

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MALÁ VODNÍ ELEKTRÁRNA

SMALL HYDROPOWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN FIEDLER, Dr.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Novák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Malá vodní elektrárna

v anglickém jazyce:

Small hydropower plant

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte zjednodušený návrh malé vodní elektrárny (MVE) v Letohradě

Cíle bakalářské práce:

-Rešerše stavu MVE v ČR

-výpočet hlavních výkonových parametru vodní turbíny MVE

-ekonomické zhodnocení investice

Seznam odborné literatury:
Melichar,J.: Malé vodní turbíny, ČVUT Praha 2003

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 6.11.2008

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

V bakalářské práci je popsán vývoj a současný stav malých vodních elektráren v České republice. Jsou v ní shrnuty další možnosti využití zbývajících vhodných lokalit pro výstavbu nebo obnovu. Dále se práce zabývá malou vodní elektrárnou v Letohradě. Popisuje hydrologické podmínky a provedení stávajícího vodního díla. Práce pokračuje výpočtovou částí, která porovnává dvě varianty strojně technologického řešení. První varianta počítá s instalací jedné velké turbíny, druhá řeší umístění tří menších turbín se shodnými parametry. Po vyhodnocení je zjištěno, že hydroenergetický potenciál toku efektivněji využije první varianta. V závěru jsou provedeny výpočty tržeb za vyrobenou energii a návratnosti investice.

ABSTRACT

The basic aim of the Bachelor Thesis is the detailed description of the development and the current state of hydraulic power plants in the Czech Republic. Moreover, there are mentioned other possibilities of the usage and suitable localities for the build-up or renewal. Furthermore, the work deals with a small hydraulic power plant in Letohrad. It describes hydrological conditions and the design of the existing hydro-electric plant. The thesis continues with the computational part which compares two versions of the mechanical and the technological solution. The first version takes into account the installation of one turbine and the second one focuses on the placement of three turbines with the same parameters. After the interpretation it has been found that the hydroenergetical potential of flow is more efficient in the first alternative. In the conclusion, there are revenue calculations for produced energy and the recovery of investment.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydrologický potenciál
Průtok
Spád
Účinnost
Univerzální charakteristika
Vodní turbína
Výkon

KEYWORDS

Hydropower potential
Flow
Declivity
Effectivity
Universal characteristics
Hydraulic turbine
Output

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, J. Malá vodní elektrárna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Malá vodní elektrárna vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom z odborných konzultací a používal jsem odbornou literaturu a prameny, uvedené v seznamu.

V Letohradě 19. května 2009

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále pak zaměstnancům SPŠ a SOU Letohrad za vstřícný přístup při poskytování informací a technické dokumentace.

Obsah

1. Úvod.....	12
1.1 Historie – vývoj vodních motorů.....	13
1.2 Rozvoj malých vodních elektráren v ČR.....	15
1.3 Využívání MVE v České republice.....	16
2. Dělení vodních elektráren.....	17
3. Hydroenergetický potenciál na území České Republiky.....	21
3.1 Hydroenergetický potenciál vodních toků.....	21
3.2 Další možnosti využití hydropotenciálu.....	22
4. Koncepční řešení turbín v MVE.....	24
5. Výběr vhodného turbosoustrojí.....	25
6. Výchozí stav MVE letohrad.....	26
6.1 Popis lokality.....	26
6.2 Hydrologické poměry.....	28
6.3 Historie MVE Letohrad.....	29
6.4 Účel a popis vodohospodářského díla.....	30
6.5 Hlavní technické parametry MVE.....	32
6.6 Popis instalované Kaplanovy turbíny.....	33
7. Hydroenergetický potenciál na 65,4 říčním kilometru Tiché Orlice.....	35
7.1 Teoretický hydroenergetický a elektroenergetický potenciál.....	35
7.2 Reálně využitelný hydroenergetický a elektroenergetický potenciál	35
8. Návrh turbín pomocí univerzální charakteristiky a odhad roční výroby elektrické energie pro dvě různá technologická uspořádání.....	37
8.1 Výběr typu vodní turbíny.....	37
8.2 Výpočet základních parametrů turbíny T_1	39
8.3 Výpočet základních parametrů turbíny T_{1-3}	40
8.4 Odhad roční výroby elektrické energie turbínou T_1	41
8.5 Odhad roční výroby elektrické energie třemi turbínami	42
8.6 Určení efektivnějšího způsobu výroby elektřiny v MVE	43
9. Přibližné určení tržeb a doby návratnosti investic.....	47
Závěr.....	50
Seznam použitých zdrojů.....	51
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	52

1. Úvod

Lidstvo bylo od počátku svojí existence závislé na obnovitelných zdrojích energie. Mezi tyto se řadí také energie vodní, která je v historii nejdéle technicky využívanou formou energie v přírodě a hraje významnou roli i dnes. Vodní pohony v uplynulých staletích prošly rozsáhlými vývojovými změnami. V současné době máme k dispozici velmi účinné vodní motory, které zajišťují ekonomickou a efektivní přeměnu energie vody na energii mechanickou a následně elektrickou. Stavba nových a rekonstrukce stávajících malých vodních elektráren (dále MVE) se v posledních letech opět dostává do popředí zájmu odborníků i veřejnosti.

