na soustavě dvou vodních nádrží se spádem mezi nimi. Nádrže jsou propojeny potrubím, na jehož spodním konci je umístěna turbína/čerpadlo. Toto uspořádání umožňuje čerpáním vody z nádrže dolní do nádrže horní ukládat energii, kterou je možno puštěním vody z horní nádrže do dolní opět využít.

Při výrobě elektřiny voda z horní nádrže proudí potrubím, ve kterém se mění potenciální energie vody v horní nádrži na energii kinetickou a tlakovou, která se na turbíně přemění v energii mechanickou, která se v mechanicky napojeném elektrickém stroji mění na energii elektrickou. Při tomto procesu se přirozeně s přesunem vodní masy mění výška hladiny v obou nádržích. V horní klesá, v dolní stoupá. Naopak při vytváření zásoby akumulované energie je očekávatelně postup opačný, za přesunu vody zezdola nahoru ne elektrická energie mění na energii potenciální.

### 5.1 Příklady PVE

V České republice se nachází několik PVE. Jsou jimi například PVE Dlouhé Stráně, PVE Dalešice, PVE Štěchovice, PVE Černé jezero.

### 5.2 Výkon PVE

$$P = \eta * \rho * g * Q * H^{46} [W] \quad (R1)$$

Kde:	$\eta$	účinnost [-]
	$\rho$	hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
	$g$	gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]
	$Q$	průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
	$H$	převýšení [m]

Jak můžeme vidět, jelikož rozdíly v gravitačním zrychlení na Zemi jsou méně než zanedbatelné a jelikož se pro provoz PVE používá pouze voda lze  $g$  a  $\rho$  pokládat za konstanty. Teoretický výkon turbíny tedy elektrárny závisí na průtoku vody turbínou a výškovým rozdílem mezi hladinami před a za turbínou.

Ztráty, které se ve vzorci podepíší na účinnosti mohou vznikat a vznikají převážně v přívodním potrubí a turbíně.

### 5.3 Akumulační kapacita PVE

Schopnost PVE akumulovat elektrickou energii vyjádřím jako velikost potenciální energie vody, kterou je možno pustit přes turbínu z horní nádrže do dolní. Obecný vzorec pro potenciální energii je:

$$E_{pot} = g * m * H = g * \rho * V * H [J] \quad (R2)$$

Kde:	$g$	gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]
	$m$	hmotnost [kg]
	$H$	rozdíl hladin [m]
	$\rho$	hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
	$V$	objem [ $\text{m}^3$ ]

A ano, překvapivě je to výkon PVE vynásobený maximální možnou dobou jeho poskytování. Problémem je, že během přepouštění vody se hladina vody v horní nádrži snižuje a v dolní nádrži

---

<sup>46</sup> Quasching V. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada Publishing, 2010.

ISBN 978-80-247-3250-3. strana 202

naopak zvyšuje. Tím se rozdíl hladin  $H$ , během práce turbíny mění a vyvstává potřeba upravit vzorec do integrálního tvaru. Rozdíl hladin v každém okamžiku je závislý na množství vody načerpané do horní nádrže. Proto vzorec pro velikost akumulované energie vypadá následovně:

$$E = \int_{V_{min}}^{V_{max}} g * \rho * H(V) * dV [J] \quad (R3)$$

Kde:  $H(V)$  Rozdíl hladin je závislý na aktuálním objemu vody načerpaném do horní nádrže [m]

Tím je vyřešena problematika měnícího se rozdílu hladin. Protože horní nádrž nemusí mít tvar úplně snadno uchopitelný základními geometrickými vzorci, ze kterých by se dal určit načerpaný objem vody při určité hladině, vypořádám se i s objemem vody v horní nádrži integrálním způsobem.

$$V = \int_{T_{min}}^{T_{max}} A(T) * dT [m^3] \quad (R4)$$

Kde:  $A(T)$  Plocha vodní hladiny nachází-li se v „hloubce“ pod korunou hráze [m<sup>2</sup>]  
 $T$  hloubka hladiny pod korunou hráze. Nebo též rozdíl výškové úrovně mezi korunou hráze a hladinou horní nádrže [m]

V obou integrálních rovnicích se vyskytuje veličina, která je funkční závislostí veličiny integrované. Parametry těchto funkcí bude podle tvaru nádrží možné zjistit buďto ze známých geometrických závislostí. Nebo pokud nebude toto možné, určím velikost závislé veličiny v několika případech a parametry funkce následně půjde určit pomocí funkcí grafu v Excelu.

#### 5.4 Hráze nádrží

Dolní nádrž je jezero Milada, které je již postavené, a tedy není potřeba se jí zabývat. Horní nádrž naopak je teprve třeba postavit. To znamená stavbu hráze na vrcholu vrchu Rovný. Hrází, kterých se pro stavbu vodních nádrží používá existuje více druhů.

Lze je dělit podle použitého materiálu na betonové a sypané (z hlíny, kamení, jakéhokoli použitelného materiálu). Druhé dělení je z hlediska ukotvení do terénu, a to na hráze tížné, které pouze svou vlastní tíhou drží pevně a přenášejí síly do podloží. Dále hráze pilířové, které k udržení sil na hráz používají pilíře. A na hráze klenbové, které síly přenášejí do skal, mezi které jsou vetknuty a tvoří proti vodě klenbu<sup>47</sup>.

Lze říct, že pro sypané nádrže je použitelná pouze varianta hráze tížné, protože pilíře, ani funkční klenbu není možné pomocí sypaných materiálů utvořit.

Vzhledem k tomu, že horní nádrž bude na vrcholu kopce, se poblíž nevyskytují žádné skály, mezi které by bylo možné umístit klenbu a varianta klenbové hráze je tedy nepoužitelná. Rozhodování tak ve výsledku bude pouze mezi hrází tížnou sypanou a betonovou tížnou, respektive pilířovou.

Funkcí hráze je udržet vodní masu uvnitř nádrže. Hráz tedy musí být neprostupná pro vodu. U betonových hrází tuto funkci plní sám beton.

Hráze sypané musí v sobě mít zabudovanou izolační vrstvu. Ta může být vytvořena položením vrstvy asfaltu, betonu, či plastových fólií na návodní straně hráze, nebo vložením jílového sloupce do středu

<sup>47</sup> Nádrže a přehrady [online]. FSV ČVUT [citováno 31. 12. 2021]

Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Nadrze\\_prehrady.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Nadrze_prehrady.pdf), strany 16,17



hráze. Těsnění musí přirozeně být napojeno na nepropustné podloží. Pokud není nepropustné podloží k dispozici v rozumné hloubce, může být nutné odizolovat i dno nádrže<sup>48</sup>.

Pro návrh zasazení hráze do terénu jsou naprosto zásadní její rozměry. Betonové tížné hráze by měly mít korunu hráze minimálně 3 metry širokou. Hráz je obvykle minimálně o 2 metry vyšší, než je nejvyšší hladina vody v nádrži, aby nedocházelo k přetékání vody z nádrže přes hráz. Sklon stěny hráze se liší pro návodní a nevzdušnou stranu. Návodní stěna bývá kolmá, nebo takřka kolmá se sklonem vůči svislé rovině v nižších jednotkách procent. Vzdušná strana mívá větší sklon výši svislici pro zadržení sil, které působí voda uvnitř nádrže. Šířka vzdušné strany hráze bývá přibližně 70 až 80 procent výšky<sup>49</sup>.

Sypané hráze mívají odlišné parametry, které se liší podle toho, jestli je vytvořena zeminou nebo kamením. Obecně platí v předchozím odstavci zmíněná pravidla týkající se výšky hráze a šířky její koruny. Od betonové hráze se u sypaných liší parametry sklonu hráze. V případě zemité hráze je poměr výšky hráze k šířce návodní skloněné části hráze se pohybuje od 1:2,5 do 1:3. Na vzdušné straně hráze je tento poměr od 1:2 do 1:2,5. Použití kamene umožňuje větší sklon stěn a tím menší šířku hráze. Na návodní straně se poměr výšky k šířce pohybuje od 1:0,7 do 1:1,4 a na vzdušné straně od 1:1,3 do 1:1,6<sup>50</sup>.



Obrázek 5: Hráz nádrže Lipno I. Jsou zde vidět oba výše zmiňované typy hrází.<sup>51</sup>

Na tomto obrázku jsou vedle sebe krásně vidět hráz sypaná (levá část hráze) a hráz betonová (pravá část hráze) v oblasti výtoku z Lipna do starého koryta Vltavy. Je možné si povšimnout, že betonová část hráze je mnohem užší než část sypaná.

<sup>48</sup> *Nádrže a přehrady* [online]. FSV ČVUT [citováno 31. 12. 2021]

Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Nadrze\\_prehrady.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Nadrze_prehrady.pdf), strana 21

<sup>49</sup> *Vodohospodářská zařízení III* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [citováno 1. 1. 2022]

Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VH33/prehrady.html>, kapitoly Tížné přehrady, Betonové přehrady

<sup>50</sup> *Vodohospodářská zařízení III* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [citováno 1. 1. 2022]

Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VH33/prehrady.html>, kapitola Přehrady z místních materiálů

<sup>51</sup> *VODNÍ ELEKTRÁRNA LIPNO* [online] ČEZ, a. s. [citováno 13. 5. 2022]

Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/lipno-58166>

## 5.5 Turbína

Pro přečerpávací vodní elektrárny je typické použití Francisových turbín. Jejich významnou vlastností totiž je možnost fungovat i jako čerpadlo. Alternativou je použití dvou samostatných vodních strojů: turbíny a čerpadla. Výhodou tohoto uspořádání je vyšší účinnost, protože každý z obou strojů i související potrubí je více uzpůsobeno pro svou činnost. Nevýhodou je nutnost pořídit a udržovat dva stoje o stejném výkonu jako by měla jedna reverzační turbína. V této práci se budu držet zavedeného modelu s reverzačními turbínami.

Výkon Francisovy turbíny lze regulovat pomocí rozváděcích lopatek, které je možné natáčet a tím regulovat množství vody vstupující do turbíny, a to až do úplného zastavení. Lopatky oběžného kola jsou u Francisovy turbíny pevné, a tedy nelze pomocí nich regulovat.

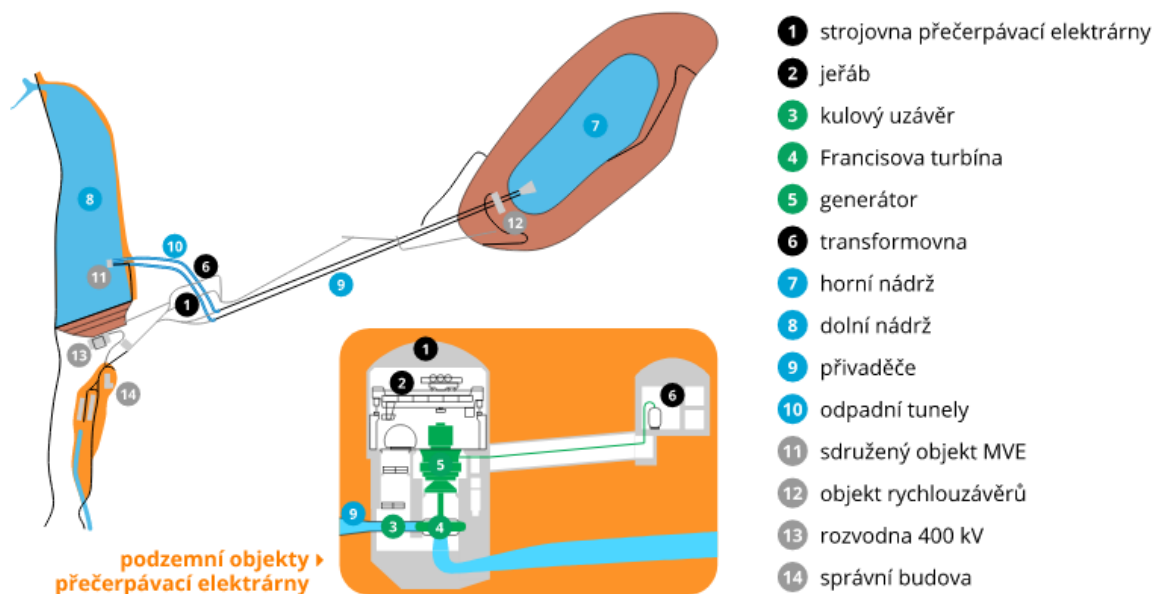
## 5.6 Přiváděče

Přiváděč je potrubí, které spojuje vodní nádrž s turbínou. Přiváděč před turbínou je při provozu plně zaplněn vodou, aby se do turbíny nedostal žádný vzduch. Potrubí za turbínou již může být vzduchu přístupné. V případě PVE, kde turbína funguje i v opačném směru jako čerpadlo, jsou před turbínou vlastně všechny části přívodních potrubí, a proto je při provozu kompletně zaplněná vodou celá cesta vody od horní nádrže k dolní a naopak.

S přiváděči jsou obvykle spojeny (kromě v samostatné kapitole rozebrané turbíny) i další díly dávající dohromady cestu vody mezi horní a dolní nádrží. Poblíž turbíny se nachází kulový uzávěr regulující množství vody přiváděné na turbínu. Na horním konci přiváděče je umístěn rychlouzávěr, který se spouští gravitací a umožňuje v případě potřeby nouzové přerušení práce turbíny.

Při prudkých změnách v proudění vody potrubím jako je například nouzové uzavření přiváděče vznikají ve vodě značné dynamické tlaky. Aby nedošlo k poškození zařízení elektrárny, jsou na přiváděčích umístěny vyrovnávací komory. Vyrovnávací komora je objekt věžovitého typu s volnou hladinou, jejíž výška odpovídá tlaku vody v daném místě přiváděče. Při vzniku dynamických rázů dochází skrze změnu hladiny ve vyrovnávací komoře k disipaci energie a omezení dynamickým tlakových účinků změny proudění.

Umístění vtoku do přiváděče je vzdálené na jednu stranu ode dna nádrže, aby nebylo nasáváno bahno nebo různé naplaveniny a na druhou stranu zároveň je vtok výškově vzdálen od hladiny nádrže, aby nedocházelo k nasávání vzduchu. Ve vtoku zároveň jsou umístěna česla, která zamezují vniku větších objektů do prostorů přiváděčů a hlavně turbíny. Protože v přečerpávací elektrárně proudí voda oběma směry, musí být podmínky umístění vtoku splněno na vstupu z obou nádrží. Stejně tak musí být na obou koncích i česla.



Obrázek 6: Schéma přečerpávací elektrárny Dlouhé Stáně s vyznačením objektů.<sup>52</sup>

Propojení přivaděčů z horní nádrže s Francisovou turbínou je provedeno tzv. spirálou. To je zužující se část potrubí obmotaná kolem turbíny, která zajišťuje stejné tlakové a rychlostní parametry vody vstupující do rozváděcích lopatek Francisovy turbíny.

## 5.7 Generátor

Ve vodních elektrárnách (s výjimkou malých), se používají synchronní generátory. Kvůli otáčkám, které vodní turbíny, včetně Francisovy, vyvíjejí, se obvykle používají synchronní stroje s vyniklými póly s vysokým počtem pólů, které i při nízkých otáčkách produkují elektřinu s frekvencí 50 Hz.

Synchronní stroje používané ve velkých elektrárnách mají výstup na napěťové úrovni obvykle v rozmezí od vyšších jednotek kV do nižších desítek kV (generátory s nejvyšším napětím v ČR se nacházejí v JE Temelín a mají výstupní napětí 24 kV<sup>53</sup>).

<sup>52</sup> JAK JSOU VELKÉ [online] skupina ČEZ [citováno 13. 5. 2022]

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/vodni-energie-pro-deti/precerpavaci-vodni-elektrarny/jak-jsou-velke>

<sup>53</sup> JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN [online] skupina ČEZ [citováno 13. 5. 2022]

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>

## 6 Účinnost

Účinnost v případě této práce vyjadřuje ztráty energie při výrobě elektrické energie nebo lépe poměr elektrického výkonu elektrárny k výkonu teoretickému. Ztráty mohou vznikat na vícero místech procesu výroby elektrické energie, a proto nejprve definuji celkovou účinnost:

$$\eta_c = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad [-] \quad (R5)$$

Kde:  $\eta_c$  účinnost výroby elektrické energie přečerpávací vodní elektrárnou [-]  
 $\eta_i$  účinnost jednotlivých částí procesu výroby elektrické energie [-]

Mezi významné ztráty patří:

- Ztráty v přivaděčích vody k turbíně
- Ztráty v turbíně
- Ztráty v generátoru
- Ztráty v elektrickém vedení a při transformaci

### 6.1 Ztráty v přivaděčích

Mezi horní nádrží a turbínou bude voda protékat uzavřeným potrubím kde dojde k ztrátám tlakové energie vody. Tlaková energie působící na vodní turbínu tak bude menší, než by odpovídalo určené potenciální energii.

Ztráty v potrubí lze rozdělit na ztráty vtokové, dané parametry vstupního otvoru potrubí v horní nádrži. Ztráty v ohybu potrubí, vzniklé při změně směru toku vody. Ztráty výtokové, dané parametry výstupního otvoru. A hlavně ztráty třením, které vznikají po celé délce potrubí a závisí mimo jiné na materiálu ze kterého je potrubí vytvořeno.

Tlakovou ztrátu třením lze podle těchto skript<sup>54</sup> vypočítat jako ztrátovou výšku takto:

$$h_z = \lambda * \frac{l}{R} * \frac{v^2}{8 * g} \quad [m] \quad (R6)$$

Kde:  $h_z$  ztrátová výška [m]  
 $\lambda$  součinitel tření [-]  
 $l$  délka potrubí [m]  
 $R$  hydraulický poloměr potrubí [m]  
 $v$  rychlost proudící tekutiny [ $m*s^{-1}$ ]  
 $g$  gravitační zrychlení [ $m*s^{-2}$ ]

Hydraulický poloměr potrubí odpovídá poměru průřezu potrubí a omočeného obvodu potrubí což například pro potrubí kruhového tvaru znamená:

$$R = \frac{\pi * \frac{D^2}{4}}{\pi * D} = \frac{D}{4} \quad [m] \quad (R7)$$

Příčemž „D“ [m] zde označuje průměr potrubí.

---

<sup>54</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 84, 88, 89

Ztrátu tlaku můžeme ze ztrátové výšky  $h_z$  určit následujícím způsobem:

$$p_z = h_z * \rho * g \text{ [Pa]} \quad (\text{R8})$$

K úspěšnému uzavření problematiky třecích ztrát tak již chybí pouze určit součinitel tření „ $\lambda$ “.

Velikost součinitele tření se liší pro proudění laminární a proudění turbulentní<sup>55</sup>. Kdy nastává jaký druh proudění je určováno pomocí Reynoldsova čísla, přičemž v uzavřených potrubích je limitní bod poblíž hodnoty  $Re = 2320$ . Je-li Reynoldsovo číslo nižší, je proudění laminární, je-li Reynoldsovo číslo vyšší, předpokládá se proudění turbulentní. Reynoldsovo číslo se pro kruhová potrubí určuje takto<sup>56</sup>:

$$Re = \frac{v * D}{\tau} \text{ [-]} \quad (\text{R9})$$

Kde:  $v$  rychlost proudění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $D$  průměr trubice [m]  
 $\tau$  kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Protože kinematická viskozita vody se v závislosti na teplotě v Českých podmínkách pohybuje svojí velikostí přibližně od  $1,787 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  při  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $0,801 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  při  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>57</sup> a velikost potrubí v PVE ani rychlost proudění vody provozu nebudou v součinu tak malé, aby dokázaly srazit velikost Reynoldsova čísla do laminárních hodnot (jak je možné ověřit ve výpočtové části této práce v kapitole 8.3), budu se dále zabývat pouze turbulentním prouděním.

Podle skript Hydraulika<sup>58</sup> v celém rozsahu turbulentního proudění platí rovnice:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7 * D} \right) \quad (\text{R10})$$

Kde:  $\lambda$  součinitel tření [-]  
 $Re$  Reynoldsovo číslo [-]  
 $\Delta$  drsnost potrubí [m]  
 $D$  průměr potrubí [m]

Z této rovnice vyjádřím  $\lambda$ .

$$\lambda = \left[ -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7 * D} \right) \right]^{-2} \text{ [-]} \quad (\text{R11})$$

Protože součinitel tření se vyskytuje na obou stranách rovnice, bude ve výpočtové části pro výpočet „ $\lambda$ “ použito iteračních numerických metod.

Pro výpočet účinnosti potrubí jakožto i pro výpočet v horní nádrži akumulované energie lze použít i samotnou ztrátovou výšku  $h_z$  pro kruhové potrubí následujícím způsobem.

<sup>55</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 89, 90

<sup>56</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 87

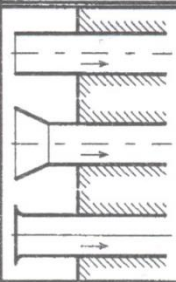
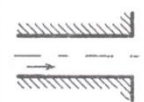
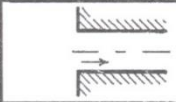

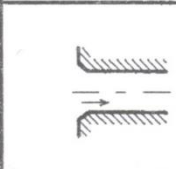
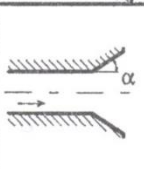
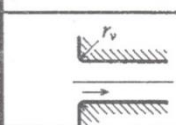
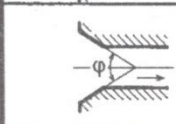
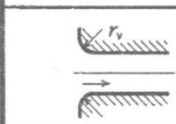
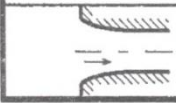
<sup>57</sup> *Viskozita vody* [online]. Jiří Bureš. [citováno 5. 12. 2021]  
Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>

<sup>58</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 90

$$h_z = \lambda * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2 * g} [m] \quad (R12)$$

Příčemž tuto výšku stačí pouze odečíst od velikosti rozdílu hladin „H“, a výsledkem bude spád, který reálně působí na turbínu.

Ztráty vtokem do potrubí a výtokem z potrubí jsou určeny tabulkově následovně:

typ vtoku	popis, platnost	$\xi_{vi}$	typ výtoku	popis,	$\xi_{ni}$
	potrubí zasahuje do nádrže	0,8 - 1,0		ostrohranný výtok	1,10
	ostrá vstupní hrana	0,5		$L > 2,2 D$	0,15
	seříznutá vstupní hrana $L / D \cong 0,1$	0,25		$\alpha = 20^\circ$ $\alpha = 40^\circ$ $\alpha = 60^\circ$	0,40 1,00 1,15
	zaoblená vstupní hrana $r_v / D \cong 0,06$	0,20			
	kónicky rozšířený vtok $\varphi \in \langle 40^\circ; 80^\circ \rangle$ $L \in \langle 0,2; 0,3 \rangle D$	0,13			
	kruhově zaoblený vtok $r_v = 0,2 D$ $L = 1,25 D$	0,11			
	vtok podle Lískovce (strofoida)	0,04			

Tabulka 2: Závislost vtokového a výtokového ztrátového činitele na tvaru vtoku/výtoku<sup>59</sup>.

Součinitel ztráty se jak pro vtok a výtok, tak i pro ohyb přepočítává na ztrátovou výšku podle následujícího vzorce<sup>60</sup>:

<sup>59</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 97

<sup>60</sup> Jandora J., Šulc J., *Hydraulika Modul 1*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
ISBN 978-80-7204-512-9. strana 98

$$h_z = \xi * \frac{v^2}{2 * g} [m] \quad (R13)$$

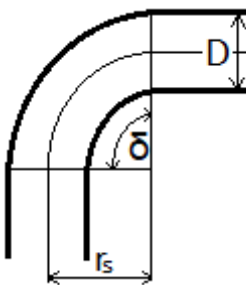
Kde:  $h_z$  ztrátová výška [m]  
 $\xi$  součinitel ztráty [-]  
 $v$  rychlost proudění [ $m*s^{-1}$ ]  
 $g$  gravitační zrychlení [ $m*s^{-2}$ ]

Ztráty v ohybu závisí jednak na úhlu, o který potrubí mění směr a jednak na provedení ohybu. Kleno může být provedeno obloukem, segmentově, nebo jedním ostrým zlomem<sup>61</sup>.

Protože ve výpočtové části bude použito kolene obloukového přikládám tabulku pro ztrátové činitele obloukových kolen.

$r_s/D$	0,8	1,0	1,5	2,0	4,0	6,0	10	20	50
$\xi_{ssh90} (\Delta/D < 0,001)$	0,37	0,21	0,17	0,15	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03
$\xi_{ssd90} (\Delta/D > 0,001)$	0,74	0,42	0,34	0,30	0,22	0,18	0,14	0,10	0,06

Tabulka 3: Ztrátové činitele v ohybu pro oblouková kolena se změnou směru o 90° v závislosti na geometrii kolene a drsnosti potrubí<sup>62</sup>.



Obrázek 7: Význam veličin v tabulce 3. Kresleno vlastní myší v programu Malování podle příslušného obrázku 7.10 v<sup>63</sup>.

Protože tabulka je pro úhel ohybu o 90° a potřebný ohyb nemusí nutně být 90° je potřeba přiložit i vzorec pro přepočítání ztrát pro jiné úhly. Ten zní<sup>64</sup>:

$$\xi_o = \xi_{90} * \frac{\delta}{90} [-] \quad (R14)$$

Kde:  $\xi_o$  ztrátový součinitel ohybu o  $\delta^\circ$  [-]  
 $\xi_{90}$  ztrátový součinitel ohybu o 90° [-]

<sup>61</sup> Jandora J., Šulc J., Hydraulika Modul 1, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
 IBSN 978-80-7204-512-9. strana 98

<sup>62</sup> Jandora J., Šulc J., Hydraulika Modul 1, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
 IBSN 978-80-7204-512-9. strana 98

<sup>63</sup> Jandora J., Šulc J., Hydraulika Modul 1, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
 IBSN 978-80-7204-512-9. strana 99

<sup>64</sup> Jandora J., Šulc J., Hydraulika Modul 1, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2007  
 IBSN 978-80-7204-512-9. strana 98

### 6.1.1 Rychlost vody v přivaděči

Při určování maximální rychlosti vody v přivaděči vody jsou dvě omezení. Prvním je rychlost vody v potrubí vycházející z Bernoulliho rovnice (pro směr proudění dolů) a druhým je hltnost turbíny (pro oba směry proudění).