Česká republika trpí nedostatkem obnovitelných přírodních zdrojů energie. Zásoby pevných fosilních paliv se blíží ke svému vyčerpání, ropa a zemní plyn se musí dovážet za vysoké ceny. Nové tepelné elektrárny se již nebudují vzhledem k omezené těžbě tuhých fosilních paliv v ČR. Provoz už stojících tepelných bloků má trvale nepříznivý dopad na životní prostředí. Nevyhnutelná orientace na další rozvoj jaderné energetiky s sebou přináší neoddiskutovatelná rizika. Avšak nelze počítat se snižováním spotřeby užitkové energie, která je v civilizované společnosti jedním z měřítek jejího dalšího rozvoje.

Energie, která se získává z vodních toků, není v bilanci naší energetiky zdaleka rozhodující ani netvoří významný přínos. Je však velmi cenným, ale stále málo využitým obnovitelným zdrojem. Výkon vodních elektráren tvoří přibližně 17 % celkového instalovaného výkonu u nás. Na výrobě se podílí zhruba 4 %. Česká republika je svojí geografickou polohou (leží na rozvodí tří moří) přímo předurčena k využití vodní energie v MVE.

Využití hydroenergetického potenciálu našich toků má řadu nepopíratelných výhod:

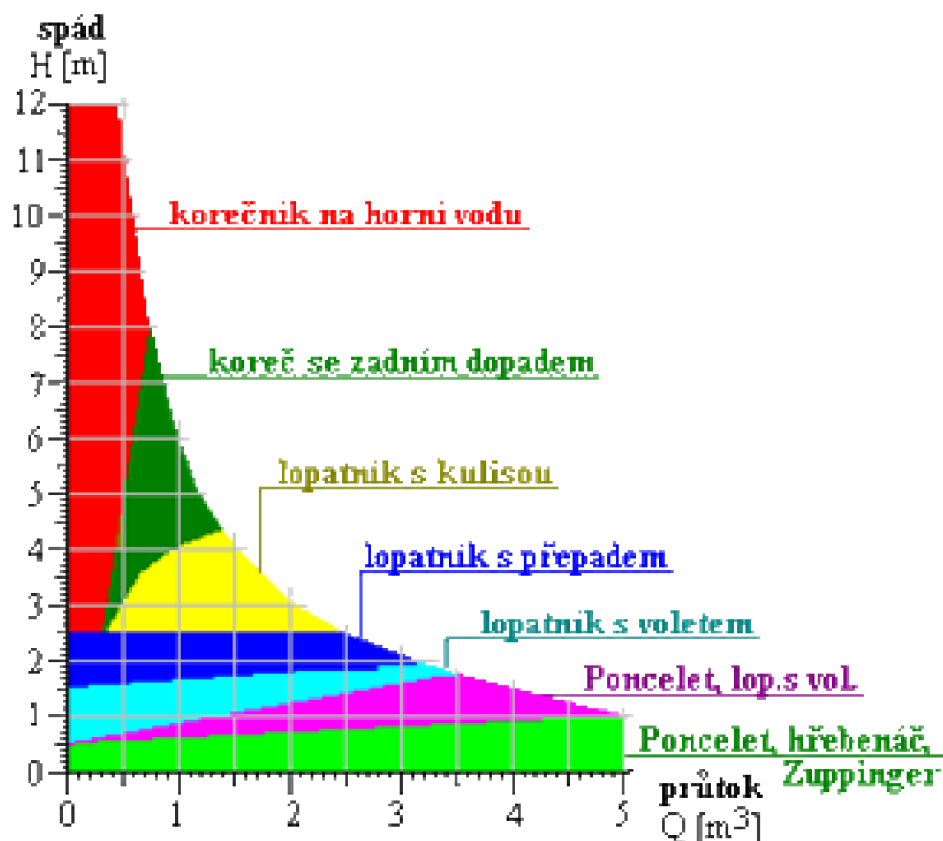
- jedná se o prakticky nevyčerpatelný zdroj energie, který šetří úměrné množství paliva a náklady na jeho těžbu
- jde o čistý zdroj energie neznečišťující ovzduší a je bezodpadový
- jde o vlastní zdroj, jehož užívání je zcela nezávislé na zahraničí
- má nízké investiční náklady a velmi nízké náklady provozní
- vyznačuje se malou poruchovostí, dlouhou životností a vysokým počtem provozních hodin v roce
- vyžaduje nízký počet provozních pracovníků, který se s uplatněním automatického řízení snižuje až k bezobslužnosti
- při technicky správném a citlivém řešení nezpůsobuje devastaci životního prostředí, přičemž po celkovém zhodnocení všech aspektů bývá dílo vesměs ekologicky přínosné
- MVE jako malé bodové zdroje jsou rozptýleny po celém území významně nezatěžují přenosovou soustavu

1.1 Historie - vývoj

Vývoj vodních motorů lze sledovat po dobu více než 22 století. Již ve 2. století před naším letopočtem se začali konstruovat vodní kola s vertikálně umístěnou hřídelí. Využívali se pro pohon mlýnských kamenů. Během 1. století př. n. l. se objevilo kolo s horizontální hřídelí opět používané pro pohon mlýnských kamenů. Tento vynález je přisuzován římskému staviteli Vitruviu Polliovi.

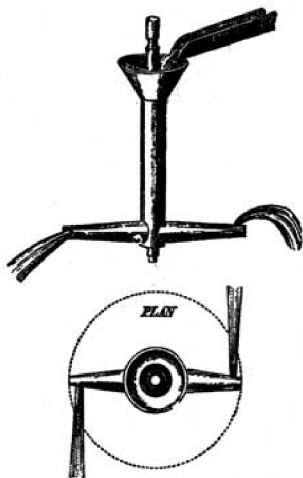
Vodní energie se postupně ve stále větší míře uplatňovala jako náhrada manuální práce. Během několika století se vodní kolo vyvinulo ve všeobecně používaný energetický stroj. Ve středověku se začaly objevovat konstrukční vylepšení zvyšující výkon vodních kol. Ve 14. století byly vyvinuty tzv. korečníky, tj. vodní kola se svrchním nátokem. Došlo ke zvýšení výkonu až na dvojnásobek. V 16. století se stavěla vodní kola o průměru až 12 metrů.

Teprve v 18. století jsou pokusy při realizaci vodních kol podloženy teoretickým, experimentálním a modelovým zkoumáním proudění. Francouzský vojenský inženýr Jean Victor Poncelet zkonstruoval vodní kolo se spodním nátokem, které dosahovalo účinnosti téměř 70%. Dosáhl toho velmi jednoduchým způsobem – rovné lopatky nahradil zakřivenými. V tomto období dosáhli vodní kola nejvyššího vývojového stupně.

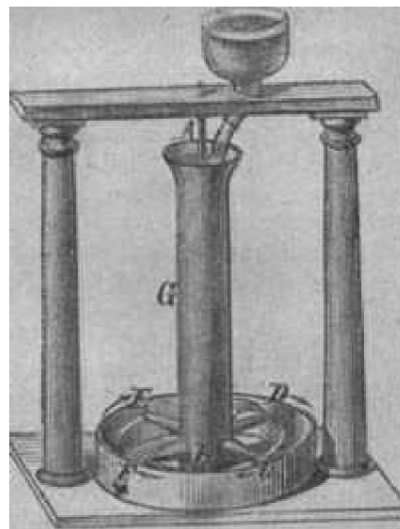


graf č.1 Použitelnost vodních kol [10]

Současně se však objevovala nová řešení vodních motorů např. Barkerův mlýn, Segnerovo kolo.



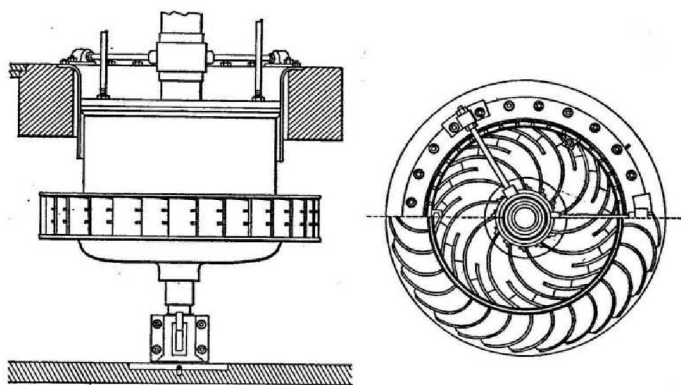
obr.1 Barkerův mlýn (www.memagazine.org)



obr.2 Segnerovo kolo [10]

Segnerovo kolo je vlastně přetlaková turbína bez rozváděče s odstředivým průtokem. Voda se přivádí svislou rourou do hlavice s několika dýzami. Hlavice tvoří oběžné kolo. Voda prudce vytékající ze zakřivených dýz vytváří reakční sílu, která otáčí oběžným kolem. Stroj nemá rozváděcí zařízení, tím dochází k nežádoucímu výření, jeho účinnost dosahuje 40%. Dověšení rozvoje dynamiky ideální kapaliny nastalo po roce 1750 zásluhou Leonarda Eulera a také Daniela Bernoulliho.