Pro první případ vyjdu z Bernoulliho rovnice ve tvaru:

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + \frac{p_1}{\rho * g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{p_2}{\rho * g} + h_2 + h_z \quad (R15)$$

Kde: v rychlost proudění vody [m]  
g gravitační zrychlení [m\*s<sup>-2</sup>]  
p tlak vody [Pa]  
ρ hustota vody [kg\*m<sup>-3</sup>]  
h<sub>1,2</sub> výška výpočtového bodu [m]  
h<sub>z</sub> ztrátová výška [m]

Příčemž srovnávám hladinu horní nádrže (bod1) a výtok do dolní nádrže (bod2). Protože jak na horní, tak na dolní nádrž, mezi nimiž voda proudí, působí podobný atmosférický tlak, předpokládám rovnost tlaků p<sub>1</sub>=p<sub>2</sub>. Také předpokládám, na základě velmi velkého poměru plochy horní nádrže k průřezu potrubí (hektary vs maximálně jednotky metrů čtverečních), rychlost změny hladiny limitně se blíží nule. Tedy v<sub>1</sub>=0.

Při použití uvedených předpokladů z rovnice (R15) vypadnou některé členy a bude v tomto tvaru:

$$h_1 = \frac{v^2}{2 * g} + h_2 + h_z [m] \quad (R16)$$

Úpravami této rovnice lze získat vzorec pro rychlost proudění vody v potrubí bez turbíny:

$$v = \sqrt{2 * g * (h_1 - h_2 - h_z)} = \sqrt{2 * g * (H - h_z)} [m * s^{-1}] \quad (R17)$$

Kde H je rozdíl hladin horní a dolní nádrže, tedy H= h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub>.

Vzorec lze přepsat i jako

$$v = \varphi * \sqrt{2 * g * H} [m * s^{-1}] \quad (R18)$$

Příčemž „ $\sqrt{2 * g * H}$ “ vyjadřuje ideální rychlost bez působení ztrát a „ $\varphi$ “ vyjadřuje ztráty v potrubí.

$$\varphi = \sqrt{1 - \frac{h_z}{H}} [-] \quad (R19)$$

Zjištěná rychlost je rychlostí vody proudící z horní do dolní nádrže, pokud po cestě není žádná turbína, která by procházející vodě odnímalala energii. Je to tak horní limit rychlosti dosažitelné v přivaděčích.

Hltnost turbíny vyjadřuje, jak velký objem vody je schopna zpracovat (typická jednotka m<sup>3</sup>\*s<sup>-1</sup>). Je-li určen průřez potrubí, můžeme určit rychlost vody v potrubí, když turbína plně pracuje jako:

$$v = \frac{Q_t}{S_p} [m * s^{-1}] \quad (R20)$$

Kde: v rychlost proudění vody [m]  
Q<sub>T</sub> hltnost turbíny [m<sup>3</sup>\*s<sup>-1</sup>]  
S<sub>p</sub> průřez potrubí [m<sup>2</sup>]



Rozdíl rychlosti procházející turbínou a rychlosti spočítanou z Bernoulliho rovnice je ze zákona zachování energie vyjádřením výkonu, který turbína odebere proudící vodě.

$$P = \dot{m} * \frac{c_{Bernoulli}^2 - c_{hltnost}^2}{2} [W] \quad (R21)$$

Kde:  $\dot{m}$  Hmotnostní tok [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

Je tak k dispozici způsob, jak určit na turbínu předanou energii bez toho, aby bylo nutné pracovat s hodnotou účinnosti přivaděčů a zbytkové energie vody proudící do dolní nádrže ve formě kinetické energie.

## 6.2 Ztráty v turbíně

Ztráty v turbíně lze rozdělit na několik druhů. Jsou to ztráty profilové vznikající při styku vody s lopatkami. Ztráty okrajové vznikající v oblasti konce lopatek. Ztráty vějířové vznikají na lopatkách s malým poměrem vnitřního a vnějšího poloměru lopatek. Neboli vznikají z rozdílu rychlostí proudu na lopatce. Čtvrtým druhem ztrát jsou ztráty vzniklé vzájemným působením rozváděcího a oběžného kola. Posledním typem ztrát jsou ztráty vnitřními netěsnostmi turbíny<sup>65</sup>.

Protože budu uvažovat s použitím Francisovy turbíny jak pro výrobu elektřiny, tak i pro čerpání vody do horní nádrže, lze očekávat obdobné ztráty i v čerpadlovém chodu.

Protože uvedené ztráty jsou primárně závislé na jejich konstrukci, která je z teoretického hlediska zpracovatelná jen velmi obtížně. Naštěstí PVE Milada není jediný projekt kde se vyskytuje Francisova turbína. Proto převezmu údaje o turbíně z jiného projektu z poslední doby, který též využívá Francisovu turbínu.

Není možné očekávat, že turbína, jejíž parametry použiji, bude přesně odpovídat potřebám této práce. Pro aplikaci parametrů proto použiji teorii podobnosti.

Aby bylo možné použít podobnost turbín pro přepočty parametrů z jedné na druhou, je třeba splnit několik podmínek. Zásadní je rovnost měrných otáček obou turbín. Druhou významnou podmínkou je poměr průměrů oběžného kola turbín, který by neměl překročit 10.<sup>66</sup> Měrné otáčky lze určit pomocí tohoto vzorce<sup>67</sup>:

$$n_r = n * \sqrt{Q} * (g * H)^{-\frac{3}{4}} [ot * min^{-1}] \quad (R22)$$

Kde:  $n$  jmenovité otáčky turbíny [ $ot \cdot min^{-1}$ ]

Protože se pomocí podobnosti nebudu určovat parametry žádné předvybrané turbíny, ale aplikovat parametry modelové turbíny při změně rozměru průměru oběžného kola, tak lze krok určování měrných otáček vynechat.

---

<sup>65</sup> Kadroňka J. *Lopátkové stroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. IBSN 80-7204-297-1, strany 77 - 79

<sup>66</sup> Bednář J., *Turbíny (malé vodní elektrárny)*, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013 IBSN 978-80-908437-0-6, strany 140 - 141

<sup>67</sup> Bednář J., *Turbíny (malé vodní elektrárny)*, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013 IBSN 978-80-908437-0-6, strana 139

Po získání parametrů modelové turbíny je cílem určit účinnost turbíny. Pro získání její hodnoty je potřeba vyřešit soustavu 2 rovnic<sup>68</sup>. Rovnice pro hltnost je potřeba pro určení rozměru turbíny. Ten je potřeba pro výpočet účinnosti turbíny, která je ale zase zpětně potřeba pro určení rozměru.:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) * \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{H_M}{H_D}} \quad [-] \quad (R23)$$

$$Q_D = Q_M * \left(\frac{D_D}{D_M}\right)^2 * \sqrt{\frac{H_D}{H_M}} * \sqrt{\frac{\eta_D}{\eta_M}} \quad [m^3 * s^{-1}] \quad (R24)$$

Kde: Indexy: D Dílo (Zjišťovaná turbína)  
M Model

Protože ze druhé rovnice této soustavy je cílem získat  $D_D$  a nikoli  $Q_D$ , bude vhodnější ji rovnou přepsat do následujícího tvaru:

$$D_D = D_M * \sqrt{\frac{Q_D}{Q_M}} * \sqrt[4]{\frac{H_M}{H_D}} * \sqrt[4]{\frac{\eta_M}{\eta_D}} \quad [m] \quad (R25)$$

Po vyřešení této soustavy bude známa účinnost turbíny při zadaných hodnotách. Maximální účinnosti je dosahováno obvykle přibližně při 90 % maxima otáček<sup>69</sup>.

Tím je vyřešena problematika ztrát v jednom směru proudění. Bohužel účinnost Francisovy turbíny v režimu čerpadla bývá odlišná od účinnosti v režimu turbíny. Zároveň i průtok čerpadlem bude i při stejném výkonu nižší než průtok turbínou. Nosný parametr turbíny, průměr rozváděcího kola, bude již zjištěn z první části výpočtu. Cílem druhé části výpočtů tak je určit účinnost turbíny pro druhý režim a průtok vody v tomto režimu.

Účinnost lze vypočítat vzorcem ( ) z této kapitoly. Průtok lze dopočítat úpravou vzorce ( ):

Pro turbínový režim takto:

$$Q = \frac{P}{\eta * \rho * g * H} \quad [m^3 * s^{-1}] \quad (R26)$$

A pro čerpadlový režim takto:

$$Q = \frac{P * \eta}{\rho * g * H} \quad [m^3 * s^{-1}] \quad (R27)$$

### 6.3 Ztráty v generátoru-motoru

Protože ztráty v elektrickém stroji jsou, podobně jako ztráty ve vodní turbíně závislé na mnohých parametrech, které jsou primárně konstrukčního charakteru, přistoupím k nim obdobně, jako v případě ztrát v turbíně.

Potřebný výkon synchronního stroje určím na základě výkonu turbíny. To znamená, že bude dopočítán pomocí spádu očištěného o ztráty v přiváděcích, maximálního průtoku vody turbínou a účinnosti turbíny.

<sup>68</sup> Bednář J., *Turbíny (malé vodní elektrárny)*, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013  
ISBN 978-80-908437-0-6, strany 140 – 141, rovnice pro účinnost + strana 137, rovnice pro hltnost

<sup>69</sup> Bednář J., *Turbíny (malé vodní elektrárny)*, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013  
ISBN 978-80-908437-0-6, strana 164

$$P_G = \text{Užitný spád} * Q_T * \rho * g * \eta_T [W] \quad (R28)$$

Kde:	užitný spád	spád při plně naplněné horní nádrži očištěný o ztráty v přivaděčích [m]
	$Q_T$	Maximální průtok turbínou [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
	$\rho$	hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
	$g$	gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
	$\eta_T$	Účinnost turbíny [-]

#### 6.4 Ztráty v přenosu elektřiny

Elektrická energie vyrobená generátorem se přenáší vodiči do transformátoru, kde je napětí transformováno z napětí generátoru na výstupní napětí sítě. Za transformátorem dochází k předání energie do sítě a další ztráty tak již nejsou z hlediska PVE zajímavé. Při ukládání elektrické energie je přirozeně postup opačný.

Protože transformátor se bude nacházet v areálu PVE poblíž generátorů, nebude délka vedení větší než nižších pár set metrů, a tedy lze ztráty na tomto vedení vůči ztrátám v transformátoru zanedbat.

Mezi výrobci udávanými hodnotami transformátorů je možné najít ztráty naprázdno ( $\Delta P_0$ ) a ztráty nakrátko ( $\Delta P_k$ ). Ztráty naprázdno jsou ztráty, které vznikají již při prostém připojení napětí na transformátor bez ohledu na zatížení. Ztráty nakrátko jsou ztráty, které vznikají při jmenovitém zatížení transformátoru a vyjadřují na zatížení závislou část ztrát. Tyto jsou závislé druhou mocninou na zatížení.

$$\Delta P_0 \sim \frac{S}{S_n} \quad \Delta P_k \sim \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \quad (R29), (R30)$$

Kde:	$\Delta P_0$	ztráty naprázdno [W]
	$\Delta P_k$	ztráty nakrátko [W]
	$S$	dodávaný zdánlivý výkon do transformátoru [VA]
	$S_n$	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]

Celkové ztráty transformátoru tvoří součet ztrát nezávislých na zatížení a ztrát závislých na zatížení.

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k * \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 [W] \quad (R31)$$

S pomocí tohoto vzorce se lze pustit do určení závislosti účinnosti transformátoru na jeho zatížení. Začnu dosazením do obecného vzorce účinnosti, kterým je podíl úspěšně přetransformované energie ku energii do transformátoru dodané.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \Delta P}{P_{in}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}} = 1 - \frac{\Delta P_0}{P_{in}} - \frac{\Delta P_k}{P_{in}} * \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 [-] \quad (R32)$$

Kde:	$P_{in}$	do transformátoru vstupující činný výkon [W]
	$P_{out}$	z transformátoru vystupující činný výkon [W]

Na základě vzorce účinnosti lze obecnou závislost účinnosti na zatížení i graficky znázornit. Následující graf je vytvořen pro tyto parametry:

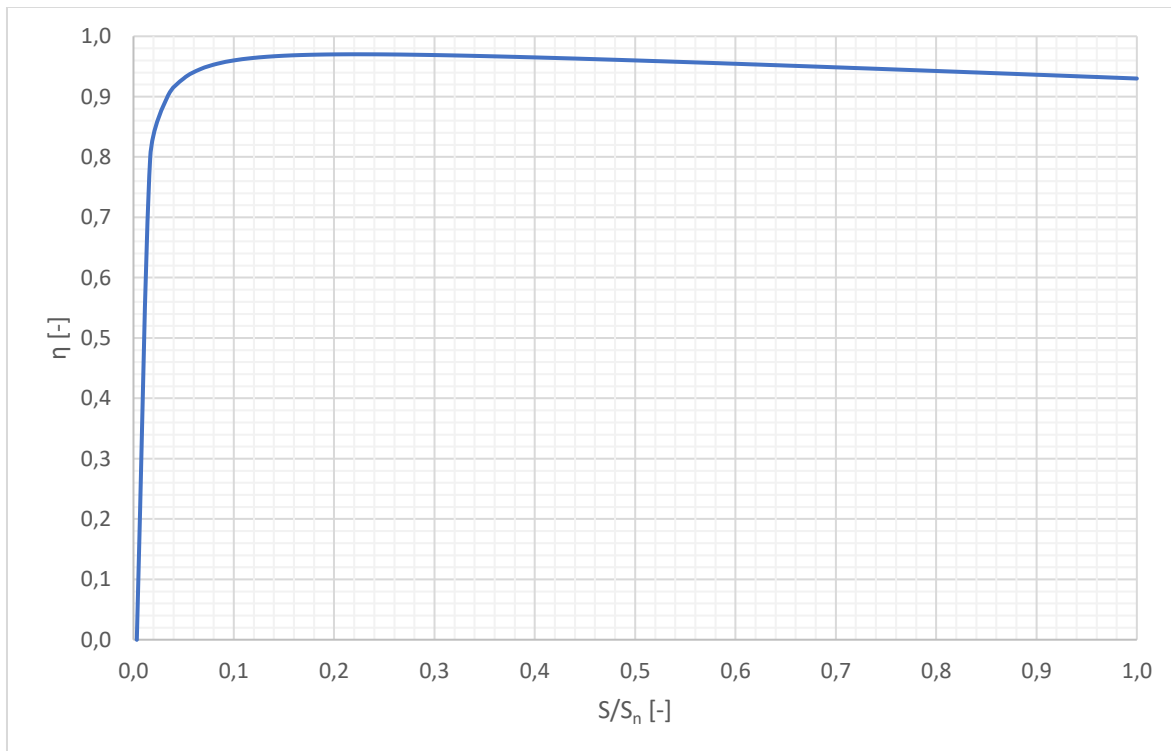
$$\Delta P_0 = 1 \text{ kW}$$

$$\Delta P_k = 20 \text{ kW}$$

$$S_n = 300 \text{ kVA}$$

$$\text{účinník} = \cos(\varphi) = P/S = 1$$

Graf byl vytvořen v Excelu (příloha 1) a to s krokem 5 kVA zatížení. První bod není roven 0, ale  $\Delta P_0 = 1 \text{ kW}$ , protože i jen na napětí bez zatížení připojený transformátor musí krýt ztráty naprázdno.



Graf 1: Průběh účinnosti transformátoru v závislosti na přenášeném výkonu.

Teorie říká, že nejvyšší účinnost transformátoru je v bodě zatížení definovaném takto<sup>70</sup>:

$$\frac{S_{opt}}{S_n} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_k}} = \sqrt{\frac{1}{20}} = 0,223 \quad (R33)$$

Jak z grafu, tak i z excelu si lze ověřit, že pro ukázkový příklad výsledek platí.

<sup>70</sup> Ztráty transformátorů a jak se ztrátami pracovat [online]. AF POWER agency a. s. [citováno 14. 1. 2022]  
Dostupné z: <https://allforpower.cz/rozvody-energie/ztraty-transformatoru-a-jak-se-ztratami-pracovat-200>

## 7 Role Přečerpávacích vodních elektráren v energetice

Přečerpávací vodní elektrárna vzhledem k principu své funkce není využívána přímo pro výrobu elektrické energie, ale pro akumulaci a uchování elektrické energie. Během dne se podle chování spotřebitelů mění spotřeba elektrické energie, a i některé zdroje elektrické energie (typicky solární a větrné elektrárny) vyrábí elektřinu poněkud nestabilně. Tím vzniká potřeba takových zdrojů, které umožňují v dostatečné míře, dostatečně pružně měnit elektrický výkon, který dodávají do energetické soustavy. PVE patří mezi zdroje, které toto splňují. Vodní turbíny/čerpadla umožňují velmi rychlý náběh či změnu výkonu v řádu nižších jednotek minut a zároveň jsou schopny poskytnout v čerpacím režimu i spotřebu.

PVE v Českých podmínkách ekonomicky stojí na dvou pilířích. Prvním pilířem se dá vyjádřit heslem: „Nakupuj levně, prodej draze“, neboli, když je cena elektrické energie nízká (typicky při malé spotřebě, nebo při velké výrobě OZE) je elektřina nakupována a využita pro čerpání vody do horní nádrže a když je cena vysoká (typicky ve špičkách spotřeby, zvláště v kombinaci s nízkou výrobou OZE), je voda z horní nádrže puštěna přes turbínu a vyrobená elektřina je prodána.

Druhým pilířem je poskytování podpůrných služeb provozovateli přenosové soustavy, tedy v ČR ČEPSu. Tyto služby jsou definovány v kodexu přenosové soustavy<sup>71</sup>.

Na základě kodexu lze určit, že podpůrné služby, které ČEPS poptává jsou rozděleny do dvou kategorií. První jsou služby výkonové rovnováhy (též SVR). Druhou jsou služby ostatní. Mezi SVR patří: Automatická regulace frekvence (FCR), Regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR), Regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR) a zálohy pro náhradu (RR). Ostatními podpůrnými službami jsou: regulace U/Q (SRUQ), schopnost ostrovního provozu (OP) a schopnost startu ze tmy (BS).

Nyní rozeberu jednotlivé podpůrné služby v souvislosti s možností PVE je poskytovat.

### 7.1 Podpůrné služby<sup>72</sup>

FCR je služba při které je výkon bloku poskytujícího službu automaticky proporcionálně upravován v závislosti na frekvenci sítě. K plnému využití výkonu dochází při frekvenční odchylce  $\pm 200$  mHz od zadané hodnoty (50 Hz s možnou úpravou o  $\pm 10$  mHz kvůli seřízení síťovou frekvencí řízených hodin). Blok musí na změnu frekvence začít reagovat do 2 sekund a do 30 sekund musí být schopen poskytnout plný sjednaný výkon. ČEPS od možných poskytovatelů této služby poptává výkony ve výši 1 až 10 MW. V případě aktivace se poskytnutá velikost výkonu určuje v minutovém intervalu.

Při vzniku výkonové nerovnováhy a jí způsobené odchylce frekvence je tak služba FCR prvním podpůrným opatřením, které na vznik nerovnováhy reaguje a částečně ji kompenzuje.

Služba aFRR se dělí na dvě podslužby: aFRR+ a aFRR- podle toho, zdali se jedná o službu zvýšení, nebo snížení dodávaného výkonu, přičemž dodavatel může poskytovat zároveň jak aFRR+, tak aFRR-. Po zadání požadavku na aktivaci (nebo poté deaktivaci) je nutno požadovaného výkonu dosáhnout do 7,5 minuty. Tato bude do konce roku 2024 zkrácena na 5 minut. Trvání aktivace služby je 15 minut, po jejíchž uplynutí může být okamžitě aktivována znovu. Při nakupování služby aFRR ČEPS platí

---

<sup>71</sup> Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps). Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022)

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-pps>

<sup>72</sup> Pokud není řečeno jinak, je zdrojem informací této části:

Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps). Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022)

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-pps>

jednak za rezervovaný hodinový výkon a také za skutečně využitou energii ve čtvrt hodinovém intervalu. Výkonovými limity od jedné jednotky je zespodu 1 MW a seshora 99 MW.

Na rozdíl od předchozích dvou služeb, které fungují automaticky, služba mFRR se aktivuje povelom dispečera. Stejně jako u služby aFRR ČEPS nakupuje rezervovaný výkon a v případě aktivace platí za využitou elektřinu. Poptává se přirozeně jak služba zvýšení, tak i snížení výkonu (mFRR+, resp. mFRR-). Kodex přenosové soustavy u služby mFRR rozlišuje standardní a specifický produkt. Standardním produktem je služba s požadavkem na dosažení požadované změny výkonu do 12,5 minuty (proto se produkt označuje též mFRR<sub>12,5</sub>) od pokynu, přičemž se počítá s 2,5 minutami na přípravu dodavatele před zahájením až desetiminutového náběhu. Služba se aktivuje na jednu čtvrt hodinu. Specifický produkt (též mFRR<sub>5</sub>) je služba s požadavkem na plnou změnu výkonu do 5 minut od pokynu. Výkon poskytnutý ve specifickém produktu musí být dodavatel služby vždy schopen dodávat nejméně 4 hodiny od aktivace. Dolní výkonový limit je u obou produktů 1 MW. Horní je v případě standardního produktu 99 MW. U specifického produktu není horní limit uveden.

Služba RR se využívá k uvolnění kapacit FRR, aby tyto mohly být využity při další, nově vzniklé odchylce<sup>73</sup>. Čas aktivace, respektive deaktivace je 30 minut. Doba trvání využití služby je od 1 do 4 po sobě jdoucích čtvrt hodin. ČEPS výkony pro službu RR nerezervuje. Službu nakupuje až v okamžik potřeby. Výkonový rozsah pro dodavatele této služby je opět od 1 do 99 MW.

Dosud popsané služby jsou služby výkonové rovnováhy. Nyní se podívám na služby ostatní.

SRUQ je podpůrná služba, která využívá jalový výkon jednotek pro udržení hodnoty napětí na zadané úrovni v pilotních uzlech soustavy. Do systému regulace jsou zařazeny jednak výrobní bloky, a také nevýrobní kompenzační prvky v pilotních uzlech soustavy. SRUQ zároveň spolupracuje s ostatními systémy regulace napětí a jalových výkonů.

Schopnost ostrovního provozu je schopnost výrobní jednotky přejít do a udržet se v provozu do soustavy, která je izolovaná od ostatních výrobních jednotek. Jednotky v ostrovním provozu jsou v případě rozpadu elektrizační soustavy základním prvkem pro její obnovu. Přejechod do ostrovního režimu nastává při odchýlení se frekvence o více než 200 mHz od běžné síťové frekvence 50 Hz. Výrobní elektrické energie poskytující tuto službu tak musí být schopna fungovat v širokém výkonovém i frekvenčním rozsahu a mít značné regulační kapacity a s tím související možnost řídit lokálně parametry ve svém ostrově. Poskytovatel služby musí být schopen udržet ostrovní provoz po dobu alespoň dvou hodin.

Schopnost startu ze tmy je schopnost výrobní elektrické energie dosáhnout bez přítomnosti vnějšího napájení jmenovitých hodnot a přejít do ostrovního režimu a postupně rozšiřovat a zatěžovat ostrovní síť podle pokynů ČEPS. Výrobní schopna BS tak musí zároveň splňovat předpoklady naznačené v předchozím odstavci.

Pro poskytování jednotlivých podpůrných služeb musí být jejich poskytovatel certifikován certifikátorem, což je externí firma s autorizací od ČEPS k certifikování konkrétních podpůrných služeb. Pro certifikaci na poskytování podpůrné služby musí potenciální certifikátor splňovat některé právní a odborné záležitosti zmíněné v kapitolách 4.1.1 až 4.1.3 v kodexu, jako je například bezúhonnost, dosažené vzdělání a délka praxe v oboru. Také musí mít zkušenost se zkouškami, které jako certifikátor bude provádět. Autorizace pro certifikaci má platnost 5 let.

---

<sup>73</sup> Podpůrné služby [online] ČEPS, a. s. [citováno 14. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby>

Popis provedení zkoušek pro certifikaci poskytovatele podpůrné služby je velmi zevrubně pro každou službu uveden v kodexu u každé jednotlivé služby.

#### 7.1.1 Obchodování s podpůrnými službami

ČEPS nakupuje podpůrné služby od poskytovatelů dvěma způsoby: Ve výběrovém řízení (též VŘ), na denním trhu (též DT), přímou smlouvou s poskytovateli a aktivací volných nabídek. Služby výkonové rovnováhy ČEPS pořizuje primárně pomocí výběrových řízení a denního trhu. Hlavním rozdílem mezi VŘ a DT je, že ČEPS ve VŘ poptává neměnné dopředu dané množství služby, zatímco na DT poskytuje pouze předběžnou předpokládanou hodnotu poptávky, která se může měnit podle potřeby ČEPSu až do času pro finalizaci nabídek. Teprve pokud se provozovateli soustavy nepodaří ve VŘ a na DT nakoupit dostatečné množství záloh, uzavírá přímé smlouvy. Ostatní podpůrné služby (tj. SRUQ, OP, BS) jsou nakupovány pomocí přímých smluv s poskytovatelem. Poskyvatelé podpůrných služeb typu FRR jsou zároveň povinni podat nabídky regulační energie v takové výši, aby pokryli své závazky vyplývající ze smluv uzavřených na zálohy na FRR. Poskyvatel služby typu FRR může podat i nabídku nad rámec uzavřené smlouvy, potom se ovšem jedná o volnou nabídku, kde strana nabídky nedostává platbu za rezervovaný výkon a provozovatel soustavy tak případně pouze dokupuje regulační výkon. Ve formě volných nabídek probíhají rovněž všechny nabídky služby typu RR.<sup>74</sup> Při vyhodnocování nabídek služeb typu SVR se: „*Akceptují se nabídky s nejnižší nabídkovou cenou příslušné SVR s ohledem na minimalizaci nákladů na zajištění Podpůrných služeb a zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu soustavy*”<sup>75</sup>.

#### 7.2 Využití PVE pro poskytování podpůrných služeb

Hned na začátku z dalších úvah vyloučím podpůrné služby, které z principu fungování PVE není možné poskytnout. Jedná se v první řadě o služby OP a BS. Není možné, aby elektrárna (zvláště s dolním stavem hladiny horní nádrže) byla schopna do svého ostrova po dobu několika hodin dodávat potřebný výkon čímž není možné plnit podmínky služby OP. Přestože dosáhnout najetí elektrárny bez vnějšího zdroje energie by jistě bylo poměrně jednoduché (pořád se jedná o typ elektrárny vodní, kde rozběh obecně řeší gravitace), není ze stejných důvodů jako v předchozí větě možné poskytovat ani služby startu ze tmy, protože, jak jsem uvedl v přechodí podkapitole, po samotném startu musí být elektrárna schopna pracovat v ostrovním režimu podle podmínek služby OP.

Co se třetí ze skupiny ostatních podpůrných služeb týče, služby SRUQ, tak tuto naopak PVE poskytovat může. V kapitole o motor-generátoru předpokládám použití synchronního stroje pro přechod mezi elektrickou a mechanickou prací. Synchronní stroj je s pomocí buzení schopen poměrně širokého řízení jalového výkonu v obou pracovních režimech. V režimu motoru i v režimu generátoru.

Služby SVR stojí svým principem na schopnosti dostatečně rychle změnit výkon bloku (což například při požadavku na vyšší dodávku výkonu může znamenat nejen zvýšení výkonu na generátoru, ale také snížení výkonu při čerpání) a změnu po určitou dobu udržet. Je známým faktem, že vodní elektrárny jsou poměrně rychle (v řádu nižších jednotek minut i rychleji (například vodní elektrárny Vltavské kaskády to dokážou za 2,5 minuty<sup>76</sup>)) schopné najet z nuly na jmenovité hodnoty a obdobně rychle i

<sup>74</sup> Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps). Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022), strany 21-25

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

<sup>75</sup> Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps). Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022), strana 24

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

<sup>76</sup> *Dlouhé Stráně: Český div vyvažuje elektrickou soustavu* [online] siemens, s.r.o. [citováno 18. 3. 2022]

naopak sjet. I změny výkonu za běhu tak z hlediska času nebudou problém. Jiná otázka je udržení změny výkonu. Čas, po který může být PVE schopna poskytnout při poskytování služby je totiž závislý na stavu hladiny v nádržích (v případě Milady na stavu hladiny v nádrži horní). Jelikož naplnění nebo naopak vyprázdnění horní nádrže k limitním stavům může bránit v pokračování výroby elektřiny (respektive čerpání vody), je nutno se stavem hladiny horní nádrže při nabízení podpůrných služeb typu SVR počítat.

Lze tak říci, že PVE je schopna poskytovat službu aFRR (v obou směrech změny výkonu) po valnou většinu období čerpání vody do horní nádrže i období výroby elektřiny. Zvláště aFRR směřující proti v danou chvíli aplikovanému proudu energie (tj. aFRR+ při čerpání a aFRR- při výrobě) může být prodávána ve větších množstvích, protože primární přesun masy vody vytváří potřebnou rezervu. Stejně tak i v obdobích nečinnosti může díky rychlému startu PVE poskytovat službu aFRR (primárně samozřejmě opět podle v předchozí větě popsaného schématu aFRR+ při plné horní nádrži a aFRR- při dolním stavu hladiny).

Standardní produkt služby typu mFRR, tedy mFRR<sub>12,5</sub> se chová obdobně jako služba aFRR, jen s mírně odlišným způsobem aktivace (což je z hlediska vlivu na velikost akumulované energie nezajímavé) a o 5 minut delším časem na aktivaci. Proto i pro tuto službu platí totéž co jsem psal v předchozím odstavci.

Specifický produkt mFRR<sub>5</sub> je již zajímavější. Podpůrná služba mFRR<sub>5</sub> je omezena nutností zajistit možnost využívání služby po dobu 4 hodin od aktivace<sup>77</sup>. A tedy přestože pro mFRR<sub>5</sub> platí stejná poučka jako u služby aFRR co se vztahu úrovně a směřování hladiny horní nádrže se směrem přesunu energie poskytované zálohy na regulační energii, tak právě kvůli zmíněné lhůtě 4 hodin je potřeba u služby mFRR<sub>5</sub> mnohem více než u služby aFRR vzít do úvahy možnost vyčerpání kapacity horní nádrže což v případě výrazného využití PVE pro běžné obchodování s elektřinou omezí možnost nabízet a poskytovat službu mFRR<sub>5</sub>.

Služba RR je z hlediska potřeby rezerv v možnosti akumulovat a vyrábět elektrickou energii poměrně specifická tím, že je nakupována provozovatelem soustavy situačně<sup>78</sup>, což na rozdíl od služeb aFRR a mFRR umožňuje být provozovateli PVE s poskytováním služby RR více flexibilní s ohledem na situaci na trhu elektřinou.

### 7.3 Běžné využití PVE

V předešlé části jsem probral možnosti využití PVE v oblasti podpůrných služeb, nyní proberu možnosti využití PVE při běžném provozu soustavy. Jak jsem již zmínil v úvodu celé kapitoly hlavní činností PVE je uschování elektrické energie načerpáním horní nádrže, když je poptávka po elektřině malá, a naopak zpětná výroba elektřiny, když je poptávka velká. To se obecně na ekonomickém provozu elektrárny projevuje podle zákona nabídky a poptávky tak, že v obdobích nízké poptávky (období čerpání, a tedy nákupu elektřiny) je cena elektrické energie nižší než v obdobích poptávky vysoké (období výroby, a tedy prodeje elektřiny). Pro provozovatele PVE je tento obchodní model

---

Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/spolecnost/o-nas/pribehy-technologie-siemens-v-cesku/dlouhe-strane-cesky-div-vyvaluje-elektrickou-soustavu.html>, kapitola Skladování elektřiny

<sup>77</sup> *Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps)*. Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022), strana 95

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-pps>

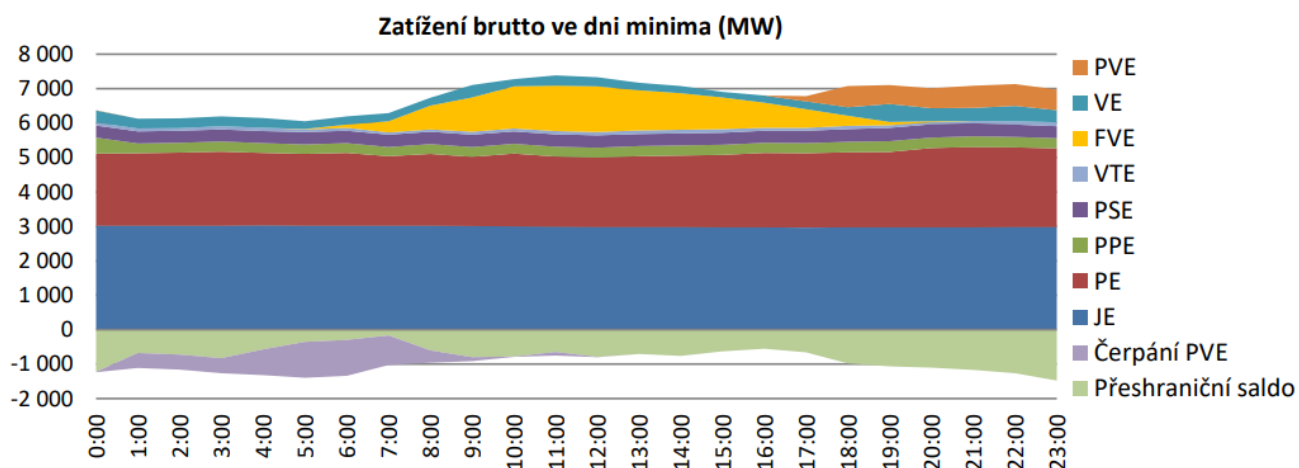
<sup>78</sup> *Kodex přenosové soustavy – Část II Podpůrné služby (pps)*. Revize duben 2022. Datum účinnosti 1. 4. 2022 (citováno 13. 3. 2022), strana 137

Ke stažení: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-pps>



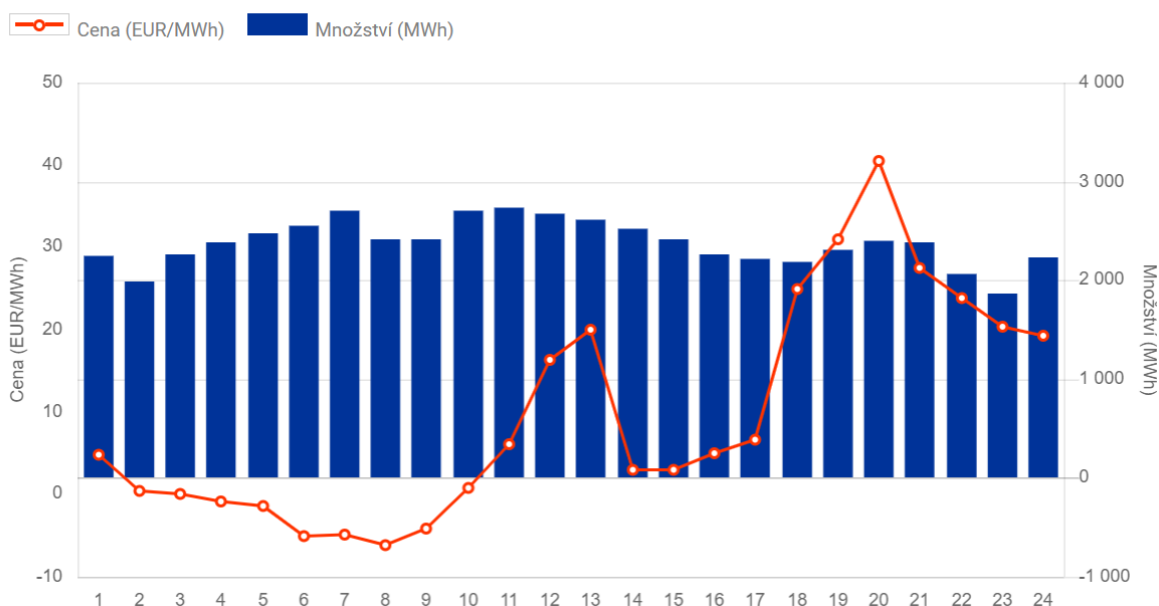
výhodný, pokud rozdíl v cenách elektřiny mezi čerpáním a výrobou je takový, že překoná proměnné náklady (dané primárně ztrátami energie během cyklu) provozování cyklu.

Pro praktické přiblížení, jak to vypadá ukáží na následujících obrázcích porovnání výroby a potřeby elektrické energie přečerpávacími elektrárnami s cenami elektřiny na denním trhu s elektřinou. Jako modelové jsem použil dny maxima a minima zatížení elektrizační soustavy ČR v roce 2020.



Obrázek 8: Zatížení elektrizační soustavy ČR ve dni minima roku 2020 (5. 7.)<sup>79</sup>

### Výsledky denního trhu ČR - 05.07.2020



Obrázek 9: Cena elektřiny a obchodované množství na denním trhu ve dni minima roku 2020 (5. 7.)<sup>80</sup>

<sup>79</sup> Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020 [online]

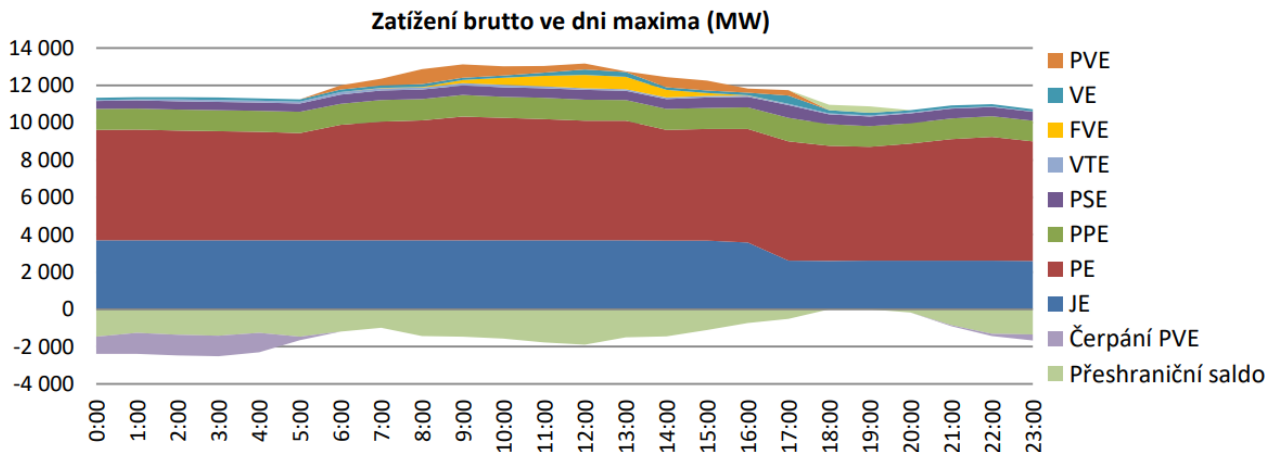
Energetický regulační úřad [citováno 25. 3. 2022], strana 35

Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173](https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173)

<sup>80</sup> Denní trh [online]. OTE, a.s. [citováno 25. 3. 2022]

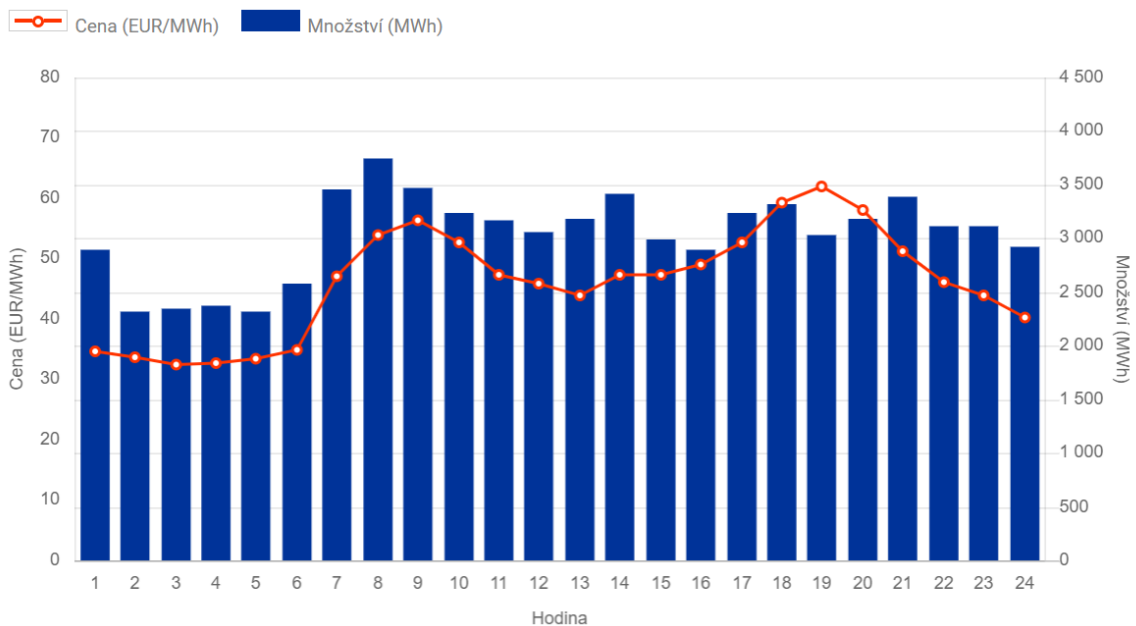
Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh?date=2020-07-05>

Při porovnání obou obrázků na této straně je možné vidět, že k čerpání dochází v pozdně nočních hodinách, kdy je spotřeba elektřiny nízká a cena elektřiny na denním trhu je v tomto dni dokonce záporná. K výrobě elektřiny z naakumulované vody dochází večer, kdy je spotřeba ještě vysoká, ale již dostatečně nesvítí slunce na fotovoltaiky. Cena elektřiny ve večerních hodinách odpovídá zvýšené poptávce a nefunkčním fotovoltaickým elektrárnám.



Obrázek 10:Zatížení elektrizační soustavy ČR ve dni maxima roku 2020 (22. 1.)<sup>81</sup>

### Výsledky denního trhu ČR - 22.01.2020



Obrázek 11:Cena elektřiny a obchodované množství na denním trhu ve dni maxima roku 2020 (22. 1.)<sup>82</sup>

<sup>81</sup> Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020 [online]

Energetický regulační úřad [citováno 25. 3. 2022], strana 34

Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173](https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173)

<sup>82</sup> Denní trh [online]. OTE, a.s. [citováno 25. 3. 2022]

Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh?date=2020-01-22>

Ve dni maximálního zatížení roku 2020, který jak je obvyklé nastal v zimě lze rovněž vidět popsanou podobnost mezi čerpáním/výrobou a cenou elektřiny. Protože 22. ledna je uprostřed zimy výroba z fotovoltaických elektráren výrazně menší než ve dni minima, které bylo v červenci. Zároveň období nejvyšší spotřeby je oproti letnímu datu posunutě k polednímu a večer nastal pokles. Na to kromě ročního období také může mít vliv, že 22. 1. 2020 byla středa a 5. 7. 2020 neděle což u letního termínu snižuje spotřebu přes den, kdy v zimní středu je pracovní doba. Z těchto důvodů lze pozorovat výrobu elektřiny z PVE od ranních hodin do odpoledne a nikoli až na večer jako ve dni minima. Doba čerpání je též mírně posunutá proti proudu času.

#### 7.4 Alternativy k PVE

Primární úloha přečerpávacích elektráren, jak jsem již vícekrát zmínil, je v uchování elektrické energie. Přečerpávací elektrárny ovšem nejsou jedinou variantou, jak elektřinu skladovat, existují i jiné možnosti, některé známé již delší dobu, některé modernější.

Kromě přečerpávacích elektráren a vody v nich lze elektřinu do potenciální energie ukládat třeba do závaží, do kterého se vytahováním do výšky ukládá energie, která se při spuštění závaží zase přemění na energii elektrickou. Systémy tohoto druhu mají být schopny poskytovat výkon až několika MW po dobu vyšších jednotek hodin při účinnosti cyklu přes 80 %<sup>83</sup>. Závaží se může spouštět z věže<sup>84</sup> nebo třeba dolů do dolu, což je jedno z možných využití šachet nevyužívaných dále pro hornickou činnost<sup>85</sup>.

Další možností ukládání energie je ukládání do kinetické energie vysokorychlostního setrvačnicku. Tyto setrvačnické systémy mají poměrně krátkou vybíjecí dobu pouze desítek sekund, ale na druhou stranu disponují vysokou účinností kolem 90 %<sup>86</sup>. Existují i větší, pomaleji běžící setrvačnické systémy, s delší dobou vybíjení, které ale spíše našli využití jako akumulátor elektrické energie například pro elektrické gyrobusey<sup>87</sup>.

Stlačování vzduchu je jedna z možností, jak ukládat dlouhodobě elektřinu ve velkém, aniž by byla potřeba hmotných celků, do kterých bude energie akumulována jako v předchozích dvou případech. Ve dvou zdrojích, se kterými jsem u této možnosti pracoval jsem zjistil dva způsoby přeměny tlakové energie ve stlačeném vzduchu zpět na elektřinu. Jednou možností je prosté puštění stlačeného vzduchu přes turbínu<sup>88</sup>. Druhou možností je přimíchání stlačeného vzduchu k zemnímu plynu, což při

---

<sup>83</sup> *Akumulace energie – výklad* [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Mechanické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>84</sup> *Solution – gravity* [online] Energy Vault. inc. [citováno 26. 3. 2022], část EV1 TOWER

Dostupné z: <https://www.energyvault.com/gravity>

<sup>85</sup> *Levnější než baterie: opuštěné těžební šachty mají sloužit jako zásobárna obnovitelné energie* [online] CzechTrade [citováno 26. 3. 2022]

Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/clanky/levnejsi-nez-baterie-opustene-tezebni-sachty-maji-slouzit-jako-zasobarna-obnovitelne-energie/>

<sup>86</sup> *Akumulace energie – výklad* [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Mechanické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>87</sup> *Gyrobusey* [online] Wikipedia [citováno 26. 3. 2022]

Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gyrobusey>

<sup>88</sup> *Skladování stlačeného vzduchu je jednou z budoucností energetiky* [online] inStory.cz [citováno 27. 3. 2022]

Dostupné z: <https://tech.instory.cz/1466-skladovani-stlaceneho-vzduchu-je-jednou-z-budoucnosti-energetiky.html>

spalování v paroplynové turbíně zvýší při odpojeném kompresoru výkon turbíny na dvojnásobek oproti běžnému stavu<sup>89</sup>. Obě varianty mají podobnou účinnost kolem 50 %.

Jedním ze způsobů výroby elektřiny je přímá výroba elektrické energie z chemické reakce vodíku a kyslíku za vzniku odpadní vody. Stejně tak lze opačně elektrolyticky vodu rozkládat na vodík a kyslík. Lze tak uložit značná množství energie ve formě vodíku, který lze později využít pro výrobu elektřiny, a to buď přímo, nebo lze spolu s oxidem uhličitým z vodíku připravit metan, který lze spalovat v plynové elektrárně. Vodík je možné skladovat ve značném množství v přetlakovaných prostorech nebo v kapalném stavu<sup>90</sup> (zde je nepochybně nutné poznamenat, že teplota varu vodíku je 20,27 K<sup>91</sup>). Pro představu o spotřebě článku: plyný vodík natlakovaný na 350 barů (35 MPa) obsahuje v sobě při použití v článku potenciálně až 0,75 kWh/l a vodík zkapalněný 2,6 kWh/l<sup>92</sup>. Účinnost vodíkových článků se pohybuje kolem 40 % ovšem hustota uchovávané energie umožňuje v relativně poměrně malém objemu uchovávat značné množství energie pro i několikadenní výrobu<sup>93</sup>. Pro porovnání s PVE: 750 Wh (=2,7 MJ) v litru stlačeného vodíku odpovídá kubíku vody v horní nádrži přečerpávací elektrárny s převýšením 276 m (viz výpočet pod odstavcem).

$$\text{převýšení} = \frac{\text{energie v litru vodíku}}{\text{hmotnost vody} * \text{gravitační konstanta}} = \frac{2\,700\,000}{998 * 9,81} = 275,78 \text{ m} \quad (\text{R34})$$

Energie se dá rovněž uchovávat v teple. Solární elektrárny používající tepelnou energii ze Slunce ve svých tepelných okruzích často používají zásobníky, které pomáhají stabilizovat přenos energie od nestabilního Slunečního záření do elektrického generátoru. Také u okruhů, které jsou naplněny roztavenou solí umožňují zásobníky, že sůl nezatuhne. A stejně tak je možné tyto zásobníky cíleně použít pro akumulaci energie. Je možné podle požadavku trhu energii načas uchovat v teple v zásobníku a až později ji pustit směrem ke generátoru. Spolu se změnou teploty je možné využívat též změnu skupenství.<sup>94</sup>

Na závěr jsem si nechal dva způsoby, které jsou staré jako elektrotechnika sama, ne-li starší. Je ukládání energie do akumulátorů a ukládání energie do kondenzátorů a cívek. Ukládání do energie elektrického pole kondenzátoru má výhodu z hlediska vysoké účinnosti, protože nedochází k přeměně druhu energie elektrické na jinou a schopnosti rychle měnit úroveň nabití. Problémem je nedobrá schopnost energii zachovat po delší dobu. Vhodné pro toto použití jsou superkapacitory,

<sup>89</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Mechanické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>90</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Chemické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>91</sup> Hydrogen [online] Wikipedia [citováno 28. 3. 2022]

Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>

<sup>92</sup> BU-1007: Net Calorific Value [online] Isidor Buchmann [citováno 28. 3. 2022], Table 2

Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-1007-net-calorific-value>

<sup>93</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Chemické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>94</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022], kapitola Systémy využívající ukládání tepelné energie

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

kteře mají velkou kapacitu a malé průrazné napětí<sup>95</sup>. Ukládání energie do energie magnetického pole cívky se provádí na supravodivých cívkách, které tak nemají ztráty při průchodu proudem. Ten je vzhledem k principu akumulace energie v cívce potřeba udržovat po celou dobu kdy je energie v cívce uložena. Zároveň je potřeba celé zařízení uchládit na kritickou teplotu, kdy se materiál stane supravodivým. Na druhou stranu je energie uložená v magnetickém poli cívky uchována podstatně trvaleji než u kondenzátorů.<sup>96</sup>

Úplně nakonec jsem si nechal akumulátory, které do sebe ukládají energii elektrochemickými reakcemi. Vlastnosti, výhody a nevýhody se liší podle typu elektrolytů v nich. Nejstarší typ, akumulátory olovené, jsou na jednu stranu schopné generovat vzhledem ke své hmotnosti značné proudy, na druhou stranu jejich kapacita je ze všech používaných typů akumulátorů nejslabší. Navíc je jejich součástí ekologicky problematické olovo.<sup>97</sup> Jiný výrazně využívaný druh akumulátorů je na bázi lithium-iontové. Jsou používány i například v již provozovaných bateriových úložištích v ČR<sup>98</sup>. Li-ion akumulátory mají větší poměr energie/hmotnost, ale jsou dražší než jiné typy akumulátorů<sup>99</sup>. Také trpí tepelnou nestálostí (a citlivostí na poškození), která může i při nevelkém poškození akumulátoru způsobit požár, který může mít u vícečlánkových akumulátorů tendenci vzplanout opakovaně<sup>100</sup>.