S využitím nových poznatků zdokonalil profesor Claude Bourdin Ponceletovo kolo a v roce 1826 postavil stroj, který jako první pojmenoval názvem „turbína“ (z latinského turbo-otáčet). Tento vodní motor se stal předobrazem současných přetlakových turbín. Již v následujícím roce 1827 sestrojil Bourdinův student Benoit Fourneyron první centrifugální (odstředivou) turbínu o výkonu 6 koňských sil. V roce 1835 Fourneyron zkonstruoval jednotku o výkonu 40 koní a 2300 ot/min s účinností až 80 %. Stroj však vykazoval určité nedostatky plynoucí z radiálního výstupu vody z oběžného kola a obtížně se regulovala.



obr.3 Fourneyronova turbína (clients.newel.net)

Následovně došlo k vývoji vodních turbín, které se dnes nejčastěji používají. Byly to turbíny pro střední a vysoké spády američanů Jamese Bicheno Francise (1849) a Lestera Allena Peltona (1880) a také profesora německé vysoké školy technické v Brně Viktora Kaplana, který patentoval axiální přetlakovou turbínu pro nižší spády a vyšší průtoky (1919).

1.2 Rozvoj malých vodních elektráren v České republice

V minulých letech docházelo k rušení funkčních malých vodních elektráren, které vyplynulo z tehdejších politických a hospodářských rozhodnutí. Tato malá vodní díla sloužila potřebám obcí, podniků nebo jednotlivců. Z důvodu vyšších specifických investičních nákladů vůči nákladům velkých tepelných elektráren se velmi obtížně nebo vůbec nedařilo prosazovat využití vodní energie na nově budovaných nebo rekonstruovaných jezích.

Ze statistických údajů vyplívá, že v roce 1933 fungovalo v Čechách a na Moravě celkem 11700 malých vodních elektráren. V roce 1953 se jejich počet snížil na 4392, v roce 1966 na 450 a na konci sedmdesátých let jich bylo v provozu pouhých 109. Zrušení MVE bylo většinou provedeno jen administrativně, bez demontáže soustrojí a bez předání budovy za účelem jiného využití. Postupně docházelo k devastaci nejen strojovny elektrárny, ale také náhonů, jezů atd. Přesto však lze na řadě míst opět zahájit výrobu elektřiny s relativně malým objemem finančních prostředků.

S příchodem osmdesátých let se začal měnit přístup k využívání vodní energie. Ukázalo se, že vyřazování dalších elektráren z provozu je škodlivé a nesmyslné. Započala renesance MVE.

Vývoj výstavby malých vodních elektráren v ČR dokládá tabulka č.1. Ukazuje vzestupný trend po roce 1985, ale také částečný pokles zájmu v posledních devíti letech. Příčinou je postupné obsazování výhodnějších lokalit. Převážná část ještě nevyužitého hydroenergetického potenciálu totiž leží v oblasti malých spádů (okolo 2 m).

Rok	Počet	Instalovaný výkon [MW]	Roční výroba [MWh]
1933	11 700	150	200 000
1980	135	10	30 000
1985	250	20	80 000
1990	900	65	170 000
1995	1 200	200	500 000
2000	1 352	268	660 000
2001	1 380	275	710 000

tabulka č.1 Počet MVE v ČR v letech 1933 až 2001

V roce 2004 bylo v provozu více než 1400 jednotek.

Opětovný zájem o MVE je vyvolán změnou energetické situace a potřebou zřizovat nezávislé malé zdroje elektrické energie. Základním předpokladem je úsporné technické řešení, které klade minimální nároky na obsluhu a údržbu.

1.3 Využívání malých vodních elektráren v ČR

V České republice bylo v roce 2005 vyrobeno v MVE 1,071 TWh elektřiny, což znamená oproti roku 2004 meziroční zvýšení o 18,5 %.

Pořadí	Země	Výroba elektřiny		Meziroční růst [%]
		2004 [TWh]	2005 [TWh]	
1.	Itálie	9,765	9,895	1,3
2.	Německo	8,378	8,485	1,3
3.	Francie	7,500	6,700	-10,7
4.	Rakousko	4,198	3,999	-4,7
5.	Španělsko	4,751	3,814	-19,7
6.	Švédsko	3,493	3,474	-0,5
7.	Finsko	1,240	1,240	0
8.	Česká republika	0,904	1,071	18,5
9.	Polsko	0,861	1,035	20,2
10.	Slovinsko	0,433	0,379	-12,2
11.	Řecko	0,315	0,327	3,9
12.	Portugalsko	0,501	0,280	-44,1
13.	Slovensko	0,247	0,250	1,2
14.	Velká Británie	0,283	0,467	65
15.	Belgie	0,189	0,173	-8,4
16.	Lucembursko	0,079	0,075	-4,8
17.	Litva	0,066	0,066	0
18.	Lotyšsko	0,062	0,062	0
19.	Irsko	0,058	0,058	0
20.	Maďarsko	0,034	0,029	-14,7
21.	Estonsko	0,022	0,025	11,6
Celkem EU		43,404	41,925	-3,4

tabulka č.2 Pořadí Zemí Evropské unie podle výroby elektřiny v MVE

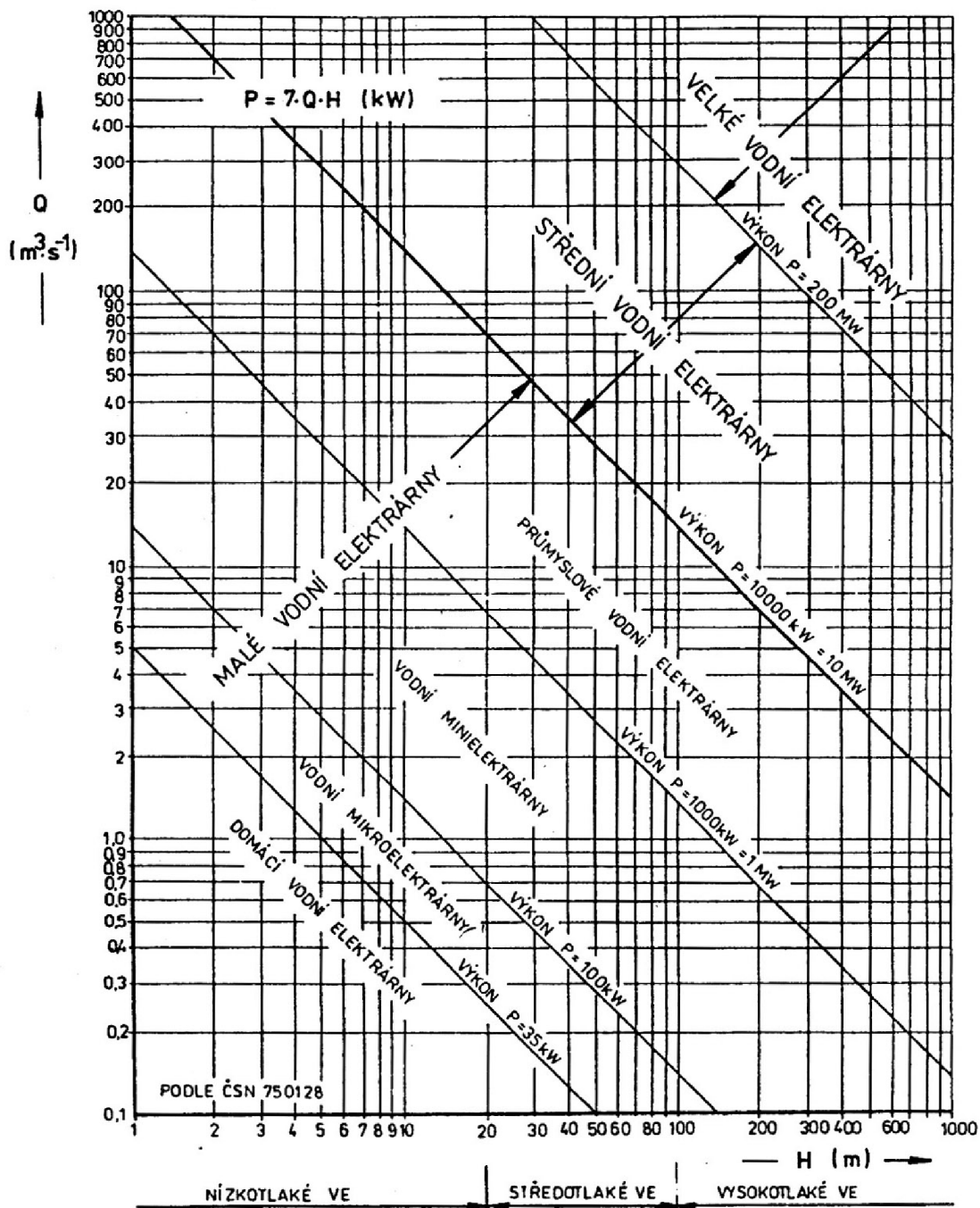
ČR je v žebříčku využívání vodní energie v malých vodních elektrárnách na 8 místě mezi evropskými zeměmi a druhá nejlepší mezi zeměmi, které vstoupili do Evropské unie v roce 2004. Podle odhadů odborníků je technicky využitelný potenciál asi 1,57 TWh/rok. Zatím je tedy využit na 68 %. Velkou výhodou pro nás je dlouhá tradice a bohaté zkušenosti v energetickém využití menších vodních toků a slušná nabídka kvalitní technologie od tuzemských výrobců.