---

<sup>95</sup> BU-1007: Net Calorific Value [online] Isidor Buchmann [citováno 28. 3. 2022]

Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-1007-net-calorific-value>

<sup>96</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022],

kapitola Elektrické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>97</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022],

kapitola Elektrochemické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>98</sup> Největší bateriové úložiště v ČR zahájilo svůj provoz v Plané nad Lužnicí [online]

Topinfo s.r.o. [citováno 30. 3. 2022]

Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/19624-nejvetsi-bateriove-uloziste-v-cr-zahajilo-svuj-provoz-v-plane-nad-luznici>

<sup>99</sup> Akumulace energie – výklad [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022],

kapitola Elektrochemické systémy akumulace

Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>

<sup>100</sup> Nebezpečné baterie? – část I. [online] Topinfo s.r.o. [citováno 30. 3. 2022]

Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18629-nebezpecne-baterie-cast-i>

## 8 Technické řešení přečerpávací vodní elektrárny Milada

Jako možná řešení PVE na jezeře Milada jsem se rozhodl připravit 3 různé varianty. Varianty se mezi sebou v základu liší velikostí horní nádrže. To se přirozeně projeví v akumulaci kapacitě elektrárny stejně jako ve jejím výkonu. Milada navíc slouží jako turistické lákadlo, a to včetně vodních radovánek. Jak jsem popsal v kapitole 4.3.4, má být rekreační atraktivita vodní plochy dále rozvíjena. Proto nezapomenu porovnat ani následky různých variant v této oblasti. Mám na mysli především kolísání hladiny jezera, které u větších z variant není zanedbatelné. Ostatně právě s ohledem na kolísání hladin a potenciální vliv na turismus jsem se rozhodl připravit tři varianty rozlišené právě velikostí horní nádrže.

Od velikosti akumulaci kapacity je odvozen i výkon soustrojí, které mění energii elektrickou na energii vody a zpět. Při pohledu na grafy v kapitole 7.3 je možné ze vzorku dvou dní (dne maxima a minima spotřeby v roce 2020) zjistit, že období čerpání nebo výroby trvá přibližně 6 hodin. Na základě tohoto jsem ve všech variantách zvolil výkon soustrojí tak, aby při jmenovitém výkonu došlo k naplnění nádrže přibližně za 6 hodin.

### 8.1 Vodní nádrže

Parametry horní nádrže jsou primárně určeny parametry hráze. Ve všech variantách je využito hráze sypané a podle doporučení z teoretické části (viz kapitola 5.4) jsem se držel následujících parametrů:

Sklon svahu návodní strany: 1:3

Sklon svahu vzdušné strany: 1:2,5

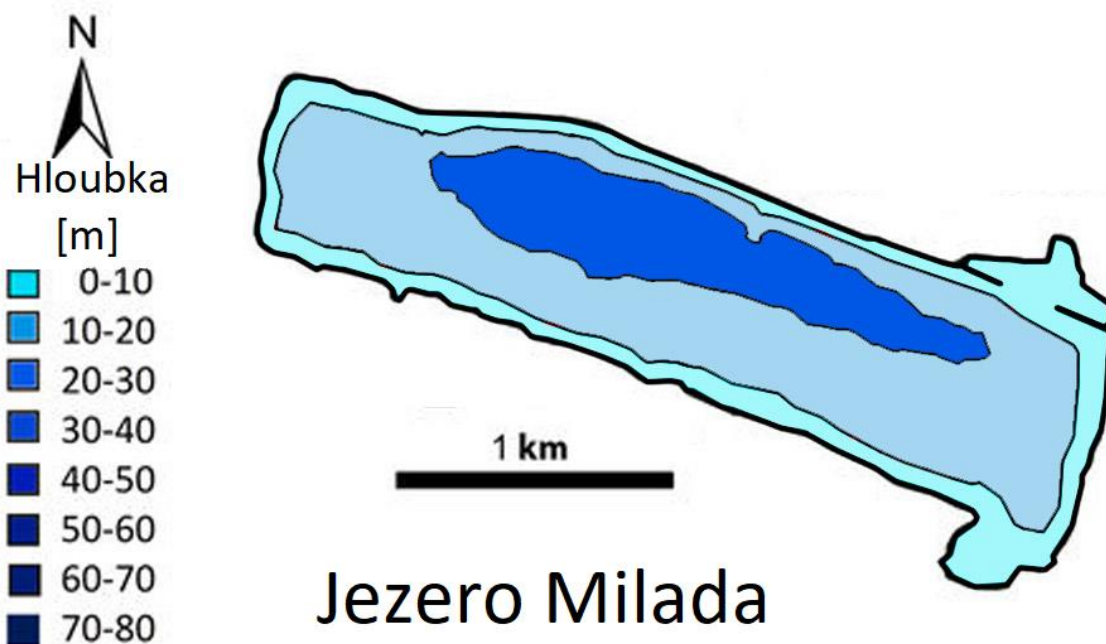
Šířka koruny hráze: 3 m

Maximální hladina vody 2 m pod úroveň koruny hráze (tedy při  $T = 2$  m)

Aby bylo možné hráze podle uvedených parametrů navrhnout a pracovat s nimi, vytvořil jsem 3D vizualizaci ve freewareovém grafickém programu Blender, z něhož jsou obrázky ukazující hráze. Soubor je dostupný mezi přílohami této práce. Varianta 1 a varianta 2 mají totožnou hráz. Liší se úrovní dna. Varianta 2 předpokládá dno na úrovni stávajícího terénu, zatímco varianta 1 počítá s odstraněním podloží na úroveň nejnižšího přirozeného bodu nádrže. Varianta 1 tak má větší objem vody, který může uchovat stejně jako rovné dno. Varianta 3 má nejmenší kapacitu a svůj vlastní návrh hráze.

Jak jsem avizoval v kapitole 5.3 proměřil jsem v programu Blender velikost vodní plochy při různých úrovních hladiny. Tyto úrovně hladiny jsou označeny výškovým rozdílem oproti koruně hráze a nadmořskou výškou.

K objemu vody v nádrži horní jsem přiřadil i odpovídající objemy v nádrži dolní. Nejlepší (a skoro jediná) mapka se zakreslením hloubek v jezeře Milada, kterou jsem našel je tato:



Obrázek 12: Jezero Milada s vyznačenými vrstevnicemi dna<sup>101</sup>. Přeloženo autorem.

Pro účely dalších výpočtů budu předpokládat, že dno se mezi jednotlivými vrstevnicemi svažuje rovnoměrně. Naštěstí je možné si vystačit s oblastí do hloubky 10 m, která jak si ukážeme víc než bohatě stačí na pokrytí objemu i největší uvažované horní nádrže.

#### 8.1.1 Hladina dolní nádrže

Hladina jezera Milada je 145 m. n. m.<sup>102</sup>

Nyní k určení objemů vody v jezeře. Opět pomocí grafického programu Blender (soubor opět v příloze) a jeho možnosti měřit plochy i složitých obrazců bylo možné zjistit poměr mezi plochou jezera, když je plné a plochou jezera, když je hladina 10 metrů pod normálem. Protože plocha jezera je známa (252 ha<sup>103</sup>), je možno snadno dopočítat plochu v hloubce 10 metrů.

$$A_{-10m} = A_{hladina} * \frac{p_{-10m}}{p_{hladina}} = 252 * \frac{0,290}{0,382} = 191 \text{ ha} \quad (R35)$$

Kde:  $A_{-10m}$  plocha jezera při hladině o 10 m pod normálem [ha]  
 $A_{hladina}$  plocha jezera [ha]  
 $p_{-10m}$  poměrná hodnota plochy jezera při hladině o 10 m pod normálem [-]  
 $p_{hladina}$  poměrná hodnota plochy jezera při normální úrovni hladiny [-]

Při pohledu na obrázek jezera, lze poměrně snadno vidět jeho obvod do tvaru obdélníka. Totéž ještě lépe platí při pohledu na tvar jezera při snížené hladině o 10 m. Zároveň je možné si všimnout, že vzdálenost vrstevnice pro hloubku 10 m je od břehu ze všech 4 směru přibližně stejně vzdálena. Proto jsem pro výpočet plochy jezera a změnu jeho objemu v závislosti na změně hladiny použil výpočty pro

<sup>101</sup> Milada (jezero) [online] Wikipedia [citováno 9. 4. 2022]

Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Milada\\_\(jezero\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Milada_(jezero))

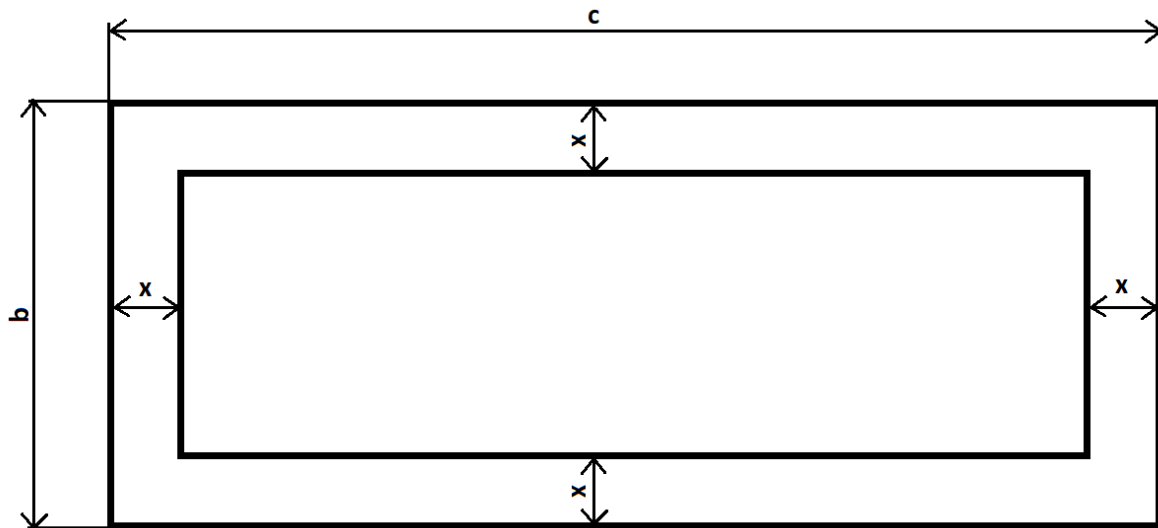
<sup>102</sup> O jezeře [online]. Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 3. 12. 2021]

Dostupné z: <http://www.jezeromilada.cz/o-jezere>

<sup>103</sup> O jezeře [online]. Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 11. 4. 2022]

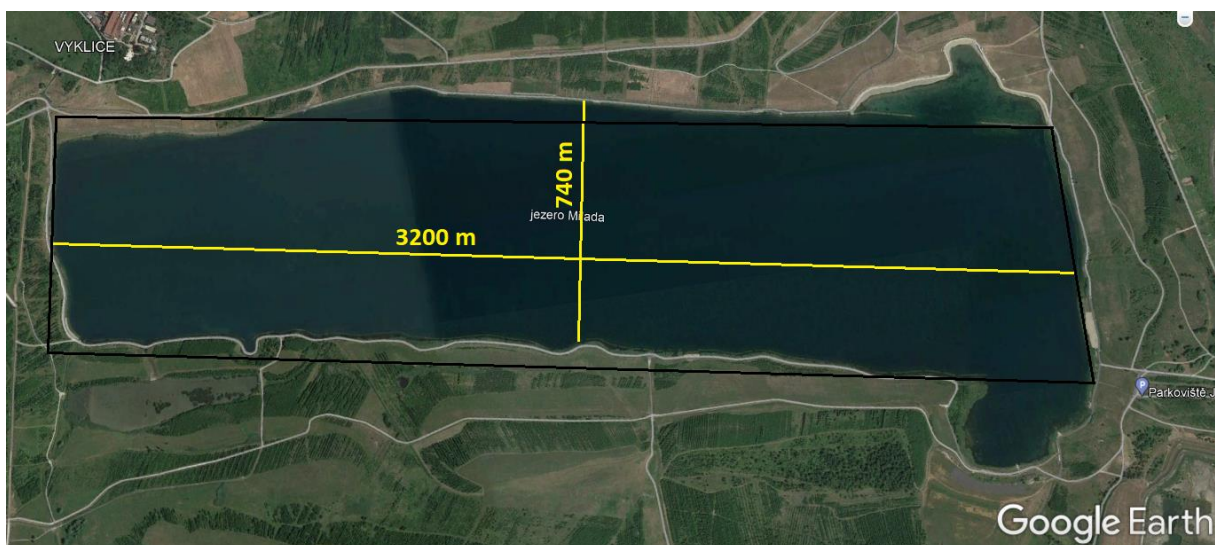
Dostupné z: <http://www.jezeromilada.cz/o-jezere>

obdélník a výpočty pro podobnost obdélníka se změnou délek stran v poměru 1:1. Klesání dna se vzdáleností od břehu předpokládám mezi břehem a hloubkou 10 m lineární.



Obrázek 13: Grafické znázornění práce s obdélníkem. Vytvořeno autorem práce ve Wordu a Malování.

Při určování poklesu hladiny jezera při načerpání pracovního objemu horní nádrže (jak o jednotlivé „nádržky“, tak i o celý pracovní objem), budu i nadále vycházet ze zjednodušení na obdélník. Měřením vzdáleností mezi břehy v softwaru Google Earth jsem zjistil poměr stran obdélníka 320:74. 320 a 74 jsou tedy základním rozměrem v poměrných jednotkách, které při dalším postupu budou užívány.



Obrázek 14: Měření poměru stran naznačeného obdélníka, jezera Milada. Měřeno v Google Earth. Graficky upraveno v Malování.



Poměr stran při poklesu hladiny o 10 m lze určit z poměru ploch jezera při různých stavech hladiny.

$$\frac{A_{\text{hladina}}}{A_{-10\text{m}}} = \frac{b * c}{(c - x) * (b - x)} \quad (\text{R36})$$

Kde: viz obrázek 14

- c poměrná délka delší strany obdélníka při normální úrovni hladiny [-]
- b poměrná délka kratší strany obdélníka při normální úrovni hladiny [-]
- x proměnná vyjadřující zkracování stran s klesající hladinou [-]

Po dosažení:

$$\frac{252}{191} = \frac{320 * 74}{(320 - x) * (74 - x)} \quad (\text{R37})$$

Řešení rovnice je:  $x = 15,2$  a tedy poměrné délky stran obdélníka při poklesu hladiny o 10 m jsou 304,8 a 58,8 poměrných jednotek. Nyní je možné přikročit k určení vzájemné závislosti mezi změnou hladiny a ústupem vody. Pokles hladiny, nebo lépe hloubka za běžného stavu hladiny, je lineárně závislá na vzdálenosti od břehu. Protože díky předchozí rovnici jsou známy dva body této lineární závislosti, je snadné zjistit její rovnici.

$$T = \frac{10 \text{ m} * (x - 320)}{304,8 - 320} \text{ [m]} \quad (\text{R38})$$

Kde: 10 m je hloubka pro kterou známe druhý bod lineární závislosti (prvním je 0 m)  
320; 304,8 jsou poměrné délky delších stran obdélníka na hladině a v hloubce 10 m.

Nyní jsou již k dispozici všechny údaje potřebné k vypočtení objemu vody mezi jakýmkoli dvěma hladinami podle rovnice (R39), pokud se tyto nachází nejvýše do hloubky 10 m.

$$\Delta V = 252 \text{ ha} * \frac{a_1 + a_2}{2} * (h_1 - h_2) \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{R39})$$

Kde: 252 ha vztažná jednotka pro poměrnou plochu  
 $h_1; h_2$  horní a dolní hladina mezi nimiž je zjišťovaný objem [m]  
 $a_1; a_2$  jsou poměrné plochy vztažené při hladinách  $h_1$  a  $h_2$  na standardní rozlohu jezera 252 ha [-]. Výpočet z poměrných délek je následující:

$$s = \frac{b * c}{320 * 74} \quad (\text{R40})$$

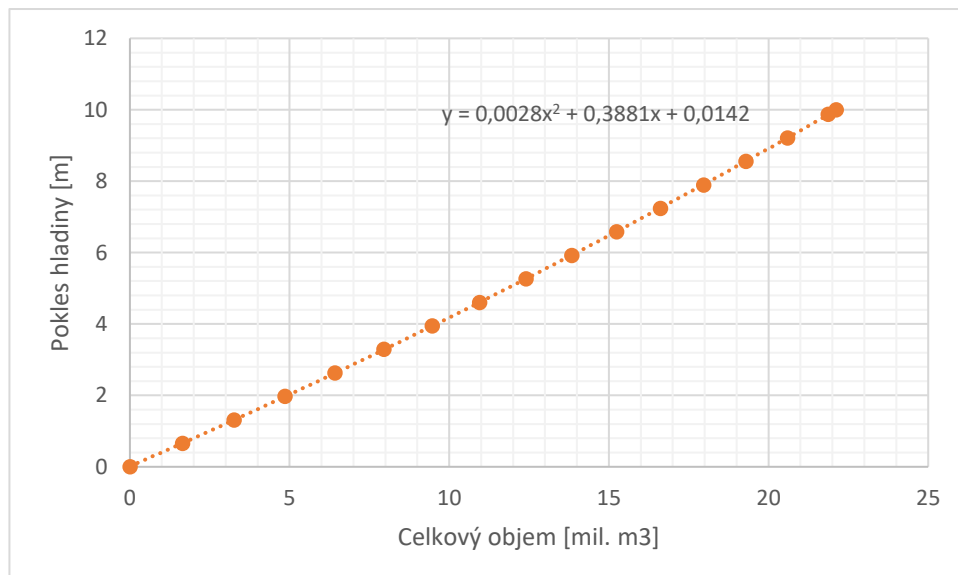
Kde:  $b; c$  poměrné délky stran [-]  
320\*74 je jednotková plocha vyjádřena poměrnými délkami. Tedy plocha jezera při běžné hladině, což znamená 252 ha.

S pomocí vzorců v této podkapitole jsem vytvořil tabulku:

b [-]	c [-]	s [-]	Pokles hladiny [m]	Objem části [mil. m <sup>3</sup> ]	Celkový objem [mil. m <sup>3</sup> ]
74,0	320,0	1,000	0	0	0
73,0	319,0	0,983	0,66	1,65	1,65
72,0	318,0	0,967	1,32	1,62	3,26
71,0	317,0	0,950	1,97	1,59	4,86
70,0	316,0	0,934	2,63	1,56	6,42
69,0	315,0	0,918	3,29	1,54	7,96
68,0	314,0	0,902	3,95	1,51	9,47
67,0	313,0	0,886	4,61	1,48	10,95
66,0	312,0	0,870	5,27	1,46	12,41
65,0	311,0	0,854	5,92	1,43	13,84
64,0	310,0	0,838	6,58	1,40	15,24
63,0	309,0	0,822	7,24	1,38	16,62
62,0	308,0	0,806	7,90	1,35	17,97
61,0	307,0	0,791	8,56	1,33	19,30
60,0	306,0	0,775	9,21	1,30	20,60
59,0	305,0	0,760	9,87	1,27	21,87
58,8	304,8	0,757	10	0,24	22,11

Tabulka 4: Závislost hladiny jezera Milada na objemu vyčerpané vody

Z této tabulky vynesena grafická závislost poklesu hladiny na vyčerpaném objemu (pokles hladiny = f (celkový objem)) je vidět na následujícím grafu. Závislost se dá, jak je vidět, dobře proložit polynomem 2. řádu. Tím je získána funkční závislost mezi objemem vody načerpaným do horní nádrže a poklesem hladiny jezera Milada.



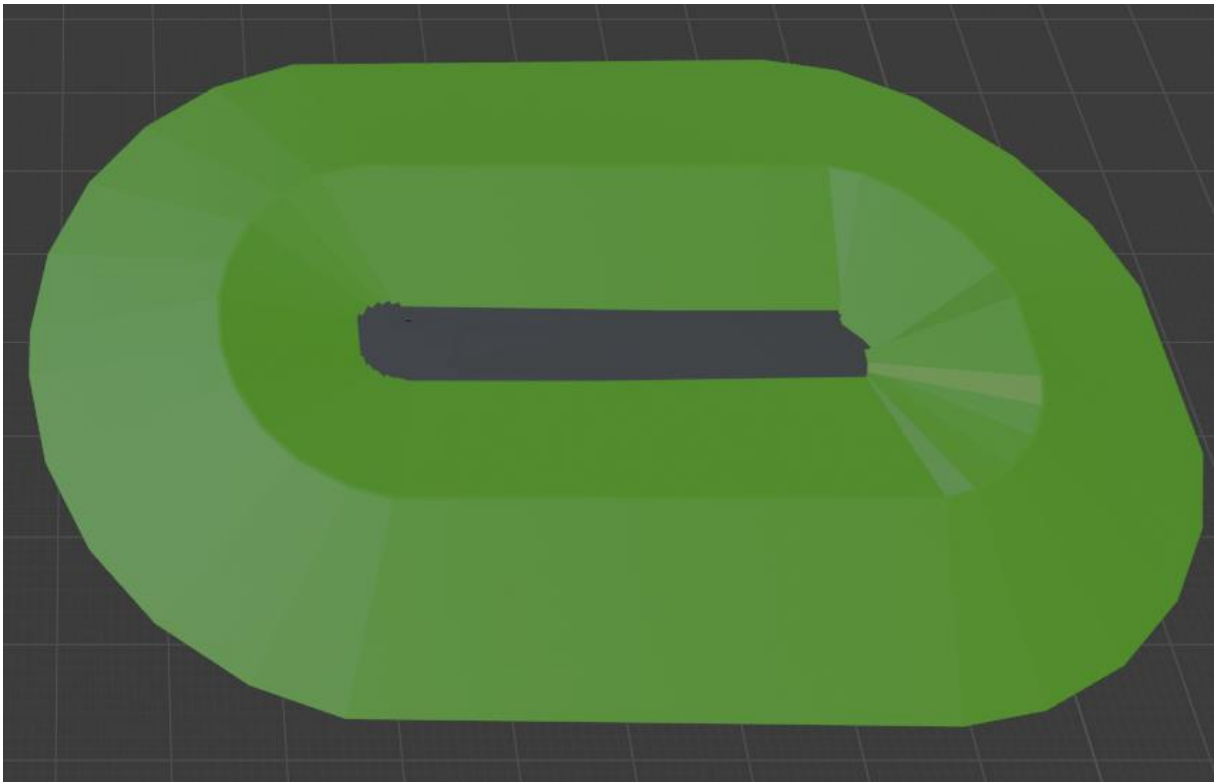
Graf 2: Funkční závislost poklesu hladiny jezera Milada na vyčerpaném objemu vody

### 8.1.2 Varianta 1



Obrázek 15: Model horní nádrže pro varianty 1 a 2 - Umístění v terénu. Pohled ve směru Trmice.

Varianta 1 má největší objem horní nádrže ze všech variant. Oproti obrázku navíc varianta 1 předpokládá prohloubení dna tak, aby byly okraje nádrže tvořeny pouze rovným dnem a svažující se hrází.



Obrázek 16: Horní nádrž pro variantu 1 s prohloubeným dnem.

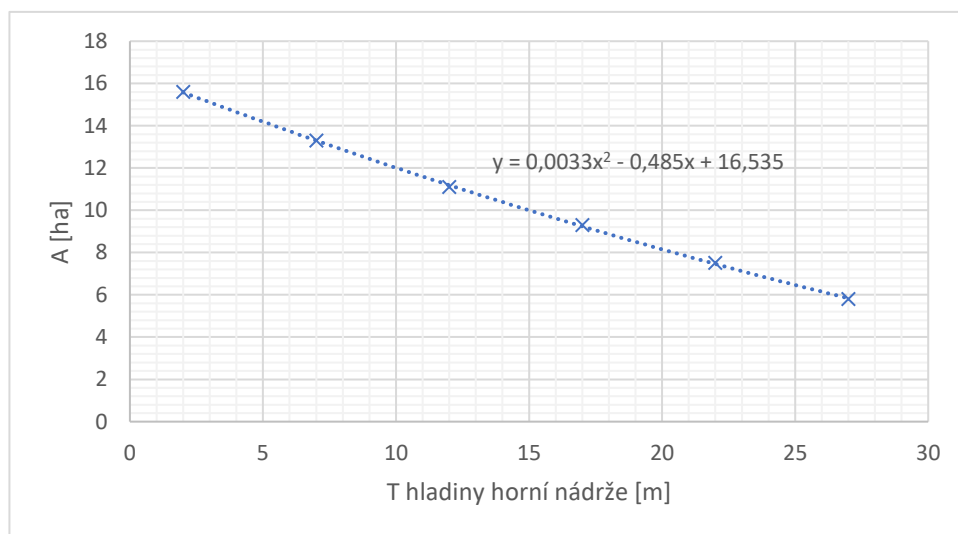
Dno nádrže se nachází 38 m pod vrcholem hráze. Minimální úroveň hladiny v této variantě jsem stanovil na 11 m nad dnem, nebo též 27 m pod úrovní koruny. Koruna hráze se nachází 387,7 m. n. m.

Nyní uvedu tabulku se změřenými a vypočtenými parametry horní nádrže při vybraných úrovních hladiny a velikost akumulované energie při dané úrovni napuštění horní nádrže. Pod tabulkou popíši číselný postup získání hodnot. V příloze 3 se nachází Excelový soubor s provedenými grafy a výpočty.

nadmořská výška hladiny [m]	T hladiny horní nádrže [m]	A [ha]	V [mil. m3]	pokles hladiny dolní nádrže [m]	H [m]	E [MWh]
385,7	2	15,6	2,59	1,04	241,8	1625
380,7	7	13,3	1,87	0,75	236,5	1157
375,7	12	11,1	1,26	0,51	231,3	768
370,7	17	9,3	0,75	0,31	226,1	450
365,7	22	7,5	0,33	0,14	220,9	197
360,7	27	5,8	0,00	0	215,7	0

Tabulka 5: Parametry vodního režimu varianty 1

V odstavci nad tabulkou jsem slíbil postup určení hodnot. Bohužel vlivem potřeby vejít se do terénu nemá hráz horní nádrže pravidelný tvar. Přestože to tak nemusí vypadat, rovné dlouhé strany na severní a jižní straně nejsou stejně dlouhé a oblouky taky nemohu považovat za rovnoměrné. Proto jsem v programu ručně změřil plochu při několika úrovních hladiny tak jak jsou v tabulce. Z těchto bodů jsem vynesl graf závislosti velikosti vodní plochy na výšce hladiny a v něm zjistil, že je možné poměrně přesně změřené body proložit polynomem 2. řádu.