2. Dělení vodních elektráren

Vodní elektrárny lze třídit podle různých hledisek. Uvedené třídění odpovídá normě ČSN 75 0128 „Vodní hospodářství – Názvosloví využití vodní energie“ společně s normou ČSN 73 6881 „Malé vodní elektrárny – Základní požadavky“.

V souladu s ČSN 75 0128 se vodní elektrárny dělí na:

- velké s instalovaným výkonem nad 200 MW
- střední s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW
- malé s instalovaným výkonem do 10 MW



graf č.2 Dělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu [3]

Rozdělení malých vodních elektráren z výkonového hlediska není jednoznačné. Podle ČSN 75 0128 MVE dělí na:

- průmyslové s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW
- minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW
- mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW
- domácí s instalovaným výkonem do 35 kW

Ve shodě s ČSN 73 6881 se malé vodní elektrárny dělí podle celkového dosažitelného výkonu do čtyř kategorií.

Kategorie MVE	Výkon [kW]
I a	nad 1000
I b	nad 500 do 1000
II	nad 100 do 500
III	nad 35 do 100
IV	do 30

tabulka č.3 Dělení MVE podle celkového dosažitelného výkonu

Pro úplnost je uveden stručný výčet dalšího třídění vodních elektráren podle ostatních hledisek. Specifické řešení vodního díla je v úzké vazbě s typem turbíny a jejím hydraulickým a konstrukčním provedením. Třídění:

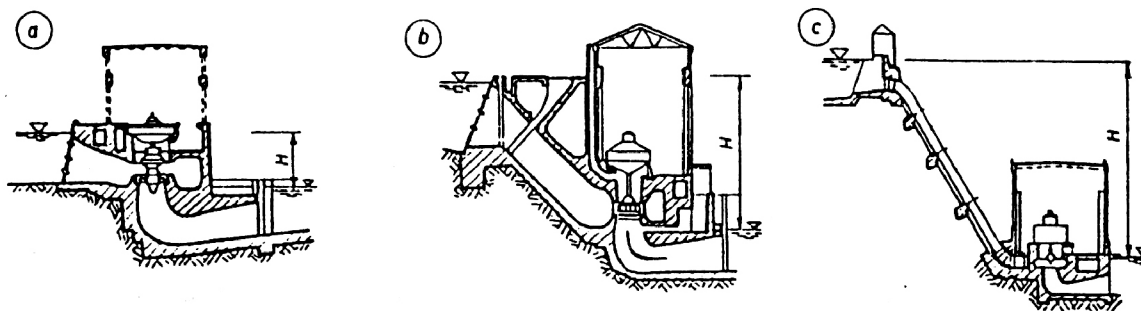
Podle získaného spádu (podle způsobu soustředění vodní energie a přívodu vody k turbíně):

- přehradové - spád vytvořen přehradou
- zdržové (jezové) - spád je vytvořen jezem
- derivační - využívá umělé vedení vody mimo vodní tok pomocí beztlakového nebo tlakového derivačního přivaděče (kanál, štola, potrubí)
- přehradně derivační - kombinace dvou výše uvedených způsobů
- bez vzdouvací stavby

Podle velikosti využívaného spádu (polohové energie vody):

- nízkotlaké - využívající spád do 20 m
- středotlaké - využívající spád od 20 m do 100 m
- vysokotlaké - využívající spád nad 100 m

Toto uvedené dělení je významné z hlediska použití vhodného typu vodního motoru (turbíny).



obr.4 Dělení MVE podle spádu: a) nízkotlaká, b) středotlaká, c) vysokotlaká [2]

Podle charakteru pracovního režimu (způsobu provozu):