Graf 3: Funkční závislost velikosti vodní plochy na výšce hladiny.

Když tuto závislost dosadím do rovnice (R4) vyjadřující objem horní nádrže, mohu zjistit objem vody v horní nádrži při jakékoli hladině.

$$V = \int_{T_{max}}^{T_{min}} S(T) * dT = \int_{T_{max}}^{T_{min}} (a * T^2 + b * T + c) dT = \left[ \frac{a * T^3}{3} + \frac{b * T^2}{2} + c * T + d \right]_{T_{max}}^{T_{min}} \quad (R41)$$

Kde: a,b,c konstanty získané z rovnice funkční závislosti.  
d integrační konstanta. Zjišťuji pouze tento objem a tedy d=0.

Nejvíc zajímavá je přirozeně plná nádrž, proto ji zde uvedu jako příklad:

$$V = \left[ \frac{0,00329 * T^3}{3} + \frac{-0,485 * T^2}{2} + 1,65 * T + 0 \right]_2^{27} * 10^4 \quad (R42)$$

$$V = \left( \frac{0,00329 * (27 - 2)^3}{3} + \frac{-0,485 * (27 - 2)^2}{2} + 1,65 * (27 - 2) \right) * 10^4 = 2,59 \text{ mil. m}^3$$

Kde:  $10^4$  je převod mezi ha a  $m^2$

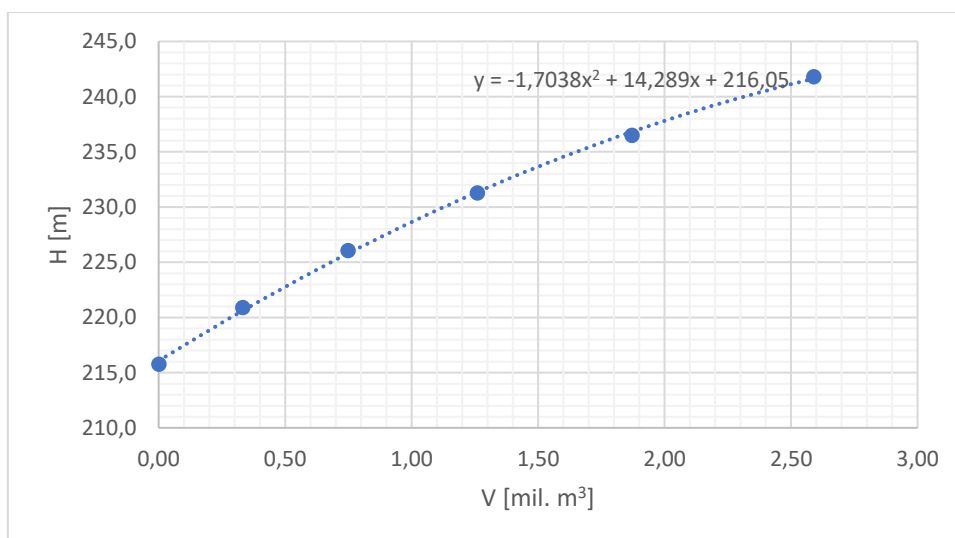
Pokles hladiny jezera Milada jsem rovněž určil dosazením do funkční závislosti. Tentokrát podle rovnice v grafu 3:

$$\text{Pokles hladiny}_{max} = 0,0028 * 2,59^2 + 0,3881 * 2,59 + 0,0142 = 1,04 \text{ m} \quad (R43a)$$

Prostým sčítáním lze zjistit rozdíl hladin mezi nádržemi při různých stavech naplnění horní nádrže.

$$\begin{aligned} & \text{Rozdíl hladin}_{plná horní nádrž} \\ & = \text{nadm. výška horní hladiny} - \text{základní adm. výška dolní hladiny} \quad (R44a) \\ & + \text{pokles hladiny} = 385,7 - 145 + 1,04 = 241,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Nakonec zbývá určit velikost akumulované energie v nádrži. Pro její učení využiji rovnici ( ) z kapitoly 5.3. Je tak opět nejdřív zjistit funkční závislost mezi rozdílem hladin a objemem vody v horní nádrži.



Graf 4: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 1.

Dosazením do rovnice (R3) pro plnou horní nádrž jsem získal maximální množství uchovatelné energie.

$$E = \int_{V_{min}}^{V_{max}} g * \rho * H(V) * dV = g * \rho * \int_{V_{min}}^{V_{max}} (a * V^2 + b * V + c) * dV$$

$$E = g * \rho * \left[ \frac{a * V^3}{3} + \frac{b * V^2}{2} + c * V + d \right]_{V_{min}}^{V_{max}} =$$

$$E = 998 * 9,81 * \left[ \frac{-1,7038 * V^3}{3} + \frac{14,289 * V^2}{2} + 216,05 * V + 0 \right]_0^{2,59} \quad (R45a)$$

$$E = 998 * 9,81 * \left( \frac{-1,7038 * 2,59^3}{3} + \frac{14,289 * 2,59^2}{2} + 216,05 * 2,59 \right)$$

$$E = 5850 \text{ GJ} = 1625 \text{ MWh}$$

### 8.1.3 Varianta 2

Varianta 2 předpokládá totožnou hráz s variantou 1. Na rozdíl od varianty 1 je ve variantě 2 dno ve tvaru původního terénu.

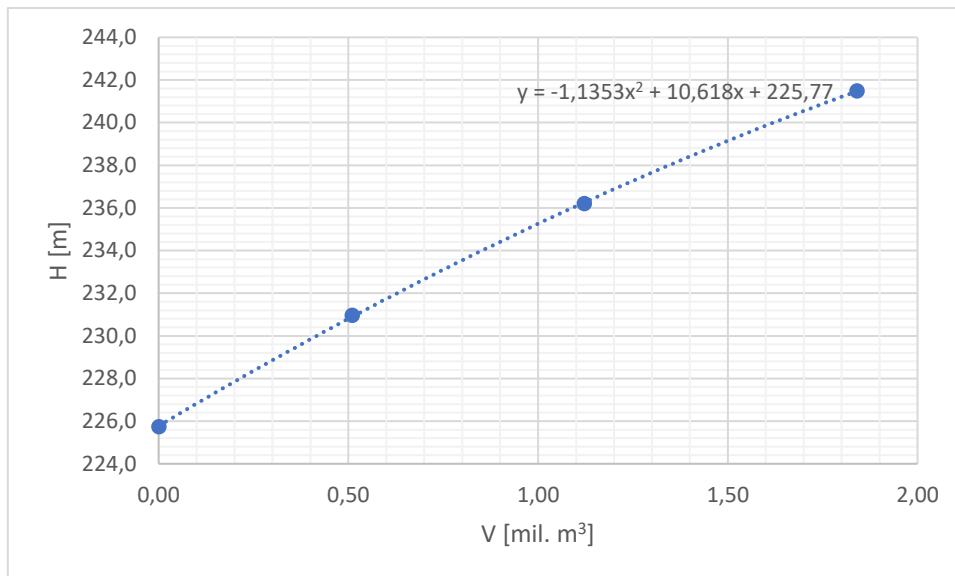
Nejnižší bod nádrže se tak nachází opět 38 m pod úrovní koruny hráze. Minimální úroveň hladiny je kvůli menšímu objemu hráze posunuta na úroveň nejvyššího bodu styku terénu s hrází, tedy 17 m pod korunou. Koruna hráze se nachází 387,7 m. n. m.

Postup získávání hodnot do tabulky je obdobný s variantou 1. Protože se jedná o nádrž totožnou s variantou 1, pro určení objemu využitelné vody v nádrži při určité hladině stačí odečíst od hodnot objemu vody pro variantu 1 v tabulce 5 hodnotu objemu vody ve variantě 1 při hladině na úrovni minimální hladiny ve variantě 2 (370,7 m.n.m.). Tedy stačí odečíst 0,75 mil. m<sup>3</sup>.

nadmořská výška hladiny [m]	T hladiny horní nádrže [m]	A [ha]	V [mil. m3]	pokles hladiny dolní nádrže [m]	H [m]	E [MWh]
385,7	2	15,6	1,84	0,74	241,5	1171
380,7	7	13,3	1,12	0,45	236,2	705
375,7	12	11,1	0,51	0,21	231,0	317
370,7	17	9,3	0,00	0,00	225,7	0

Tabulka 6: Parametry vodního režimu varianty 2

Rozdíl hladin a celková energie vody akumulovaná v horní nádrži jsem už musel zjistit totožným způsobem jako ve variantě 1.



Graf 5: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 2.

Nakonec dosazení do rovnice podle výpočtu.

$$E = 998 * 9,81 * \left[ \frac{-1,1353 * V^3}{3} + \frac{10,618 * V^2}{2} + 225,77 * V + 0 \right]_0^{2,59}$$

$$E = 998 * 9,81 \left( \frac{-1,1353 * 1,84^3}{3} + \frac{10,618 * 1,84^2}{2} + 225,77 * 1,84 \right) \quad (R45b)$$

$$E = 4217 \text{ GJ} = 1171 \text{ MWh}$$

#### 8.1.4 Varianta 3

Třetí varianta se od předchozích dvou liší tvarem a velikostí hráze.



Obrázek 17: Model horní nádrže pro variantu 3 - Umístění v terénu. Pohled ve směru Trmice.

Tato varianta má nižší hráz a díky menší velikosti pouze kruhový půdorys. Není nutné natahovat hráz po hřebeni do oválu. Nejnižší bod nádrže je 22 m pod úrovní koruny hráze. Minimální úroveň hladiny je 13 m pod korunou. Koruna hráze se nachází 378,2 m. n. m.

Nyní uvedu tabulku se změřenými a vypočtenými parametry horní nádrže při vybraných úrovních hladiny a velikost akumulované energie při dané úrovni napuštění horní nádrže. Pod tabulkou popíši číselný postup získání hodnot, který se v části zjišťování objemové kapacity nádrže mírně liší od postupu ve variantě 1 i 2. V příloze se nachází Excelový soubor s provedenými grafy a výpočty.

nadmořská výška hladiny [m]	T hladiny horní nádrže [m]	A [ha]	V [mil. m <sup>3</sup> ]	pokles hladiny dolní nádrže [m]	H [m]	E [MWh]
376,2	2	6,7	0,59	0,24	231,5	362
373,2	5	5,9	0,40	0,17	228,4	243
369,2	9	5	0,18	0,08	224,3	109
365,2	13	4,1	0,00	0,00	220,2	0

Tabulka 7: Parametry vodního režimu varianty 3

V programu Blender jsem nebyl schopen hráz vytvarovat na kruhovém půdorysu. Podobný tvar, který mi Blender umožnil byl pravidelný mnohoúhelník o 24 stranách s délkou 40 m na úrovni koruny hráze. Jako poloměr kruhové plochy jsem použil průměr hodnot poloměrů kružnice opsané a vepsané mnohoúhelníku.

Z konstrukce hráze je známa délka strany mnohoúhelníku na úrovni koruny 40 m. Z této hodnoty jsem určil poloměr kružnice opsané, vepsané a jejich zprůměrováním též poloměr vnitřku nádrže.

$$r_{opsaná} = \frac{s}{2 * \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} [m] \quad (R46)$$

$$r_{vepsaná} = \frac{s}{2 * \tan\left(\frac{\pi}{n}\right)} [m] \quad (R47)$$

$$r_{0m} = \frac{s}{4} * \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} + \frac{1}{\tan\left(\frac{\pi}{n}\right)} \right) = \frac{40}{4} * \left( \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{24}\right)} + \frac{1}{\tan\left(\frac{\pi}{24}\right)} \right) = 152,6 m \quad (R48)$$

Směrem ke dnu nádrže se poloměr vnitřku nádrže zmenšuje. Rychlost tohoto zmenšování je dána sklonem svahu hráze na její návodní straně, který je 1:3. Tedy o 1 m hlouběji je poloměr o 3 m menší.

Na rozdíl od nádrže pro varianty 1 a 2, má vnitřní plocha nádrže pro variantu 3 naprosto pravidelný tvar kužele. Proto lze pro výpočet objemu vody mezi minimální provozní hladinou a zjišťovanou hladinou vody, stejně jako velikost vodní plochy při určité hladině použít vzorce pro komolý kužel.

Zde je příklad pro maximální hladinu, která je ve výšce 2 m pod korunou hráze:

$$r_{2m} = r_{0m} - v * 3 = 152,6 - 2 * 3 = 146,6 \quad (R49)$$

$$A_{2m} = \pi * r_{2m}^2 = \pi * 146,6^2 = 67500 m^2 = 6,75 ha \quad (R50)$$

$$V = \frac{\pi * v}{3} * (r_1^2 + r_1 * r_2 + r_2^2) = \frac{\pi * 11}{3} * (146,6^2 + 146,6 * 113,6 + 113,6^2) = 0,588 mil. m^3 \quad (R51)$$



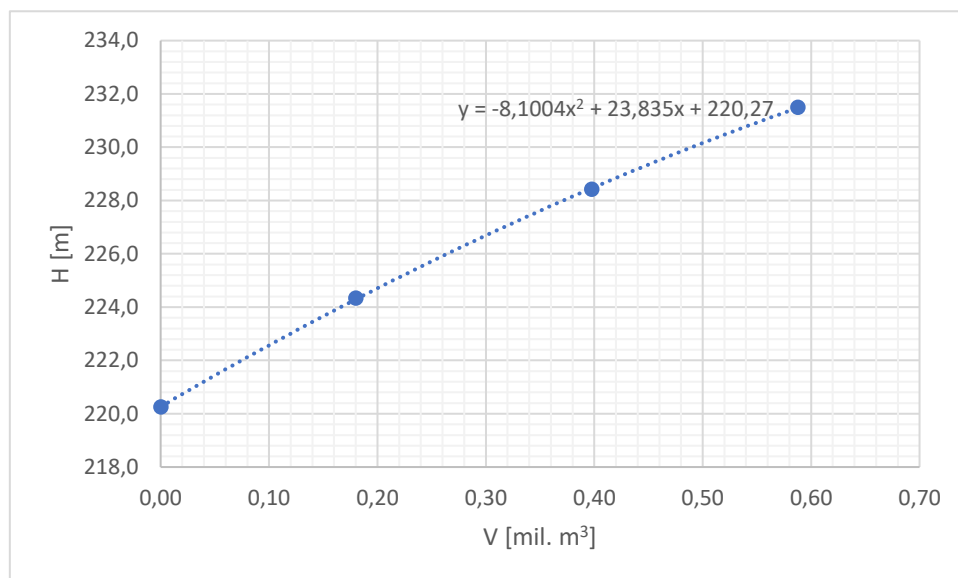
Dále je již postup totožný s postupem ve variantě 1. Pokles hladiny jezera Milada jsem určil dosazením do funkční závislosti z grafu 2:

$$Pokles\ hladiny_{max} = 0,0028 * 0,59^2 + 0,3881 * 0,59 + 0,0142 = 0,24\ m \quad (R43c)$$

Prostým sčítáním lze zjistit rozdíl hladin mezi nádržemi při různých stavech naplnění horní nádrže.

$$\begin{aligned} &Rozdíl\ hladin_{plná\ horní\ nádrž} \\ &= nadm.\ výška\ horní\ hladiny - základní\ nadm.\ výška\ dolní\ hladiny \quad (R44c) \\ &+ pokles\ hladiny = 376,2 - 145 + 0,24 = 231,5\ m \end{aligned}$$

Nakonec zbývá určit velikost akumulované energie v nádrži. Pro její učení využiji rovnici (R3) z kapitoly 5.3. Je tak opět nejdřív zjistit funkční závislost mezi rozdílem hladin a objemem vody v horní nádrži.



Graf 6: Funkční závislost rozdílu výšky mezi hladinami dolní a horní nádrže na objemu vody načerpané do horní nádrže ve variantě 3.

Nakonec dosazení do rovnice (R3) podle výpočtu.

$$\begin{aligned} E &= 998 * 9,81 * \left[ \frac{-1,1353 * V^3}{3} + \frac{10,618 * V^2}{2} + 225,77 * V + 0 \right]_0^{2,59} \\ E &= 998 * 9,81 * \left( \frac{-1,1353 * 1,84^3}{3} + \frac{10,618 * 1,84^2}{2} + 225,77 * 1,84 \right) \\ E &= 4217\ GJ = 1171\ MWh \end{aligned} \quad (R45c)$$

## 8.2 Turbína-čerpadlo

Jak jsem psal ve 2. odstavci této kapitoly, budou turbíny v čerpadlovém režimu při jmenovitém výkonu schopny skrz sebe dostat celý pracovní objem horní nádrže přibližně za 6 hodin. Protože ovšem je turbína svými rozměry stavěná na hltnost v turbínovém režimu (která je větší), upravil jsem výpočet hltnosti na vypuštění celého pracovního objemu horní nádrže skrze turbínu za 5 hodin.

Aby bylo možné použít pro určení parametrů turbín použít teorii podobnosti, je potřeba nejprve určit výchozí turbínu. Jedná se o turbínu TG1 použitou v PVE Dlouhé stráně jejíž základní parametry mi byli laskavě poskytnuty provozovatelem PVE.

Turbínový provoz:

Návrhový výkon: 325 MW  
Návrhová Hltnost: 68,5 m<sup>3</sup>/s  
Průměr oběžného kola: 4,54 m  
Návrhový spád: 510,7 m

Dopočítám účinnost modelové turbíny upravenou rovnicí (R1):

$$\eta_M = \frac{P}{Q * H * g * \rho} = \frac{325 * 10^6}{68,5 * 510,7 * 9,81 * 998} = 94,9 \% \quad (R52)$$

Čerpadlový provoz:

Optimální výkon: 320 MW  
Optimální Hltnost: 55 m<sup>3</sup>/s  
Průměr oběžného kola: 4,54 m  
Spád: 513,1 m

Dopočítám i zde účinnost modelové turbíny v čerpadlovém režimu:

$$\eta_M = \frac{Q * H * g * \rho}{P} = \frac{55 * 513,1 * 9,81 * 998}{320 * 10^6} = 86,3 \% \quad (R53)$$

Zbývá vyřešit velikost spádu, který bude použit na místě veličiny „H<sub>D</sub>“ v podobnostních rovnicích. Dimenzování proběhne na maximální spád, tedy na spád při plně napuštěné horní nádrži.

V turbíně se průchodem vody mění směr proudění vody o 90 °. To bude potřeba v další části o přivaděčích korigovat obloukem a tuto zatáčku budu muset též zahrnout do ztrát.

### 8.2.1 Varianta 1

V této variantě je horní nádrž spojena s Miladou dvojím potrubím, a tedy i turbíny jsou 2. Na základě známého objemu horní nádrže 2,59 milionu m<sup>3</sup> lze na začátek zjistit potřebnou hltnost turbíny v turbínovém režimu:

$$Q_{T,OPT} = \frac{\text{objem nádrže}}{5 \text{ hodin} * \text{počet turbín}} = \frac{2\,590\,000}{5 * 3600 * 2} = 71,9 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (R54a)$$

Kde: Q<sub>T,OPT</sub> optimální průtok turbínou při maximální účinnosti

Spád H<sub>D</sub> je spád při maximální hladině vody v horní nádrži, a tedy je:

$$H_D = 386 - 145 + 1 = 242 \text{ m} \quad (R55a)$$

Kde: 386 m nadmořská výška hladiny plně načerpané horní nádrže  
145 m nadmořská výška hladiny Milady  
1 m pokles hladiny Milady při plném načerpání horní nádrže

Tím je připraven prostor pro využití teorie podobnosti, tak jak je popsána v teoretické části.

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_M) * \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{H_M}{H_D}} = 1 - (1 - 0,949) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{242}} [-] \quad (R56a)$$

$$D_D = D_M * \sqrt[4]{\frac{Q_D}{Q_M}} * \sqrt[4]{\frac{H_M}{H_D}} * \sqrt[4]{\frac{\eta_M}{\eta_D}} = 4,54 * \sqrt[4]{\frac{71,9}{68,5}} * \sqrt[4]{\frac{510,7}{242}} * \sqrt[4]{\frac{0,949}{\eta_D}} [m] \quad (R57a)$$

Řešením rovnic jsou hodnoty průměru oběžného kola D<sub>D</sub> = 5,61 m a účinnosti η<sub>T</sub> = 94,8 %.

Pro čerpání předpokládám ze synchronního stroje dodávku jeho jmenovitého výkonu ve výši 222 MW, tak jak je určen v kapitole 9.4.1. Mohu tak teď vypočítat účinnost turbíny v čerpadlovém režimu a rychlost čerpání vody.

$$\eta_{\check{c}} = 1 - (1 - \eta_M) * \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{H_M}{H_D}} = 1 - (1 - 0,863) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{5,61}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{242}} = 0,860 \quad (R58a)$$

$$Q_{\check{c}} = \frac{P_G * \eta_{\check{c}}}{\rho * g * H} = \frac{222 * 10^6 * 0,860}{998 * 9,81 * 242} = 64,4 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (R59a)$$

### 8.2.2 Varianta 2

V této variantě je horní nádrž spojena s Miladou dvojím potrubím, a tedy i turbíny jsou 2. Na základě známého objemu horní nádrže 1,84 milionu m<sup>3</sup> lze na začátek zjistit potřebnou hltlost turbíny v turbínovém režimu:

$$Q_{T,OPT} = \frac{\text{objem nádrže}}{5 \text{ hodin} * \text{počet turbín}} = \frac{1\,840\,000}{5 * 3600 * 2} = 51,1 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (R54b)$$

Spád H<sub>D</sub> je spád při maximální hladině vody v horní nádrži, a tedy je:

$$H_D = 386 - 145 + 1 = 242 \text{ m} \quad (R55b)$$

Tím je připraven prostor pro využití teorie podobnosti, tak jak je popsána v teoretické části.

$$\eta_{\check{c}} = 1 - (1 - 0,949) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{242}} \quad (R56b)$$

$$D_D = 4,54 * \sqrt[4]{\frac{51,1}{68,5}} * \sqrt[4]{\frac{510,7}{242}} * \sqrt[4]{\frac{0,949}{\eta_{\check{c}}}} \quad (R57b)$$

Řešením rovnic jsou hodnoty průměru oběžného kola D<sub>D</sub> = 4,73 m a účinnosti η<sub>T</sub> = 94,6 %.

Pro čerpání předpokládám ze synchronního stroje dodávku jeho jmenovitého výkonu ve výši 126 MW, tak jak je určen v kapitole 9.4.2. Mohu tak teď vypočítat účinnost turbíny v čerpadlovém režimu a rychlost čerpání vody.

$$\eta_{\check{c}} = 1 - (1 - \eta_M) * \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{H_M}{H_D}} = 1 - (1 - 0,863) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{4,73}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{242}} = 0,854 \quad (R58b)$$

$$Q_{\check{c}} = \frac{P_G * \eta_{\check{c}}}{\rho * g * H} = \frac{126 * 10^6 * 0,854}{998 * 9,81 * 242} = 45,3 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (R59b)$$

### 8.2.3 Varianta 3

Na rozdíl od varianty 1 a 2 obsahuje tato varianta pouze jednu sadu potrubí a strojů. Na základě známého objemu horní nádrže 0,59 milionu m<sup>3</sup> lze na začátek zjistit potřebnou hltlost turbíny v turbínovém režimu:

$$Q_{T,OPT} = \frac{\text{objem nádrže}}{5 \text{ hodin}} = \frac{590\,000}{4 * 3600} = 32,7 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (R54c)$$

Spád  $H_D$  je spád při maximální hladině vody v horní nádrži, a tedy je:

$$H_D = 376 - 145 + 0 = 231 \text{ m} \quad (\text{R55c})$$

Tím je připraven prostor pro využití teorie podobnosti, tak jak je popsána v teoretické části.

$$\eta_{\zeta} = 1 - (1 - 0,949) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{231}} \quad [-] \quad (\text{R56c})$$

$$D_D = 4,54 * \sqrt[4]{\frac{32,7}{68,5}} * \sqrt[4]{\frac{510,7}{231}} * \sqrt[4]{\frac{0,949}{\eta_{\zeta}}} \quad [\text{m}] \quad (\text{R57c})$$

Řešením rovnic jsou hodnoty průměru oběžného kola  $D_D = 3,83 \text{ m}$  a účinnosti  $\eta_T = 94,2 \%$ .

Pro čerpání předpokládám ze synchronního stroje dodávku jeho jmenovitého výkonu ve výši 76 MW, tak jak je určen v kapitole 9.4.2. Mohu tak teď vypočítat účinnost turbíny v čerpadlovém režimu a rychlost čerpání vody.

$$\eta_{\zeta} = 1 - (1 - \eta_M) * \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} * \sqrt[10]{\frac{H_M}{H_D}} = 1 - (1 - 0,863) * \sqrt[4]{\frac{4,54}{3,83}} * \sqrt[10]{\frac{510,7}{231}} = 0,845 \quad (\text{R58c})$$

$$Q_{\zeta} = \frac{P_G * \eta_{\zeta}}{\rho * g * H} = \frac{76 * 10^6 * 0,845}{998 * 9,81 * 231} = 28,4 \text{ m}^3 * \text{s}^{-1} \quad (\text{R59c})$$

### 8.3 Přivaděče

Předpokládané přivaděče vody k turbíně budou kruhového průřezu. Přivaděče se dělí na část před turbínou a na část za turbínou. Obě tyto části budou mít shodné parametry, jedná se primárně o materiálové konstanty a průměr přivaděče. Průměr potrubí určím tak, že bude shodný s průměrem oběžného kola z předchozí části o turbínách.

Co se trasy přivaděčů týče, bude část mezi turbínou a jezerem Milada pro všechny 3 varianty totožná (samozřejmě s tím rozdílem, že ve variantě 1 a 2 jsou potrubí 2 vedle sebe). Trasa potrubí mezi turbínou a horní nádrží se bude lišit, protože umístění nádrží je rozdílné. Varianty 1 a 2 tak budou mít trasu potrubí totožnou, potrubí bude vycházet ze západní části nádrže, které jsou jak ve variantě 1, tak i ve variantě 2 blízko nejhlubších míst.

Společné ústí přivaděčů všech tří variant do jezera Milada je přibližně v hloubce 15 m.

Potrubí uvažuji betonová. To znamená absolutní drsnost v rozmezí 0,15 – 0,5 mm při zprovoznění a 1 – 3 mm po opotřebení<sup>104</sup>. Provedu výpočty pro nové přivaděče (nejhorší varianta: drsnost 0,5 mm) a pro přivaděče opotřebované (průměrná varianta: 2 mm). Vyhodnotím též vliv teploty vody, a to od bodu mrazu do teploty 20 °C.

Data o hodnotách dynamické viskozity jsou přebrány z:<sup>105</sup>

<sup>104</sup> Tlaková ztráta v trubce [online] eStránky.cz [citováno 16. 4. 2022]

Dostupné z: <https://www.ipotrubi.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/2.-tlakova-ztrata-v-trubce.html>, tabulka Hydraulické drsnosti pro technicky vyráběná potrubí (dole na stránce)

<sup>105</sup> Water - Dynamic (Absolute) and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure [online] Engineering ToolBox [citováno 18. 4. 2022]

### 8.3.1 Varianta 1

Potrubí v této variantě je rozděleno na 3 části, které jsou rovné. Ve směru od horní nádrže do Milady se jedná o tyto úseky:

- 1) Úsek v délce 780 m. Klesání se sklonem 15 °.
- 2) Úsek v délce 990 m. Klesání se sklonem 2 °.
- 3) Turbína
- 4) Úsek v délce 380 m. Stoupání se sklonem 1°.

To znamená, že je potřeba určit ztráty třením po délce 2150 m. K tomu se po cestě nachází dva vtoky (výtoky), jeden ohyb mezi úsekem 1 a 2 a ohyb mezi turbínou a úsekem 3.

Průměr potrubí kruhového průřezu je 5,61 m.

Nejprve k nejtěžší, nejdelší a velikostí hodnot ztrát nejvýznamnější části, ztrátám třením. Přestože výpočet provedu pro vícero teplot vody a pro různé stupně opotřebení, bude zde dosažení provedeno pouze pro jeden případ (nové potrubí, teplota vody 20 °C). Výsledky jsou uvedeny níže v tabulce. Výpočtový soubor je v příloze 3.

$$v = \frac{Q_T * 4}{D_D^2} = \frac{71,9 * 4}{5,61^2} = 2,91 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (\text{R60a})$$

$$Re = \frac{v * D}{\tau} = \frac{2,91 * 5,61}{1,00 * 10^{-6}} = 1,63 * 10^7 \quad (\text{R61})$$

Podle předpokladů je tak proudění v přivaděčích turbulentní a pro výpočet součinitele tření tak využiji rovnici, která obsahuje součinitel tření na obou stranách. Cílem tedy je, aby součinitel tření využitý pro výpočet a součinitel tření vypočtený byli totožné.

$$\lambda = \left[ -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7 * D} \right) \right]^{-2} = \left[ -2 * \log \left( \frac{2,51}{1,63 * 10^7 * \sqrt{0,0118}} + \frac{0,0005}{3,7 * 5,61} \right) \right]^{-2} = 0,0118 \quad (\text{R62})$$

Podle rovnice (R6) z kapitoly 6.1 dopočítám třením ztracený spád:

$$h_{zT} = \lambda * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2 * g} = 0,0118 * \frac{2150}{5,61} * \frac{2,91^2}{2 * 9,81} = 1,96 \text{ m} \quad (\text{R63})$$

$\Delta$ [mm]	Teplota [°C]	20	15	10	5	0
0,5	$\lambda$ [-]	0,0118	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119
	$h_{zT}$ [m]	1,96	1,96	1,97	1,97	1,98
2	$\lambda$ [-]	0,0155	0,0155	0,0156	0,0156	0,0156
	$h_{zT}$ [m]	2,57	2,57	2,58	2,58	2,58

Tabulka 8: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 1 v závislosti na teplotě vody a drsnosti betonové trubky.

Pohledem do tabulky lze říct, že vliv teploty vody na ztrátu třením je minimální. Proto nebudu vliv teploty v dalších variantách počítat. Totéž se nedá říci o vlivu drsnosti stěny trubky. Uvažované zvýšení drsnosti trubky vlivem opotřebení, zvýší ztrátu třením přibližně o 30 %.

Ztráty vtokem a výtokem závisí na tvaru vtoku a výtoku. U obou předpokládám ostrou hranu mezi stěnou hráze a potrubím (podle tabulky 2 u vtoku 2. tvar a u výtoku 1. tvar). Ztrátové činitele jsou tak podle tabulky 0,5 respektive 1,1.

Ztrátová výška způsobená vtokem a výtokem je podle rovnice (R13):

$$h_{zVV} = \xi_V * \frac{v^2}{2 * g} = (0,5 + 1,1) * \frac{2,91^2}{2 * 9,81} = 0,691 \text{ m} \quad (\text{R64a})$$

Zbývá vyřešit ztráty v ohybu. Změnu směru mezi úsekem 1 a 2 je o 15 °. Za turbínou je potřeba znovu nabrat původní směr poté co byl turbínou změněn o 90 °, tedy zpět o 90 °.

Pro určení ztrátového činitele pomocí tabulky 3, je potřeba určit parametr  $r_s$  (jak je vyznačen na obrázku 7) a relativní drsnost potrubí. Parametr  $r_s$  bude pro oba ohyby rozlišný. 15stupňový ohyb budiž proveden při poměru  $r_s/D$  roven 4. Tedy  $r_s = 22,44 \text{ m}$ . Při ohybu u turbíny není zdaleka tolik prostoru, a proto tento ohyb bude mít poměr  $r_s/D$  roven 1. Tedy  $r_s = 5,61 \text{ m}$ .

Relativní drsnost je pro nové betonové potrubí:

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0,0005}{7} = 7,14 * 10^{-5} \quad (\text{R65})$$

A pro starší potrubí:

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0,002}{7} = 2,86 * 10^{-4} \quad (\text{R66})$$

Tyto výsledky znamenají, že pro určení ztrátového činitele bude pro nové i opotřebované potrubí použit první řádek tabulky 3.

Ztrátové činitele jsou následující:

Pro ohyb mezi úsekem 1 a 2:

$$\xi_{O1} = \xi_{SH90} * \frac{\delta}{90^\circ} = 0,11 * \frac{13}{90} = 0,0159 \quad (\text{R67})$$

Pro ohyb mezi turbínou a úsekem 4:

$$\xi_{O2} = \xi_{SH90} = 0,210 \quad (\text{R68})$$

Ztrátová výška způsobená ohybem tedy je:

$$h_{zO} = \xi_O * \frac{v^2}{2 * g} = (0,210 + 0,016) * \frac{2,91^2}{2 * 9,81} = 0,097 \text{ m} \quad (\text{R69})$$

Ztráty ohybem jsou tak oproti ztrátám vtokem a výtokem, a hlavně vůči ztrátám třením zanedbatelné. Vzhledem k hodnotám, jakých může podle tabulky 2 tento druh ztráty nabývat ztrátami v ohybu nebudu dále zabývat.

Ztráty energie v přivaděčích tak upravují velikost užitého spádu, který lze využít v turbíně následovně:

Pro nové potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 1,96 + 0,69 = 2,65 \text{ m} \quad (\text{R70a})$$

$$\text{Užitný spád} = H - h_z = 242 - 2,7 = 239,3 \text{ m} \quad (\text{R71a})$$

Pro již opotřebované potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 2,57 + 0,69 = 3,26 \text{ m} \quad (\text{R72a})$$

$$Užitný \text{ spád} = H - h_z = 242 - 3,3 = 238,7 \text{ m} \quad (\text{R73a})$$

V rámci výpočtu účinnosti lze určit účinnost přivaděčů následovně:

Pro nové potrubí:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{2,7}{242} = 0,989 \quad (\text{R74a})$$

A respektive pro potrubí opotřebované:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{3,3}{242} = 0,987 \quad (\text{R75a})$$

### 8.3.2 Varianta 2

Trasa přivaděčů v této variantě je totožná s variantou 1. Průměr kruhového potrubí v této variantě je 4,73 m.

$$v = \frac{Q_T * 4}{D_D^2} = \frac{51,1 * 4}{4,73^2} = 2,91 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (\text{R60b})$$

Postup výpočtu je totožný jako ve variantě 1. Soubor s výpočty je v příloze 3.

$\Delta$ [mm]	Teplota [°C]	20
0,5	$\lambda$ [-]	0,0122
	$h_{zT}$ [m]	2,40
2	$\lambda$ [-]	0,0161
	$h_{zT}$ [m]	3,16

Tabulka 9: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 2 v závislosti na drsnosti betonové trubky.

Ztrátové činitele vtoku a výtoku nejsou závislé na průřezu, a proto stačí dopočítat pouze ztracený spád.

$$h_{zVV} = \xi_V * \frac{v^2}{2 * g} = (0,5 + 1,1) * \frac{2,91^2}{2 * 9,81} = 0,689 \text{ m} \quad (\text{R64b})$$

Celkově ztracený spád tak je:

Pro nové potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 2,40 + 0,69 = 3,09 \text{ m} \quad (\text{R70b})$$

$$Užitný \text{ spád} = H - h_z = 242 - 3,1 = 239,9 \text{ m} \quad (\text{R71b})$$

Pro již opotřebované potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 3,16 + 0,69 = 3,85 \text{ m} \quad (\text{R72b})$$

$$Užitný \text{ spád} = H - h_z = 242 - 3,9 = 239,5 \text{ m} \quad (\text{R73b})$$

V rámci výpočtu účinnosti lze určit účinnost přivaděčů následovně:

Pro nové potrubí:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{3,1}{242} = 0,987 \quad (\text{R74b})$$

A respektive pro potrubí opotřebované:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{3,9}{242} = 0,984 \quad (\text{R75b})$$

### 8.3.3 Varianta 3

Ve variantě 3 je jiné umístění hráze než ve variantách 1 a 2. Proto také přivaděče od horní nádrže k turbíně vedou jinou trasou. Přesto jsou parametry pro výpočet ztrát velmi podobné. Trasa je složena z následujících úseků:

- 1) Úsek v délce 790 m. Klesání se sklonem 15 °.
- 2) Úsek v délce 980 m. Klesání se sklonem 2 °.
- 3) Turbína
- 4) Úsek v délce 380 m. Stoupání se sklonem 1 °

Celková délka potrubí je opět 2150 m. Ohyby po cestě totožné. I v postupu výpočtu se tak změní pouze jeden vstupní parametr, kterým je průměr potrubí. Průměr kruhového potrubí v této variantě jsou 3,83 m.

$$v = \frac{Q_T * 4}{D_D^2} = \frac{32,7 * 4}{3,83^2} = 2,84 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (\text{R60c})$$

Postup výpočtu je totožný jako ve variantě 1. Soubor s výpočty je v příloze 3.

$\Delta$ [mm]	Teplota [°C]	20
0,5	$\lambda$ [-]	0,0128
	$h_{zT}$ [m]	2,94
2	$\lambda$ [-]	0,0169
	$h_{zT}$ [m]	3,89

Tabulka 10: činitel tření a ztrátová výška potrubí ve variantě 3 v závislosti na drsnosti betonové trubky.

Ztrátové činitele vtoku a výtoku nejsou závislé na průřezu, a proto stačí dopočítat pouze ztracený spád.

$$h_{zVV} = \xi_V * \frac{v^2}{2 * g} = (0,5 + 1,1) * \frac{2,84^2}{2 * 9,81} = 0,656 \text{ m} \quad (\text{R64c})$$

Celkově ztracený spád tak je:

Pro nové potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 2,94 + 0,66 = 3,59 \text{ m} \quad (\text{R70c})$$

$$Užitný \text{ spád} = H - h_z = 231 - 3,6 = 227,4 \text{ m} \quad (\text{R71c})$$

Pro již opotřebované potrubí:

$$h_z = h_{zT} + h_{zVV} = 3,89 + 0,66 = 4,55 \text{ m} \quad (\text{R72c})$$

$$Užitný \text{ spád} = H - h_z = 231 - 4,6 = 226,4 \text{ m} \quad (\text{R73c})$$



V rámci výpočtu účinnosti lze určit účinnost přivaděčů následovně:  
Pro nové potrubí:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{3,6}{231} = 0,984 \quad (\text{R74c})$$

A respektive pro potrubí opotřebované:

$$\eta_P = 1 - \frac{h_z}{H} = 1 - \frac{4,6}{231} = 0,980 \quad (\text{R75c})$$

#### 8.4 Generátor-Motor

Při hledání vhodného typu synchronního stroje je primárně třeba vycházet z požadovaného výkonu soustrojí. Požadovaný výkon stroje bude určen snadno. Na základě spádu upraveného o ztráty v přivaděči, tak jak byl vypočten v předchozí části o přivaděčích a předpokládaného průtoku, tak jak byl určen v části o turbíně.

Výrobci, kteří vyrábějí synchronní stroje potřebné velikosti a zároveň uvádějí údaje o účinnosti svých strojů není mnoho. Jedním z výrobců, které tyto údaje alespoň částečně poskytuje je Siemens Energy<sup>106</sup>. Tato firma o svých strojích píše: Synchronní stroje s výkonovým rozsahem od 25 MVA do 180 MVA mají účinnost až 98,5 %. Stroje s výkonem od 180 MVA do 370 MVA mají účinnost až 98,9 %. Tak jako i u jiných strojů i v těchto případech lze důvodně předpokládat, že uvedené účinnosti odpovídají účinnostem nejvýkonnějším strojům ze skupiny. Napěťové hladiny těchto strojů jsou od 6,3 do 15,75 kV. Větší stroje než 370 MVA z řady nabízené Siemensem nabízejí již pouze zvýšení účinnosti na 99 %<sup>107</sup>.

Obě skupiny strojů mají předpokládaný účinník 0,8. S tím budu počítat i při výpočtu níže v jednotlivých variantách. Obě skupiny strojů tak budu uvažovat pro výkonové rozsahy od 20 MW do 150 MW, respektive od 150 MW do 296 MW.

Účinnost strojů budu aproximovat pomocí přímky ze dvou známých bodů, jak jsou zmíněny výše. Účinnost 98,5 % pro 150 MW a 98,9 % pro 296 MW.

$$\eta_G = P_G \frac{0,004}{146} + 0,9809 [-] \quad (\text{R76})$$

Kde: PG činný výkon generátoru při účinníku 0,8 [MW]

Konstanty jsou dány rovnicí přímky protínající body 0,985 = f (150 MW) a 0,989 = f (296 MW)

Protože nabídková řada Siemensu je výjimečná už tím, že dává o sobě k dispozici alespoň nějaké údaje o účinnosti, není pro potřeby této práce dokonalá. Jedná se o rychloběžné stroje, jak se kdokoli může přesvědčit pohledem na obrázek stroje na stránkách výrobce, nebo dokonce pohledem na název jedné série ze skupiny (SGEN-100A-2P SERIES)<sup>108</sup>. Francisovy turbíny použité v této práci

<sup>106</sup> SGen-100A/SGen-1000A generator series [online] Siemens Energy [citováno 20. 4. 2022]

Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-100a.html>

<sup>107</sup> SGen-2000P generator series [online] Siemens Energy [citováno 21. 4. 2022]

Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-2000p.html>

<sup>108</sup> SGen-100A/SGen-1000A generator series [online] Siemens Energy [citováno 20. 4. 2022]

Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-100a.html>

v podkapitole 8.2 nemají zdaleka takové otáčky. Nicméně nevidím důvod předpokládat, že vícepólové stroje, které jsou vhodnější pro tuto aplikaci by měli nižší účinnost než turbostroje od Siemensu.

#### 8.4.1 Varianta 1

Tato varianta má po odečtení ztrát v přivaděčích spád 239 m, a účinnost turbíny 94,8 % při optimálním průtoku 71,9 m<sup>3</sup>/s. Optimální průtok odpovídá 90 % maximálního průtoku turbínou na který musí být synchronní stroj přirozeně též navrhnout. Podle rovnice (R28) tak určím výkon stroje:

$$P_G = \text{Užitný spád} * Q_T * \rho * g * \eta_T = 239 * \frac{71,9}{0,9} * 998 * 9,81 * 0,948 = 178 \text{ MW} \quad (\text{R77a})$$

Při tomto výkonu na základě rovnice ze začátku této kapitoly určím účinnost.

$$\eta_G = P_G \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 178 * \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 0,986 \quad (\text{R78a})$$

Ve variantě 1 tak budu dále počítat s účinností generátoru (a případně motoru) ve výši 98,6 %.

#### 8.4.2 Varianta 2

Tato varianta má po odečtení ztrát v přivaděčích spád 239 m, a účinnost turbíny 94,6 % při optimálním průtoku 51,1 m<sup>3</sup>/s. Optimální průtok odpovídá 90 % maximálního průtoku turbínou na který musí být synchronní stroj přirozeně též navrhnout. Podle rovnice (R28) tak určím výkon stroje:

$$P_G = \text{Užitný spád} * Q_T * \rho * g * \eta_T = 239 * \frac{51,1}{0,9} * 998 * 9,81 * 0,946 = 126 \text{ MW} \quad (\text{R77b})$$

Při tomto výkonu na základě rovnice ze začátku této kapitoly určím účinnost.

$$\eta_G = P_G \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 126 * \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 0,984 \quad (\text{R78b})$$

Ve variantě 2 tak budu dále počítat s účinností generátoru (a případně motoru) ve výši 98,4 %.

#### 8.4.3 Varianta 3

Tato varianta má po odečtení ztrát v přivaděčích spád 227 m, a účinnost turbíny 94,9 % při optimálním průtoku 32,7 m<sup>3</sup>/s. Optimální průtok odpovídá 90 % maximálního průtoku turbínou na který musí být synchronní stroj přirozeně též navrhnout. Podle rovnice (R28) tak určím výkon stroje:

$$P_G = \text{Užitný spád} * Q_T * \rho * g * \eta_T = 227 * \frac{32,7}{0,9} * 998 * 9,81 * 0,949 = 76 \text{ MW} \quad (\text{R77c})$$

Při tomto výkonu na základě rovnice ze začátku této kapitoly určím účinnost.

$$\eta_G = P_G \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 76 * \frac{0,004}{146} + 0,9809 = 0,983 \quad (\text{R78c})$$

Ve variantě 3 tak budu dále počítat s účinností generátoru (a případně motoru) ve výši 98,3 %.

## 8.5 Transformátor

Transformátory pro jednotlivé varianty jsem vybral z nabídky čínského výrobce transformátorů Daelim, který na svých stránkách inzeruje své transformátory v přehledné tabulce se všemi základními údaji<sup>109</sup>.

Zdánlivý výkon [kVA]	Primární napětí [kV]	Sekund. napětí [kV]	Zapojení	Napětí nakrátko [%]	Ztráty [W]		Proud naprázdno [%]
					Naprázdko	jmenovité	
31500	220 242	6.3 6.6 10.5 11 20, 34.5 35, 37, 69	YNd11	12~14	28000	128000	0.7
40000					33000	149000	0.7
50000					39000	180000	0.65
63000					46000	209000	0.65
75000					54000	238000	0.6
90000					62000	274000	0.55
120000					75000	328000	0.55
150000					90000	395000	0.5
160000					94900	404000	0.49
180000					102000	436000	0.46
240000					128000	539000	0.42

Tabulka 11: Technická data pro 220 kV dvouvinuťové transformátory. Převzato<sup>110</sup>. Přeloženo autorem.

V tabulce lze na pohled vidět, že tato řada transformátorů dostačuje výkonově všem třem vytvořeným variantám a že napěťový rozsah sekundární strany transformátoru odpovídá běžným napětím velkých generátorů (od 6 do 15 kV).

Abych mohl vybrat správnou velikost transformátoru je potřeba určit potřebný zdánlivý výkon. Ten jsem zjistil ze známých hodnot činného výkonu generátorů z části 8.4 a účinníku 0,8 při kterém vybrané stroje pracují.

Každý generátor má svůj vlastní blokový transformátor.

### 8.5.1 Varianta 1

Plně pracující generátor (motor) vyžaduje protáhnout přes transformátor 150 MW činného výkonu. Potřebný zdánlivý výkon tak je:

$$S_{min} = \frac{P_G}{\cos(\varphi_G)} = \frac{178}{0,8} = 222 \text{ MVA} \quad (\text{R79a})$$

Výběr tak padl na největší z transformátorů v tabulce, transformátor s výkonem 240 MVA.

<sup>109</sup> Daelim-Transformer-Product-Catalog [online] Daelim Belefic [citováno 24. 4. 2022]

Dostupné z: <https://daelim-electric.com/wp-content/uploads/2021/07/Daelim-Transformer-Product-Catalog.pdf>, strana 14

<sup>110</sup> Daelim-Transformer-Product-Catalog [online] Daelim Belefic [citováno 24. 4. 2022]

Dostupné z: <https://daelim-electric.com/wp-content/uploads/2021/07/Daelim-Transformer-Product-Catalog.pdf>, strana 14

Výrobce v tabulce poskytuje údaj o ztrátách naprázdno (128 kW) a údaj o ztrátách při jmenovitém výkonu (539 kW). Z těchto údajů lze prostým odečtem dopočítat ztráty nakrátko a poté již i účinnost v závislosti na zatížení podle rovnice (R31).

$$\Delta P_k = \Delta P_N - \Delta P_0 = 539 - 128 = 411 \text{ kW} \quad (\text{R80a})$$

Kde:  $\Delta P_k$  ztráty nakrátko [kW]  
 $\Delta P_N$  ztráty při jmenovitém zatížení [kW]  
 $\Delta P_0$  ztráty naprázdno [kW]

Ztráty při zatížení 187,5 MVA:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k * \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 = 128 + 411 * \left(\frac{222}{240}\right)^2 = 479 \text{ kW} \quad (\text{R81a})$$

Účinnost transformátoru při plném výkonu bloku tak je:

$$\eta_{trafo} = 1 - \frac{\Delta P}{P_G} = 1 - \frac{0,479}{178} = 0,997 \quad (\text{R82a})$$

### 8.5.2 Varianta 2

Plně pracující generátor (motor) vyžaduje protáhnout přes transformátor 107 MW činného výkonu. Potřebný zdánlivý výkon tak je:

$$S_{min} = \frac{P_G}{\cos(\varphi_G)} = \frac{126}{0,8} = 157 \text{ MVA} \quad (\text{R79b})$$

Výběr tak padl na transformátor o výkonu 160 MVA.

Výrobce v tabulce poskytuje údaj o ztrátách naprázdno (94,9 kW) a údaj o ztrátách při jmenovitém výkonu (404 kW). Z těchto údajů lze prostým odečtem dopočítat ztráty nakrátko a poté již i účinnost v závislosti na zatížení podle rovnice (R31).

$$\Delta P_k = \Delta P_N - \Delta P_0 = 404 - 94,9 = 309,1 \text{ kW} \quad (\text{R80b})$$

Kde:  $\Delta P_k$  ztráty nakrátko [kW]  
 $\Delta P_N$  ztráty při jmenovitém zatížení [kW]  
 $\Delta P_0$  ztráty naprázdno [kW]

Ztráty při zatížení 180 MVA:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k * \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 = 94,9 + 309,1 * \left(\frac{157}{160}\right)^2 = 393 \text{ kW} \quad (\text{R81b})$$

Účinnost transformátoru při plném výkonu bloku tak je:

$$\eta_{trafo} = 1 - \frac{\Delta P}{P_G} = 1 - \frac{0,393}{126} = 0,997 \quad (\text{R82b})$$

### 8.5.3 Varianta 3

Plně pracující generátor (motor) vyžaduje protáhnout přes transformátor 76 MW činného výkonu. Potřebný zdánlivý výkon tak je:

$$S_{min} = \frac{P_G}{\cos(\varphi_G)} = \frac{76}{0,8} = 95 \text{ MVA} \quad (\text{R79c})$$

Výběr tak padl na transformátor o výkonu 120 MVA.

Výrobce v tabulce poskytuje údaj o ztrátách naprázdno (75 kW) a údaj o ztrátách při jmenovitém výkonu (328 kW). Z těchto údajů lze prostým odečtem dopočítat ztráty nakrátko a poté již i účinnost v závislosti na zatížení podle rovnice (R31).

$$\Delta P_k = \Delta P_N - \Delta P_0 = 328 - 75 = 253 \text{ kW} \quad (\text{R80c})$$

Kde:  $\Delta P_k$  ztráty nakrátko [kW]  
 $\Delta P_N$  ztráty při jmenovitém zatížení [kW]  
 $\Delta P_0$  ztráty naprázdno [kW]

Ztráty při zatížení 180 MVA:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k * \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 = 75 + 253 * \left(\frac{95}{120}\right)^2 = 234 \text{ kW} \quad (\text{R81c})$$

Účinnost transformátoru při plném výkonu bloku tak je:

$$\eta_{trafo} = 1 - \frac{\Delta P}{P_G} = 1 - \frac{0,234}{76} = 0,997 \quad (\text{R82c})$$

## 8.6 Porovnání variant

Celý technický návrh elektrárny jsem výrazně zaměřil na téma účinnosti přečerpávacího cyklu. Proto i první věc, kterou zde uvedu je právě výsledná účinnost všech variant. Účinnost přenosu energie mezi její elektrickou formou a její formou tlakovou jsem určil pomocí rovnice (). Cyklus znamená naplnění a vypuštění horní nádrže PVE, tedy dvakrát přeměnu formy energie při celkové účinnosti přeměny  $\eta_c$ . Proto je účinnost cyklu:

$$\eta_{\text{cyklu}} = \eta_{c1} * \eta_{c2} [-] \quad (\text{R83})$$

Kde:  $\eta_{c1}$  účinnost turbínového chodu elektrárny [-]  
 $\eta_{c2}$  účinnost čerpadlového chodu elektrárny [-]

Účinnosti	varianta 1	varianta 2	varianta 3
$\eta_T$ [-]	0,948	0,946	0,942
$\eta_c$ [-]	0,860	0,854	0,845
$\eta_P$ [-]	0,989	0,987	0,984
$\eta_G$ [-]	0,986	0,984	0,983
$\eta_{\text{Trafo}}$ [-]	0,997	0,997	0,997
$\eta_{c1}$ [-]	0,922	0,916	0,909
$\eta_{c2}$ [-]	0,836	0,827	0,815
$\eta_{\text{cyklu}}$ [-]	0,771	0,758	0,741

Tabulka 12: Účinnost cyklu při optimálním průběhu cyklu pro jednotlivé varianty.