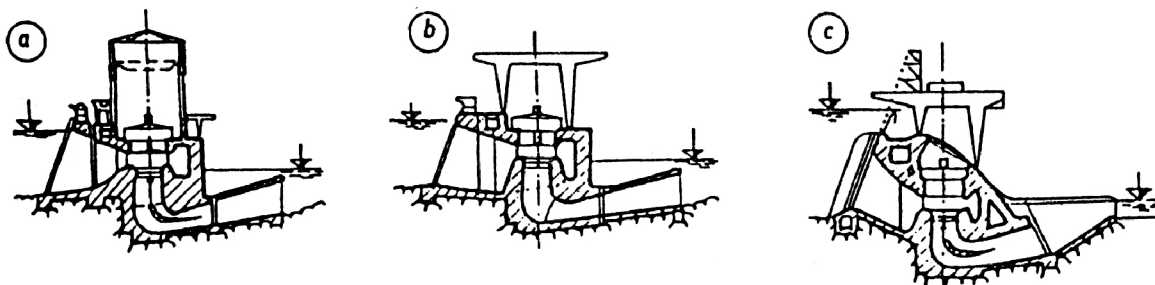
- průtočné - neovlivňují výrazně přirozený průtok toku, nemají akumulaci nádrží
- akumulaci (špičkové) - mají řízený odběr vody z akumulaci nádrže vytvářející spád (patří k nim i přečerpávací elektrárny)

Podle umístění strojovny:

- hrázové - strojovna u hráze, v tělese hráze, v přelivových bocích
- jezové - strojovna v těsné blízkosti jezu nebo přímo ve spodní stavbě
- věžové - strojovna ve sruženém objektu (věžovém) umístěném v nádrži nebo zdrži, případně v břehové části
- břehové - strojovna u jezu v jeho břehové části
- členěné - strojovna je rozdělena na několik částí, například na obou březích
- pilířové - strojovna je v pilířích přelvané hráze nebo jezu
- plovoucí - soustrojí umístěné např. na pontonu
- individuální - strojovna v rekonstruovaném objektu například bývalého mlýna

Podle uspořádání strojovny:

- kryté - s budovou strojovny
- nekryté - bez budovy strojovny, s odnímatelnými kryty
- polokryté - s minimální výškou strojovny
- přelvané - strojovna pod přelivy jezu nebo hráze
- sružené - ve spodní stavbě jsou umístěny nejen soustrojí, ale např. i výpusti



obr.5 Typy jezových MVE: a) břehová, b) pilířová, c) přelvaná [2]

Podle řízení provozu:

- s ručním ovládním
- automatizované
- částečně automatizované

Podle provozovatele:

- elektrizační soustavy - zapojeny do elektrizační soustavy a pracují zejména podle jejich potřeb
- závodní - zapojené do elektrizačních soustav, ale sloužící převážně pro oblastní účely provozovatele, kterým je subjekt mimo odvětví energetiky
- soukromé - zapojeny do vyčleněné elektrizační sítě, případně i elektrizační soustavy

Podle zapojení:

- MVE zapojené v celostátní nebo místní energetické soustavě, s asynchronními alternátory, bez regulace výkonu a frekvence, s jednoduchými vodními systémy bez akumulčních nádrží
- MVE schopné odděleně pracovat od elektrizační soustavy, většinou se synchronními alternátory, s automatickým ovládním, vybavené regulací frekvence i výkonu; mají povahu záskokových zdrojů pro spotřebiče, které musí být zásobeny elektrickou energií i při případném přerušení dodávky elektřiny z veřejné sítě
- mikro zdroje a mobilní zdroje pracující odděleně i s nenormalizovaným napětím, popřípadě stejnosměrným proudem pro spotřebiče; slouží pro ohřev vody, vytápění rodinných domků, rekreačních objektů apod.; jsou to zdroje s racionalizační činností organizací a jednotlivců, s cílem snížit spotřebu topné nafty, uhlí a elektřiny z veřejné sítě

[2], [3]

3. Hydroenergetický potenciál na území České republiky

Rozvoj hydroenergetiky v MVE od roku 1990 doznal výrazného pokroku. Došlo k významnému posunu mezi energeticky využitými a nevyužitými lokalitami. Hodnota celkového hydropotenciálu České republiky (cca 1500 GWh/rok) je v současnosti využita z přibližně 68 %. Pro zpracování je tedy k dispozici zbývajících 32 %, tento potenciál má již výrazně horší hydrologické podmínky. Z toho vyplývá, že ekonomie u budoucích realizací se bude vyznačovat delší dobou návratnosti investic a tím také nižším zájmem investorů.

Nevyužitý hydroenergetický potenciál lze podle četnosti lokalit na vodních tocích a pro získaný spád rozdělit do tří skupin.