Je vidět, že tak jako i jinde často platí, čím větší stroje, tím větší účinnost.

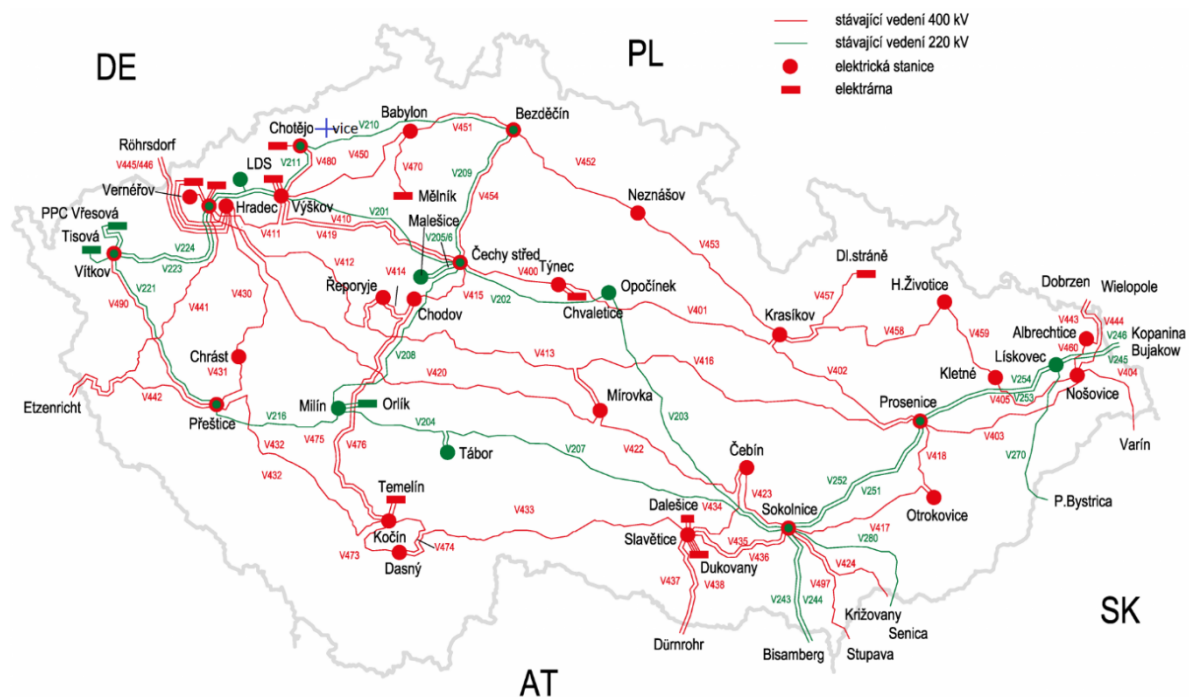
Účinnost ovšem není jediný rozdíl mezi třemi zpracovanými variantami. Dalšími důležitými technickými parametry je třeba úložná kapacita a výkon, který je schopna elektrárna poskytnout (výkon kladný i záporný). S ohledem na 4. bod zadání týkající se ekologických následků jsou důležitými parametry také vliv načerpání horní nádrže PVE na hladinu jezera Milada a plocha zabraná horní nádrží.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
E [MWh]	1630	1177	359
P [MW]	2*150	2*107	64
$\eta_{\text{cyklu}}$ [%]	77,1	75,8	74,1
Doba čerpání [hod]	5	5	5
Doba výroby [hod]	5,58	5,65	5,74
Změna hladiny Milady během cyklu [m]	1,04	0,74	0,24
Zabraná plocha horní nádrží [ha]	27,9	27,9	12,9
z toho vzdušná strana [ha]	11,4	11,4	5,6

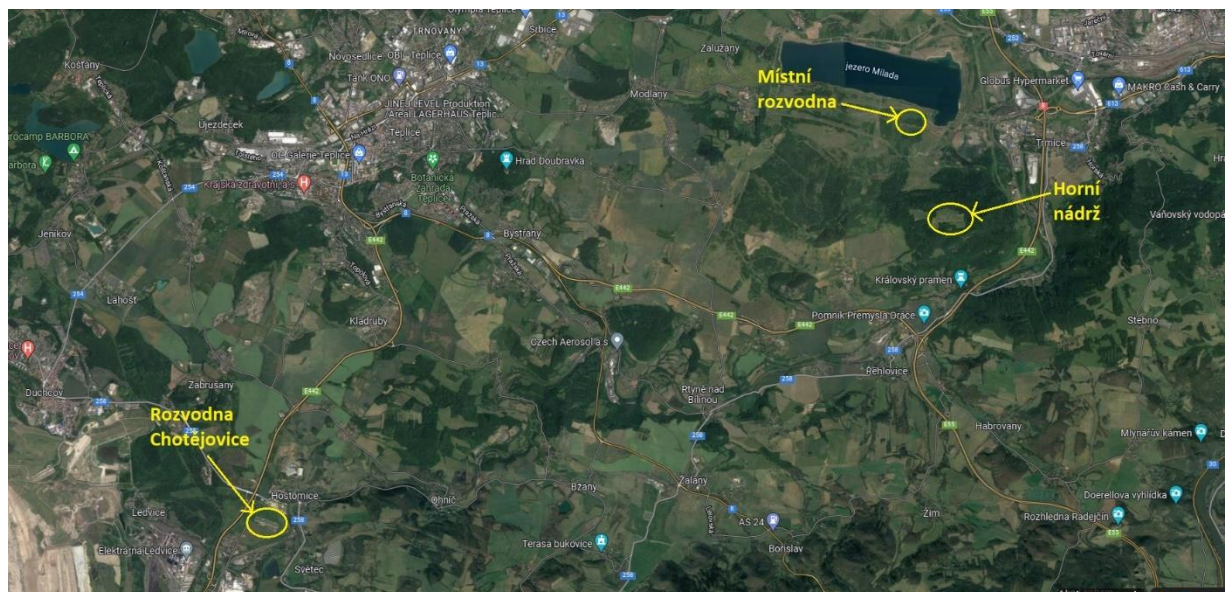
Tabulka 13: Základní parametry 3 variant řešení

## 8.7 Vyvedení do rozvodny

Na závěr technického navrhování již zbývá pouze navrhnout připojení elektrárny do elektrizační sítě. Při navrhování transformace napětí jsem navrhl přenos vyvedení elektřiny na 220 kV. Rozvodny s tímto napětím se v České republice provozuje provozovatel přenosové soustavy ČEPS.



Obrázek 18: Mapa síť přenosové soustavy<sup>111</sup>. Upraveno v malování. Modrým křížkem vyznačena lokalita jezera Milada.



Obrázek 19: Mapa s vyznačeným umístěním rozvodny Chotějovice a umístěním PVE Milada. Převzato z [www.google.cz/maps](https://www.google.cz/maps). Upraveno v malování.

<sup>111</sup> Údaje o PS [online] ČEPS, a.s. [citováno 8. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>

Nejbližší dvě rozvodny ČEPSu jsou rozvodna Chotějovice ve vzdálenosti přibližně 13 km na jihozápad a rozvodna Babylon přibližně 35 km na východ. V obdobné vzdálenosti je ještě rozvodna Výškov, ta je ale ve stejném směru jako Chotějovice, pouze dál. Rozvodna Chotějovice má části 220 kV a 400 kV. Rozvodna Babylon má pouze část 400 kV. Pro vyvedení energie na napětí 220 kV je tak použitelná pouze rozvodna Chotějovice. Pokud by ovšem při realizaci byla použita transformace na 400 kV, může být rozvodna Babylon možnou alternativou.



## 9 Ekologické následky stavby a provozování Přečerpávací vodních elektráren

Vzhledem k míře používání slova ekologie v současné době velkou spoustou lidí s různými způsoby myšlení, hodnot a používání slova ekologie bude nejlepší pro začátek slovo ekologie definovat.

*„Ekologie je věda zabývající se vztahem mezi organismy a vztahem mezi organismy a jejich prostředím“<sup>112</sup>.*

V případě stave přečerpávacích vodních elektráren téma ekologie tedy znamená zabývat se následky vytvoření nové stavební konstrukce a přesunů vodní masy mezi horní a dolní nádrží v první řadě na místní ekosystémy, dále také vliv na další lidská díla i na lidi samé, a nakonec také další nepřímé vlivy způsobené vlivy přímými. Výčet i míra následků jednotlivých vlivů se přirozeně mohou lišit elektrárna od elektrárny.

Protože infrastruktura spojená s výrobou a spotřebou elektrické energie je svojí velikostí oproti vodním nádržím výrazně v menšině zaměřím se z hlediska místního ekologického vlivu PVE primárně právě na nádrže. Přesto i některé další části elektrárny, hlavně ty liniového charakteru, mohou významně zasahovat do krajiny svojí délkou, když už ne plochou a ani na ně v rozboru následků nezapomenu. Jedná se hlavně o elektrické vedení a přivaděče vody.

Nakonec úvodu musím upozornit, že přestože jsem vlivy rozdělil na vlivy působící na přírodu a na vlivy působící na člověka, neznamena to, že vliv uvedený v kategorii příroda nepatří částečně i do kategorie člověk a vice versa. Přesto daný vliv uvádím pouze v jedné kategorii.

### 9.1 Vlivy působící na přírodu

Patrně nejvýraznějším přímým vlivem stavby PVE je zásah do terénu. PVE ke svému provozu potřebuje 2 vodní nádrže, které obvykle nejsou na místě přirozeně k dispozici. Na plochách, na kterých původně byla jiná krajinná společenstva (například v případě horní nádrže PVE Milada, jak jsem ji navrhl v kapitole 9 se jedná o lesy, pole a louky) vzniknou konstrukcí nádrží velká vodní plocha, a v případě sypaných hrází také plocha na návzdušné straně hráze. Na těchto plochách tak zanikne veškerá flóra i fauna, která tam byla. V případě stavby v přírodě, kde dosud nebyla výrazná činnost člověka může stavba nádrže výrazně zasáhnout místní biodiverzitu a životní podmínky tamních živých organismů.

Vzdušná strana sypané hráze může po dokončení stavby být zatravněna a tím může být ztráta přírodních ploch částečně kompenzována. V případě použití jiného typu hráze nelze o zatravnění mluvit, ale na druhou stranu je zastavěná plocha stavbou nádrže v takovém případě menší, protože hráze, které nejsou sypané mají obecně výrazně užší profil (důkladněji jsou typy hrází rozebrány v kapitole 5.4). Využití vodní objemu pro pěstování vodních rostlin, ryb či jiných s vodou spjatých živočichů může být možné jen u nádrží, s dostatečně stálým vodním režimem, což v případě nádrží pro PVE bude obvykle platit nejvýše pro jednu z nich (Například v navrhované PVE Milada toto platí pro jezero Milada. Pro horní nádrž, která bude pravidelně vyčerpávána nic takového jako je stálý vodní režim neplatí).

V případě, že je nádrž vybudována na vodním toku, na kterém se vyskytuje migrace ryb (typické třeba pro lososy), stavba hráze znemožňuje pohyb ryb přes ni a je nutno vybudovat navíc rybí přechody, které přesun ryb mezi nádrží a tokem pod hrází umožní.

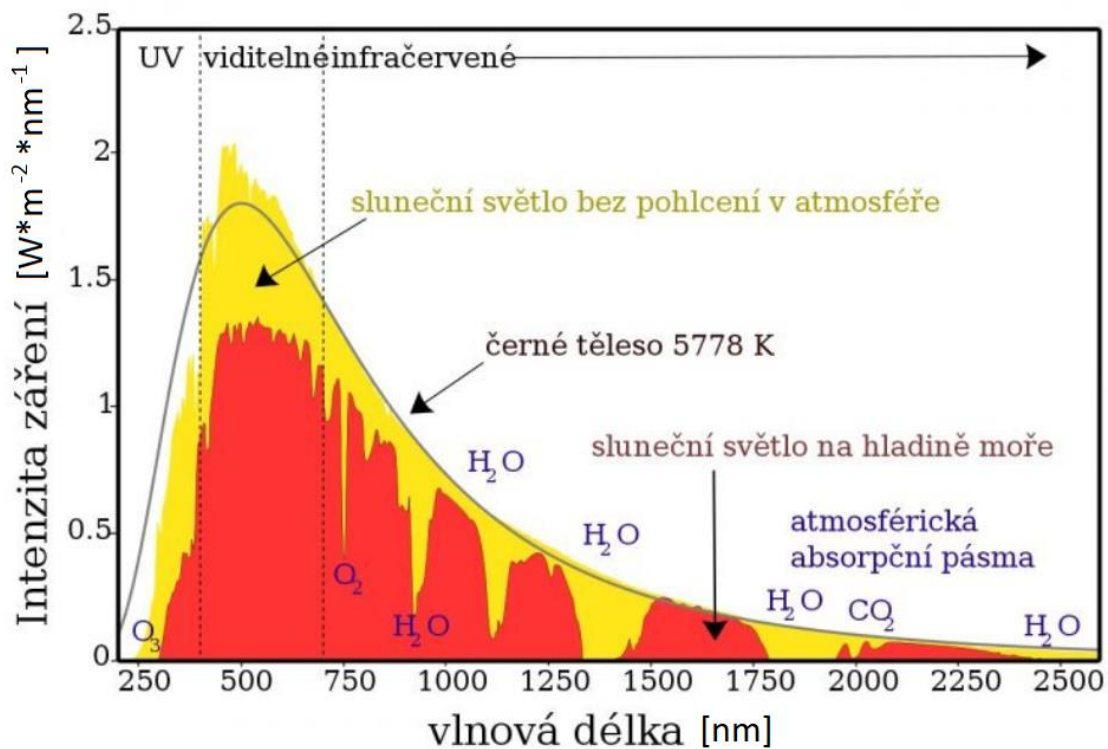
---

<sup>112</sup> *Ekologie a životní prostředí* [online]. eStránky.cz [citováno 27. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://eko.estranky.cz/clanky/zakladni-ekologicke-pojmy-.html>

Velkými ekologickými tématy posledních let je globální oteplování a sucha. I v této oblasti může stavba PVE (zvláště nádrží) mít přímé následky. Na globálním oteplování planety se PVE může podílet jednoduchým způsobem. Pohlcováním slunečního záření vodní masou v nádržích. Protože pohlcená energie záření se mění na energii tepelnou, znamená to, že když má voda v nádrži nižší odrazivost než povrch, který byl na jejím místě před stavbou, zvyšuje se velikost tepelné energie zachycené na Zemi.

Vlnová délka dopadajícího světla [nm]		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Odrzivost povrchu [%]	voda	2,5	3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	vegetace	4	8	46	44	42	20	38	33	6	20	6	3,5
	zemina	14	22	28	36	42	40	46	50	49	47	46	45

Tabulka 14: spektrální odrazivost vody, vegetace a zeminy<sup>113</sup>.



Obrázek 20: Spektrum Slunečního záření dopadajícího na povrch Země. Převzato z:<sup>114</sup>. Upraveno v malování.

Na základě tabulky a obrázku lze říct, že děj popsáný v předchozím odstavci se při postavení nových vodních nádrží, bez ohledu na důvod stavby, děje. Jak oproti zelené vegetaci, tak oproti běžné zemině, má voda v celém rozsahu světelného spektra přicházejícího ze Slunce podstatně nižší odrazivost.

<sup>113</sup> Using Table 1, Plot A Composite Spectral Reflectance Curves For Water, Soil, And Vegetation Features [online] Chegg inc. [citováno 27. 3. 2022], Table 1

Dostupné z: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/using-table-1-plot-composite-spectral-reflectance-curves-water-soil-vegetation-features-ex-q85642055#question-transcript>

<sup>114</sup> Spektrum slunečního záření (Země) [online] SMARTmania s.r.o. [citováno 27. 4. 2021] Dostupné z: <https://smartmania.cz/wp-content/uploads/2021/03/slunecni-spektrum.jpg>

K tématu sucha. Vodní nádrže (i ty sloužící PVE, pokud je jedna větší než druhá) v sobě uchovávají značná množství vody, která je možné využít k regulaci katastrof souvisejících s přebytkem (povodně) a nedostatkem (sucha) vody. To je běžné využití vodních nádrží, které je zároveň s výrazným ekologickým vlivem. Kromě toho ale také nádrže umocňují ztrátu vody vypařováním. Tím, že vodní nádrž má větší plochu, než by měl původní vodní tok, zvětšuje se plocha, ze které k vypařování dochází. V případě PVE jsou nádrže dokonce dvě, a tedy plocha ze které k vypařování dochází odpovídá dvěma nádržím. V sušších oblastech naší planety tak existence nádrží může skrze vypařování nezanedbatelně ubírat z toho mála vody co je k dispozici.

Další vlivy souvisí se stavbou elektrického vedení mezi elektrárnou a rozvodnou. Stavba vedení v krajině způsobí samozřejmě umístění stožárů do krajiny. kromě vzniku stožárů též stavba vedení obvykle znamená potřebu vyčistit ochranné pásmo od vzrostlé zeleně (v ČR nad 3 m výšky), což se projeví vznikem průseků v lesích. Čím vyšší napěťová úroveň, tím širší ochranné pásmo. V Česku například vedení 400 kV má ochranné pásmo v šířce 20 m na obě strany, zatímco vedení 220 kV pouze 15 m.<sup>115</sup>

Nebezpečím je elektrické vedení též pro ptáky. Ti mohou jednak svým tělem spojit dvě fáze, nebo fázi se zemí, a tak se zabít (u vyšších napěťových úrovní toto dokáže pouze větší pták, který rozpětím svých křídel dokáže překonat izolační vzdálenosti). Nebo mohou do elektrických drátů za letu narazit a takto si ublížit.

Přivaděče vody, pokud nejsou umístěny v podzemí představují další zásah do krajiny. Pokud vedou po povrchu pak svojí přítomností rozdělují krajinu na dvě strany, mezi nimiž je výrazně omezená možnost přesunu. To se týká nejen zvíře, ale i člověka. Tento problém se na druhou stranu dá řešit různými mosty nebo podchody. Pokud je přivaděč položen na podpěrách a vede vzduchem, pak odpadá problém s průchodností přes přivaděče. Zase ale, protože je přivaděč ve výšce na terénu, stává se více vizuálně vynikajícím v terénu.

## 9.2 Vlivy působící na člověka

Zatím jsem se zabíral tématy, která mají vliv spíše na nelidské tvory. Nyní se přesunu více k vlivům na prostředí lidské. Výrazným přímým vlivem na člověka souvisejícím se stavbou PVE je opět již mnohokrát zmíněný vznik nádrží nebo dvou. To, kromě změny krajiny, také může umožnit rekreační využití lidí kolem nádrže nebo v ní. Má to přirozeně své podmínky. Prostředkem funkce PVE je přečerpávání vody z jedné nádrže do druhé a zpět. Má-li vodní nádrž rozumně fungovat pro rekreaci obyvatelstva, nesmí být tyto přesuny vody příliš vidět na vodní hladině. Proto mohou k rekreaci a skladování elektrické energie sloužit pouze takové nádrže, které jsou podstatně větší než druhá nádrž v systému (to je příklad třeba uvažované PVE Milada). Jak jsem se dozvěděl při exkurzi do ČEZ Vodní elektrárny, hladina vody v Lipně nebo Orlíku se přes léto běžně musí v intervalu cca 1 m.

Jakým funguje PVE v rámci elektrizační soustavy je popsáno v kapitole 7. V této kapitole chci upozornit na vliv PVE, který mají na instalaci a provozování OZE, zvláště fotovoltaické (dále též FVE) a větrné (dále též VVE) elektrárny. Tyto dva typy elektráren mají při svém provozování známý neduh. Závislost na počasí, a v případě FVE i denní době. V tomto směru právě vypomáhají PVE a jiné způsoby akumulace elektrické energie tím, že v době, kdy svítí nebo fouká energii akumulují, aby ji v době, kdy nefouká nebo nesvítí zase vydali. Tím stavba PVE ovlivňuje možnosti realizace projektů

---

<sup>115</sup> Česká přenosová a distribuční soustava - 3. díl: Vedení (Ochranná pásma, vedení 110 kV a 220 kV) [online] OM Solutions s.r.o. [citováno 28. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-ochranna-pasma-vedeni-110-kv-a-220-kv>

FVE a VVE. Stavba Přečerpávacích vodních elektráren tak podporuje ekologizaci výroby elektrické energie umožněním efektivního provozování dalších FVE a VVE.

Nově vzniklé nádrže lze využít i jinak než jako zdroj vody pro fungování PVE nebo k rekreaci. V souvislosti s předchozím odstavcem lze vodní plochu též využít například pro stavbu plovoucích fotovoltaických elektráren jak se i v Česku pokouší skupina ČEZ na hladině horní nádrže PVE Štěchovice II<sup>116</sup>. Stavba plovoucích FVE nijak neomezí provoz FVE a u nádrží sloužících pouze jako součást PVE nemá vznik FVE žádné další přímé následky na místní přírodu, což se nedá říci třeba o FVE vznikajících na polích a loukách.

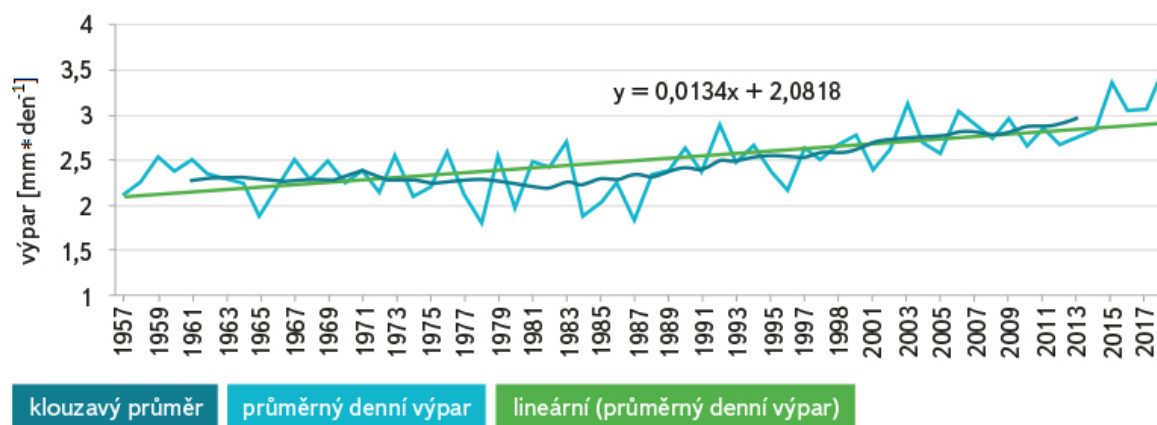
Dalším možný vliv stavby nádrží je na říční plavbu. Při stavbě nádrží na splavných řekách je nutné vybudovat zdymadla nebo lodní výtahy, pokud má být řeka přes hráz nádrže splavnou.

### 9.3 Ekologické následky stavby a provozu PVE Milada

V případě PVE Milada již dolní nádrž stojí. Zbývá tak vyhodnotit ekologické vlivy stavby horní nádrže, a vlivu provozu PVE. V kapitole 8 jsem představil 3 různé návrhy řešení, které se primárně liší svojí velikostí. Proto i rozdíly mezi následky vzniku a provozu PVE jsou převážně ve velikosti následků.

Naplněním horní nádrže PVE vodou se vytvoří nová vodní plocha, ze které se bude voda opařovat.

Pro určení množství odpařené vody z nádrže použijí jako základ měření z výparoměrné stanice Hlasivo. Výparná sezona obecně probíhá s ohledem na zamrzání a zimní počasí obecně od začátku dubna do konce října. Přestože kvůli místním zvláštnostem se na stanici Hlasivo měří až května, není důvod toto vztahovat i na Miladu. Od začátku měření vypařování na stanici Hlasivo rychlost vypařování roste z průměrných přibližně 2,3 mm\*den<sup>-1</sup> na začátku 60. let na přibližně 3 mm\*den<sup>-1</sup> v posledních letech.<sup>117, 118</sup>



Graf 7: Vývoj hodnot výparu během let provozu měřicí stanice Hlasivo.

Toto je i hodnota, kterou použijí pro výpočet. Za rok od dubna do října se vypaří:

<sup>116</sup> ČEZ TESTUJE PRVNÍ PLOVOUCÍ FOTOVOLTAICKOU ELEKTRÁRNU V ČR

[online] ČEZ, a. s. [citováno 28. 3. 2022]

Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-testuje-prvni-plovouci-fotovoltaickou-elektrarnu-v-cr-154466>

<sup>117</sup> Výpar z výparoměrnych stanic VÚV TGM [online]. VTEI.cz [citováno 8. 5. 2022]

Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2020/10/vypar-z-vyparomernych-stanic-vuv-tgm/>

<sup>118</sup> Ztráta vody výparem z volné vodní hladiny [online]. VTEI.cz [citováno 8. 5. 2022]

Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2019/08/ztrata-vody-vyparem-z-volne-vodni-hladiny/>

$$Výpar = počet\ dní * rychlost\ výparu = 214 * 3 = 642\ mm * rok^{-1} = 0,642\ m * rok^{-1}$$

Pokud bude trend rostoucí rychlosti vypařování vody pokračovat i nadále, pak podle lineárního prokladu v grafu bude výška vypařeného vodního sloupce každý rok růst o  $0,0134 * 214 = 2,87\ mm * rok^{-1}$ .

Hladina horní nádrže a tím i plocha ze které k vypařování dochází je během činnosti PVE proměnlivá, což jsem se při porovnání obrázků 8 a 10 rozhodl zjednodušit na polovinu ve stavu nádrž plná a polovinu ve stavu nádrž v dolní provozní hladině.

Velká nádrž (varianta 1 a 2) má podle tabulek 5 a 6 v plném stavu vodní plochu velikou 15,6 ha. Ve vyčerpané poloze se plochy liší. Hlubší varianta 1 má velikost vodní plochy 5,8 ha. Za rok se tak z takto provozované horní nádrže PVE odpaří následující objem vody:

$$\Delta V = \frac{Výpar}{2} * (A_{max} + A_{min}) = \frac{0,642}{2} * (15,6 + 5,8) * 10^4 = 68700\ m^3 * rok^{-1}$$

Varianta 2 má vyšší dolní hladinu horní nádrže, která má tak v tomto stavu rozlohu 9,3 ha.

$$\Delta V = \frac{Výpar}{2} * (A_{max} + A_{min}) = \frac{0,642}{2} * (15,6 + 9,3) * 10^4 = 79900\ m^3 * rok^{-1}$$

Malá nádrž ve variantě 3 má podle tabulky 7 v krajních stavech vodní plochu o velikosti 6,7 ha respektive 4,1 ha.

$$\Delta V = \frac{Výpar}{2} * (A_{max} + A_{min}) = \frac{0,642}{2} * (6,7 + 4,1) * 10^4 = 34700\ m^3 * rok^{-1}$$

Stavba horní nádrže změní tvář krajiny na vrchu Rovný. V současné době je v oblasti kde by byla horní nádrž postavena kombinace lesa s menším podílem polí a luk. V kapitole 8.6, kde porovnávám jednotlivé mnou navržené varianty v tabulce 13 uvádím velikost plochy, kterou zabere samotná nádrž s hrází a velikost plochy hráze nestýkající se při provozu PVE s vodou. Pro připomenutí dotýčnou část tabulky uvádím znovu.

	varianta 1 a 2	varianta 3
Zabraná plocha horní nádrží [ha]	27,9	12,9
z toho vzdušná strana hráze [ha]	11,4	5,6

Tabulka 15: Záběr plochy horní nádrží

Pro realizaci stavby hráze, a i přivaděčů vody k turbínám bude nutné doplnit oblast alespoň základní infrastrukturou. Do oblasti, kde bude v případě stavby PVE Milada stát horní nádrž v době psaní textu vedou pouze úzké lesní cesty. V případě stavby hráze bude nutné vybudovat cestu novou. Cestu, která bude průchodná pro nákladní automobily, které budou vozit jak stavební stroje, tak materiál na stavbu hráze a přivaděčů. S ohledem na množství materiálu potřebného ke stavbě nádrže by mohlo být vhodné postavit onu cestu asfaltovou.

Přivaděče PVE Milada jsem navrhl jako podzemní, proto nijak (snad s výjimkou vyrovnávací komory u horní nádrže, která z principu své funkce musí být vyšší než hladina vody) nezasahují do terénu a samy o sobě tak nemají ekologický vliv.

Je rovněž možné na hladinu horní nádrže umístit FVE, které využijí jinak nevyužitou vodní plochu k výrobě energie ze Slunce. S instalací takového zařízení by bylo nutné napojit FVE vedením do distribuční sítě, což by navíc znamenalo další zásah do krajiny právě kvůli stavbě tohoto vedení.

U dosavadním textu jsem opakovaně psal o vlivu přečerpávacího cyklu na změnu výšky hladiny jezera Milada a zde je místo pro vyhodnocení. V kapitole 9.2 jsem psal, že v turistické sezóně na rekreačně užívaných nádržích na Vltavské kaskádě nepřekračuje běžně změna hladiny 1 m. V kapitole 8.1 jsem u jednotlivých variant určil pokles hladiny Milady při plném načerpání horní nádrže. Pro připomenutí přidávám tabulku.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Největší pokles hladiny Milady [m]	1,04	0,74	0,24

Tabulka 16: Pokles hladiny jezera Milada při plném načerpání horní nádrže.

Z tabulky je vidět, že pokles hladiny ve variantě 2 a 3 se ani neblíží hodnotě 1 m. Ve variantě 1 dochází k poklesu o 1,04 m. To sice překračuje 1 m, ale o pouhé 4 cm, které lze buďto akceptovat, nebo při nemožnosti akceptace je možné přes letní sezonu mírně omezit akumulaci kapacity elektrárny.

## 10 Závěr

V této závěrečné práci jsem z mnoha pohledů zpracoval téma Přečerpávacích vodních elektráren. Shrnujím význam existence PVE v elektrizačních sítích pro udržení výkonové rovnováhy, nabídl jsem možné alternativy k PVE a vyjádřil se k možnostem nabízet podpůrné služby provozovateli přenosové soustavy. Vypracoval jsem 3 varianty technického řešení PVE Milada s výrazným zaměřením na účinnost přečerpávacího cyklu. Varianty se od sebe liší primárně velikostí přečerpávaného objemu vody. Varianty se tak od sebe liší instalovaným výkonem, akumulací kapacity i celkovou účinností cyklu. Tím jsem důkladně vyčerpал druhý a třetí bod zadání.

V ekologických částech práce jsem čtenáře nejprve seznámil s tím, co je to rekultivace a jak se provádí v souvislosti s hnědouhelnou těžbou včetně příkladů. Uvedl jsem výsledky rekultivace lomu Chabařovice, na jehož místě je dnes jezero Milada a jak bude vývoj krajiny pokračovat. Na závěr jsem sepsal a vysvětlil ekologické následky stavby a provozu přečerpávacích vodních elektráren a ukázal, jak se případně projeví při realizaci projektu PVE Milada podle jedné ze zde navrhovaných variant. I první a čtvrtý bod zadání je tak splněn.

Mohu tak s radostí konstatovat, že jsem splnil všechny čtyři body zadání diplomové práce.

Jako nejvhodnější pro realizaci se zdá být varianta 1, která ze 3 uvažovaných variant má nejvyšší parametr akumulované elektřiny. Přestože ekologické vlivy větší elektrárny jsou přirozeně větší, tak jsou stále v mezích, které považuji za přijatelné. Parametry preferované varianty 1:

$\eta_{\text{cyklu}}$ [%]	E [MWh]	P [MW]	největší pokles hladiny Milady [m]	Doba čerpání [hod]	Doba výroby [hod]
77,1	1630	2*150	1,04	5,58	5

Tabulka 17: Parametry elektrárny při realizaci autorem preferované varianty 1.

Není mi známo, že by se někdo takto důkladně zabýval možností vybudovat na jezeru Milada přečerpávací vodní elektrárnu, a to jak z hlediska technické proveditelnosti, tak z hlediska ekologických následků stavby této konkrétní elektrárny. Ověřil jsem možnost geograficky a hydrologicky do oblasti umístit poměrně velkou horní nádrž a elektrárnu (výkonem a kapacitou

v největší variantě jde zhruba o polovinu Dlouhých strání) bez toho, aby došlo k významnému ovlivnění hladiny jezera Milada. Tím došlo k vyvrácení možných obav kompatibility PVE s vodní turistikou na Miladě.

Já sám jsem se v této práci nad rámec běžného studia seznámil s tématy, kterým jsem se doposud příliš nevěnoval. Jedná se hlavně o témata těžby uhlí, rekultivace a ekologie obecně. Také jsem si zopakoval a prohloubil své znalosti vodních turbín a vůbec o vodním inženýrství. Téma podpůrných a systémových služeb, stejně jako téma akumulace elektřiny jsem doposud nestudoval tak důkladně, jak bylo potřeba pro sepsání této diplomové práce.

Protože technickým řešením PVE Milada se takto důkladně doposud nikdo nezabýval je možné tuto práci v budoucnu použít jako základ pro vypracování velmi konkrétního projektu určenému k realizaci. Případně je možné na základě této práce odhadnout ekonomické vlastnosti projektu ať už v jiné závěrečné práci nebo ve skutečném projektu.

## 11 Seznamy zdrojů

### 11.1 Seznam použité literatury

1. Bednář J., *Turbíny (malé vodní elektrárny)*, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013  
ISBN 978-80-908437-0-6
2. Jandora J., Šulc J. *Hydraulika Modul 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007.  
ISBN 978-80-7204-512-9
3. Kadrnožka J. *Lopatkové stroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003.  
ISBN 80-7204-297-1
4. Mastný P. a kolektiv. *Obnovitelné zdroje obnovitelné energie*. Praha: ČVUT v Praze, 2011.  
ISBN 978-80-01-04937-2
5. Quasching V. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada Publishing, 2010.  
ISBN 978-80-247-3250-3
6. Šmid V. *Teorie proudových strojů*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1984, skripta
7. Štýs S. a kolektiv, *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1981.
8. Štýs S., *Rekultivace území devastovaných těžbou nerostů*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1990.  
ISBN 80-85087-10-3
9. Štýs S., *Rekultivace*. Most: Mostecká uhelná společnost a.s., 1997
10. Větvíčka V. a Štýs S., *Most v zeleném*. Most: Nakladatelství Hněvín, 2008  
ISBN 978-80-86654-22-5

### 11.2 Online zdroje

1. 44 - *Kopistská výsypka* [online] Ústecký kraj [citováno 30. 3. 2022]  
Dostupné z: <http://www.usteckykraj-priroda.cz/44>
2. *Akumulace energie – výklad* [online] skupina ČEZ [citováno 26. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>
3. *Bydlení na vodě a výhledy na hory. Jezero Medard má na Sokolovsko vrátit život* [online] MediaRey, SE [citováno 10. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://forbes.cz/bydleni-na-vode-a-vyhledy-na-hory-jezero-medard-ma-na-sokolovsko-vratit-zivot/>
4. *BU-209: How does a Supercapacitor Work?* [online] Isidor Buchmann [citováno 29. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-how-does-a-supercapacitor-work>
5. *BU-1007: Net Calorific Value* [online] Isidor Buchmann [citováno 28. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-1007-net-calorific-value>
6. *Česká přenosová a distribuční soustava - 3. díl: Vedení (Ochranná pásma, vedení 110 kV a 220 kV)* [online] OM Solutions s.r.o. [citováno 28. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elekriny/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-ochranna-pasma-vedeni-110-kv-a-220-kv>



7. *ČEZ TESTUJE PRVNÍ PLOVOUCÍ FOTOVOLTAICKOU ELEKTRÁRNU V ČR* [online] ČEZ, a. s. [citováno 28. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-testuje-prvni-plovouci-fotovoltaickou-elektrarnu-v-cr-154466>
8. *Daelim-Transformer-Product-Catalog* [online] Daelim Belefic [citováno 24. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://daelim-electric.com/wp-content/uploads/2021/07/Daelim-Transformer-Product-Catalog.pdf>
9. *Denní trh* [online]. OTE, a.s. [citováno 25. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh>
10. *Dlouhé Stráně: Český div vyvažuje elektrickou soustavu* [online] siemens, s.r.o. [citováno 18. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/spolecnost/o-nas/pribehy-technologie-siemens-v-cesku/dlouhe-strane-cesky-div-vyvažuje-elektrickou-soustavu.html>
11. *Ekologie a životní prostředí* [online]. eStránky.cz [citováno 27. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://eko.estranky.cz/clanky/zakladni-ekologicke-pojmy-.html>
12. *Ervěnický koridor je stále unikátem* [online]. pHmedia Czech Republic, s.r.o [citováno 4. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://iuhli.cz/ervenicky-koridor-je-stale-unikatem/>
13. *Gyrobús* [online] Wikipedia [citováno 26. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gyrobús>
14. *Hot Sale Turbina Francis or Francis Turbine Price for Hydropower Plant* [online] Focus Technology Co., Ltd [citováno 16. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://cdforster.en.made-in-china.com/product/IdsQGomJVxVr/China-Hot-Sale-Turbina-Francis-or-Francis-Turbine-Price-for-Hydropower-Plant.html>
15. *Hydrogen* [online] Wikipedia [citováno 28. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>
16. *Importing Google Maps 3D models data into Blender* [online] Youtube [citováno 24. 4. 2021]  
Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=g1BaB6YwBWA>
17. *JAK JSOU VELKÉ* [online] skupina ČEZ [citováno 13. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/vodni-energie-pro-deti/precerpavaci-vodni-elektrarny/jak-jsou-velke>
18. *JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN* [online] skupina ČEZ [citováno 13. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
19. *Jezero Barbora v Oldřichově u Teplic* [online] CzechTourism [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <https://www.kudyznudy.cz/aktivity/jezero-barbora-v-oldrichove-u-teplic>
20. *Jezero Milada* [online] Statutární město Ústí nad Labem [citováno 7. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.usti-nad-labem.cz/cz/volny-cas/turistum/turisticke-cile/prirodni-zajimavosti/jezero-milada.html>

21. *Jezero Milada: Živá krajina* [online] DIAMO, státní podnik, odštěpný závod PKÚ [citováno 7. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://vizemilada.cz/uploads/files/price-1.pdf>
22. *Jezero Most* [online] Statutární město Most [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné: <https://www.imostecko.cz/jezero-most/>
23. *Komplexní revitalizace území v rámci zahlazování následků hornické činnosti* [online] Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 5. 3. 2022]  
Dostupné: <http://www.jezeromilada.cz/stezky/naucne-stezky?showall=&start=4>
24. *Levnější než baterie: opuštěné těžební šachty mají sloužit jako zásobárna obnovitelné energie* [online] CzechTrade [citováno 26. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/clanky/levnejsi-nez-baterie-opustene-tezebni-sachty-maji-slouzit-jako-zasobarna-obnovitelne-energie/>
25. *Lom ČSA se dočká zatopení. Vznikne zde jezero, skleníky i solární park* [online] CZECH NEWS CENTER a. s. [citováno 11. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.e15.cz/domaci/lom-csa-se-docka-zatopeni-vznikne-zde-jezero-skleniky-i-solarni-park-1381630>
26. *Mapy.cz* [online] seznam.cz [citováno 30. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://mapy.cz/>
27. *Milada (jezero)* [online] Wikipedia [citováno 9. 4. 2022]  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Milada\\_\(jezero\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Milada_(jezero))
28. *MPO chce propojit jezera vzniklá rekultivací hnědouhelných dolů a lomů* [online] MPO [citováno 11. 3. 2022] Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/mpo-chce-propojit-jezera-vznikla-rekultivaci-hnedouhelnych-dolu-a-lomu--248294/>
29. *Nebezpečné baterie? – část I.* [online] Topinfo s.r.o. [citováno 30. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18629-nebezpecne-baterie-cast-i>
30. *Největší bateriové úložiště v ČR zahájilo svůj provoz v Plané nad Lužnicí* [online] Topinfo s.r.o. [citováno 30. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/19624-nejvetsi-bateriove-uloziste-v-cr-zahajilo-svuj-provoz-v-plane-nad-luznici>
31. *Nádrže a přehrady* [online]. FSV ČVUT [citováno 31. 12. 2021]  
Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Nadrze\\_prehrady.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Nadrze_prehrady.pdf)
32. *O jezeře* [online]. Dobrovolný svazek obcí Jezero Milada. [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <http://www.jezeromilada.cz/o-jezere>
33. *Podpůrné služby* [online] ČEPS, a. s. [citováno 14. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby>
34. *Pro vás* [online] Koupaliště Michal s.r.o. [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <https://www.michal-sokolov.cz/pro-vas>

35. *Rekultivací po těžbě uhlí v ČR vznikla tři jezera, největší je Medard* [online] oEnergetice.cz [citováno 8. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://oenergetice.cz/uhli/rekultivaci-po-tezbe-uhli-v-cr-vznikla-tri-jezera-nejvetsi-je-medard>
36. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020* [online] Energetický regulační úřad [citováno 25. 3. 2022]  
Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173](https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173)
37. *Seznam lokalit soustavy Natura 2000* [online] Agentura ochrany přírody a krajiny ČR [citováno 30. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://natura2000.cz/Lokalita/Lokalita>
38. *SGen-100A/SGen-1000A generator series* [online] Siemens Energy [citováno 20. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-100a.html>
39. *SGen-2000P generator series* [online] Siemens Energy [citováno 21. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-2000p.html>
40. *Skladování stlačeného vzduchu je jednou z budoucností energetiky* [online] inStory.cz [citováno 27. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://tech.instory.cz/1466-skladovani-stlaceneho-vzduchu-je-jednou-z-budoucnosti-energetiky.html>
41. *Solution – gravity* [online] Energy Vault. inc. [citováno 26. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.energyvault.com/gravity>
42. *Spektrum slunečního záření (Země)* [online] SMARTmania s.r.o. [citováno 27. 4. 2021]  
Dostupné z: <https://smartmania.cz/wp-content/uploads/2021/03/slunecni-spektrum.jpg>
43. *Sportovně-rekreační areál Matylda* [online] Statutární město Most [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <https://www.imostecko.cz/matylda/>
44. *Středisko Chabařovice* [online]. DIAMO, státní podnik, odštěpný závod PKÚ [citováno 3. 12. 2021]  
Dostupné z: <https://www.pku.cz/cs/stredisko-chabarovice-55/>
45. *Tlaková ztráta v trubce* [online] eStránky.cz [citováno 16. 4. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ipotrubi.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/2.-tlakova-ztrata-v-trubce.html>
46. *Using Table 1, Plot A Composite Spectral Reflectance Curves For Water, Soil, And Vegetation Features* [online] Chegg inc. [citováno 27. 3. 2022]  
Dostupné z: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/using-table-1-plot-composite-spectral-reflectance-curves-water-soil-vegetation-features-ex-q85642055#question-transcript>
47. *Údaje o PS* [online] ČEPS, a.s. [citováno 8. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
48. *Viskozita vody* [online]. Jiří Bureš. [citováno 5. 12. 2021]  
Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>
49. *VODNÍ ELEKTRÁRNA LIPNO* [online] ČEZ, a. s. [citováno 13. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/lipno-58166>

50. *Vodohospodářská zařízení III* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [citováno 1. 1. 2022]  
Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/prehrady.html>
51. *Výpar z výparoměrných stanic VÚV TGM* [online]. VTEI.cz [citováno 8. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2020/10/vypar-z-vyparomernych-panic-vuv-tgm/>
52. *Water - Dynamic (Absolute) and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure* [online] Engineering ToolBox [citováno 18. 4. 2022]  
Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html?vA=0&units=C#](https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html?vA=0&units=C#)
53. *Ztráta vody výparem z volné vodní hladiny* [online]. VTEI.cz [citováno 8. 5. 2022]  
Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2019/08/ztrata-vody-vyparem-z-volne-vodni-hladiny/>
54. *Ztráty transformátorů a jak se ztrátami pracovat* [online]. AF POWER agency a. s. [citováno 14. 1. 2022]  
Dostupné z: <https://allforpower.cz/rozvody-energie/ztraty-transformatoru-a-jak-se-ztratami-pracovat-200>

## 12 Přílohy

### 12.1 Seznam příloh

1. Účinnost transformátoru
2. Model horní nádrže PVE Milada a přivaděčů
3. Výpočtový soubor pro kapitolu 8

## 12.2 Přílohy

### 12.2.1 Příloha 1 účinnost transformátoru

Excelový soubor s touto tabulkou a grafem 1 z kapitoly 6.4 je mezi příloženými soubory pod názvem: Priloha1\_UcinnostTransformatoru.xlsx

$P_o$ [kW]	$P_k$ [kW]	$S_{in}$ [kVA]	$S_n$ [kVA]	$P_{in}$ [kW]	$P_z$ [kW]	$\eta$ [-]	$S/S_n$ [-]
1	0,000	1	300	1	1,000	0,000	0,0033
1	0,006	5	300	5	1,006	0,799	0,0167
1	0,022	10	300	10	1,022	0,898	0,0333
1	0,050	15	300	15	1,050	0,930	0,0500
1	0,089	20	300	20	1,089	0,946	0,0667
1	0,139	25	300	25	1,139	0,954	0,0833
1	0,200	30	300	30	1,200	0,960	0,1000
1	0,272	35	300	35	1,272	0,964	0,1167
1	0,356	40	300	40	1,356	0,966	0,1333
1	0,450	45	300	45	1,450	0,968	0,1500
1	0,556	50	300	50	1,556	0,969	0,1667
1	0,672	55	300	55	1,672	0,970	0,1833
1	0,800	60	300	60	1,800	0,970	0,2000
1	0,939	65	300	65	1,939	0,970	0,2167
1	1,089	70	300	70	2,089	0,970	0,2333
1	1,250	75	300	75	2,250	0,970	0,2500
1	1,422	80	300	80	2,422	0,970	0,2667
1	1,606	85	300	85	2,606	0,969	0,2833
1	1,800	90	300	90	2,800	0,969	0,3000
1	2,006	95	300	95	3,006	0,968	0,3167
1	2,222	100	300	100	3,222	0,968	0,3333
1	2,450	105	300	105	3,450	0,967	0,3500
1	2,689	110	300	110	3,689	0,966	0,3667
1	2,939	115	300	115	3,939	0,966	0,3833
1	3,200	120	300	120	4,200	0,965	0,4000
1	3,472	125	300	125	4,472	0,964	0,4167
1	3,756	130	300	130	4,756	0,963	0,4333
1	4,050	135	300	135	5,050	0,963	0,4500
1	4,356	140	300	140	5,356	0,962	0,4667
1	4,672	145	300	145	5,672	0,961	0,4833
1	5,000	150	300	150	6,000	0,960	0,5000
1	5,339	155	300	155	6,339	0,959	0,5167
1	5,689	160	300	160	6,689	0,958	0,5333
1	6,050	165	300	165	7,050	0,957	0,5500
1	6,422	170	300	170	7,422	0,956	0,5667
1	6,806	175	300	175	7,806	0,955	0,5833
1	7,200	180	300	180	8,200	0,954	0,6000
1	7,606	185	300	185	8,606	0,953	0,6167
1	8,022	190	300	190	9,022	0,953	0,6333
1	8,450	195	300	195	9,450	0,952	0,6500
1	8,889	200	300	200	9,889	0,951	0,6667

$P_o$ [kW]	$P_k$ [kW]	$S_{in}$ [kVA]	$S_n$ [kVA]	$P_{in}$ [kW]	$P_z$ [kW]	$\eta$ [-]	$S/S_n$ [-]
1	9,339	205	300	205	10,339	0,950	0,6833
1	9,800	210	300	210	10,800	0,949	0,7000
1	10,272	215	300	215	11,272	0,948	0,7167
1	10,756	220	300	220	11,756	0,947	0,7333
1	11,250	225	300	225	12,250	0,946	0,7500
1	11,756	230	300	230	12,756	0,945	0,7667
1	12,272	235	300	235	13,272	0,944	0,7833
1	12,800	240	300	240	13,800	0,943	0,8000
1	13,339	245	300	245	14,339	0,941	0,8167
1	13,889	250	300	250	14,889	0,940	0,8333
1	14,450	255	300	255	15,450	0,939	0,8500
1	15,022	260	300	260	16,022	0,938	0,8667
1	15,606	265	300	265	16,606	0,937	0,8833
1	16,200	270	300	270	17,200	0,936	0,9000
1	16,806	275	300	275	17,806	0,935	0,9167
1	17,422	280	300	280	18,422	0,934	0,9333
1	18,050	285	300	285	19,050	0,933	0,9500
1	18,689	290	300	290	19,689	0,932	0,9667
1	19,339	295	300	295	20,339	0,931	0,9833
1	20,000	300	300	300	21,000	0,930	1,0000

### 12.2.2 Příloha 2 Model horní nádrže PVE Milada a přivaděčů

Jedná se o soubor vytvořený v grafickém softwaru Blender ve verzi 2.93. Soubor, který je přílohou je k nalezení pod názvem: Priloha2\_Model.blend

Ve freewarovém softwaru Blender jsem vytvořil modely horní nádrže PVE zasazený do terénu a potrubí mezi horní nádrží, strojovnou a jezerem Milada. Poblíž jezera Milada je šedým kvádrem též vyznačena oblast zázemí elektrárny. Import terénu z Google Maps je jedna z věcí, které použitý software umožňuje. Postupoval jsem podle tohoto návodu<sup>119</sup>.

Scéna obsahuje značné množství objektů, které je logicky rozděleno do skupin. Jednotlivé objekty nebo celé skupiny lze podle potřeby zobrazovat. Kromě samotné hráze, lze zobrazit též některé roviny v určité výšce pod korunou. U modelu velké nádrže jsou tyto roviny též využity ke změření vodní plochy v těchto hladinách. Přivaděče jsou totožně uspořádány do skupiny pro větší nádrž (varianty 1 a 2) a do skupiny pro nádrž menší (varianta 3). Samostatně je umístěno potrubí mezi turbínou a Miladou, které je společné pro všechny varianty. Zde je potřeba zdůraznit, že model potrubí nemá za cíl namodelovat přesně průřez potrubí a zabraný objem, ale pouze jeho trasu. Účelem bylo navrhnout trasu potrubí a změřit délky jednotlivých úseků. Z tohoto pohledu je parametr průměru kruhového potrubí marginalitou.

K tématu rozměrů. V souboru jsem podle měření vzdáleností v Google Earthu naškáloval rozměry tak, aby vzdálenosti v souboru odpovídali vzdálenostem v realitě, což umožňuje i bez přepočtů snadno měřit plochy. Druhou rozměrovou záležitostí, kterou musím zmínit je osa Z (osa výšky). Jako referenční výšku 0 v celém souboru považuji hladinu jezera Milada, která má na ose Z výšku 58,75.

Poznámky ke grafické konstrukci hráze. Oblouky hráze nejsou v souboru utvořeny do plynulého oblouku, protože toto Blender neumožňuje (nebo alespoň já to neumím). Místo toho jsou oblouky tvořeny rovnými segmenty, mezi kterými je vždy úhel 15 °.

---

<sup>119</sup> *Importing Google Maps 3D models data into Blender* [online] Youtube [citováno 24. 4. 2021]  
Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=g1BaB6YwBWA>



### 12.2.3 Příloha 3 Výpočtový soubor pro kapitolu 8

Jedná se o Excelový soubor, který je k nalezení mezi přílohami pod názvem:

Priloha3\_VypoctovySouborKapitola9.xlsx

Výpočty jsou skoro plně automatické. Manuálně je potřeba přepsat případné změny rovnic funkčních závislostí  $H(V)$  a  $A(T)$  z grafů v listu „Horní nádrž\_Verze Word“ použité v tomtéž listu ve sloupcích „F“ a „I“ a funkční závislost Pokles hladiny =  $f(\text{Celkový objem})$  z gradu v listu „Dolní nádrž“, která se používá v listu „Horní nádrž\_Verze Word“ ve sloupci „G“.