Spád [m]	Četnost lokalit [%]
méne než 5	35
od 2 do 5	55
více než 5	10

tabulka č.4 Přehled četnosti využitelných lokalit se získaným spádem pro MVE

Udávaná hodnota celkového hydropotenciálu představuje teoreticky plné pokrytí toků stávajícími a nově vybudovanými vzdouvacími objekty. V současnosti však povolují rozhodující vodoprávní orgány stavby nových jezů jen velmi sporadicky. Řešením je tedy hledat jezové stupně, které dosud nejsou energeticky využity, a bývalá vodní díla, které je možné obnovit.

3.1 Hydroenergetický potenciál vodních toků

Vodní toky v České republice řídí celkem 5 správ. Jsou to: Povodí Labe, Povodí Vltavy, Povodí Ohře, Povodí Moravy a Povodí Odry. Od roku 2001 to jsou státní podniky (dříve akciové společnosti), které vedou veškerou legislativu provozu, užívání a využívání toků. Hydroenergetický potenciál je rozložen a využíván nerovnoměrně, je to způsobené danými hydrologickými podmínkami území.

Povodí	Výkon [MW]	Výroba [GWh/rok]
Labe	114	420
Vltava	164	430
Ohře	78	300
Odra	56	100
Morava	100	250
Celkem	512	1500

tabulka č.5 Technicky využitelný hydroenergetický potenciál v MVE všech povodí v ČR

V tabulce č.6 je uveden přehled procentuálního využití stávajícího potenciálu z hlediska objemu výroby u vybraných toků. Zhruba ze dvou třetin jsou říční toky obsazeny, tomu však nemusí odpovídat optimální využití. Zbylá třetina volných lokalit disponuje pouze nízkými a extrémně nízkými spády (spád menší než 2 m). V neprospěch drobných investorů také hraje fakt, že výhodnější lokality ze zatím nevyužité třetiny si rezervují Správy toků pro svoje investice.

Povodí									
Labe	Vltava	Ohře	Odra	Morava					
Labe	90%	Vltava	90%	Ohře	90%	Odra	50%	Morava	70%
Černá Nisa	65%	Malše	80%	Bílina	70%	Opava	55%	Bečva	70%
Divoká Orlice	70%	Černá	100%	Ploučnice	90%	Moravice	50%	Strhanec	90%
Doubrava	65%	Lužnice	50%	Rolava	80%	Ostravice	65%	Třebůvka	50%
Chrudimka	65%	Mže	40%	Rotava	75%	Oíše	45%	Dyje	70%
Jizera	85%	Sázava	70%	Kamenice	85%	Bělá	60%	Svratka	80%
Kamenice	80%	Otava	40%	Blšanka	60%	Mohelnice	45%	Jihlava	60%
Loučná	75%	Radbuza	40%	Bystrá	65%	Olešnice	50%	Svitava	70%
Lužická Nisa	80%	Úslava	20%	Flájský potok	80%	Lomná	45%	Křetínka	40%
Novohradka	65%	Berounka	70%	Skřiváň	70%	Stonávka	45%	Oslava	50%

tabulka č.6 Procentuální využití stávajícího potenciálu u vybraných toků

3.2 Další možnosti využití hydropotenciálu

Kromě nejčastějšího a nejběžnějšího využívání energie stavbou nových MVE se nabízejí i další možnosti získání energie:

1. Využití retenčních nádrží a rybníků, případně jiných akumulčních nádrží

Výstavbu můžeme zvažovat tam, kde je možnost získání vhodného rozdílu hladin s málo se měnícím spádem a průtokem vody. V ČR je zhruba 20 000 rybníků s celkovou plochou přes 50 000 ha. Jejich energetické využití je zatím minimální a potýká se s množstvím dosud nevyřešených problémů. Už před více než deseti lety bylo vypracováno několik studií, které zkoumali možnost energetického využití u zhruba 220 rybníků. Závěry studií vyjádřili zásadní hlediska pro budování MVE na rybnících. Vyplývala z nich nutnost rozdílného přístupu k instalacím malých vodních elektráren s ohledem na produkci ryb a nutnost zvažovat všechny ekologické a ekonomické aspekty.

Z 220 sledovaných rybníků bylo prozatím využito 20 %. Předpokládaný využitelný výkon na cca 200 nádržích je odhadován na 4000 kW.

2. Využití vodárenských objektů, vybudovaných pro účely zásobování pitnou vodou

Zde je také možné získat téměř konstantní spády a průtoky. Tento způsob realizace dlouho vyvolával obavy z možné kontaminace vody ropnými produkty. Moderní technologie s použitím samomazných ložisek už tyto problémy vyřešila. V současnosti jsou využity desítky vodárenských nádrží a jejich další výstavba pokračuje. Jednoznačným plusem těchto realizací je jednoduché zabudování do objektu a z toho plynoucí malá investice na stavební část, tím se dosáhne příznivé návratnosti investice.

3. Rekonstrukce MVE se zastaralou technologií

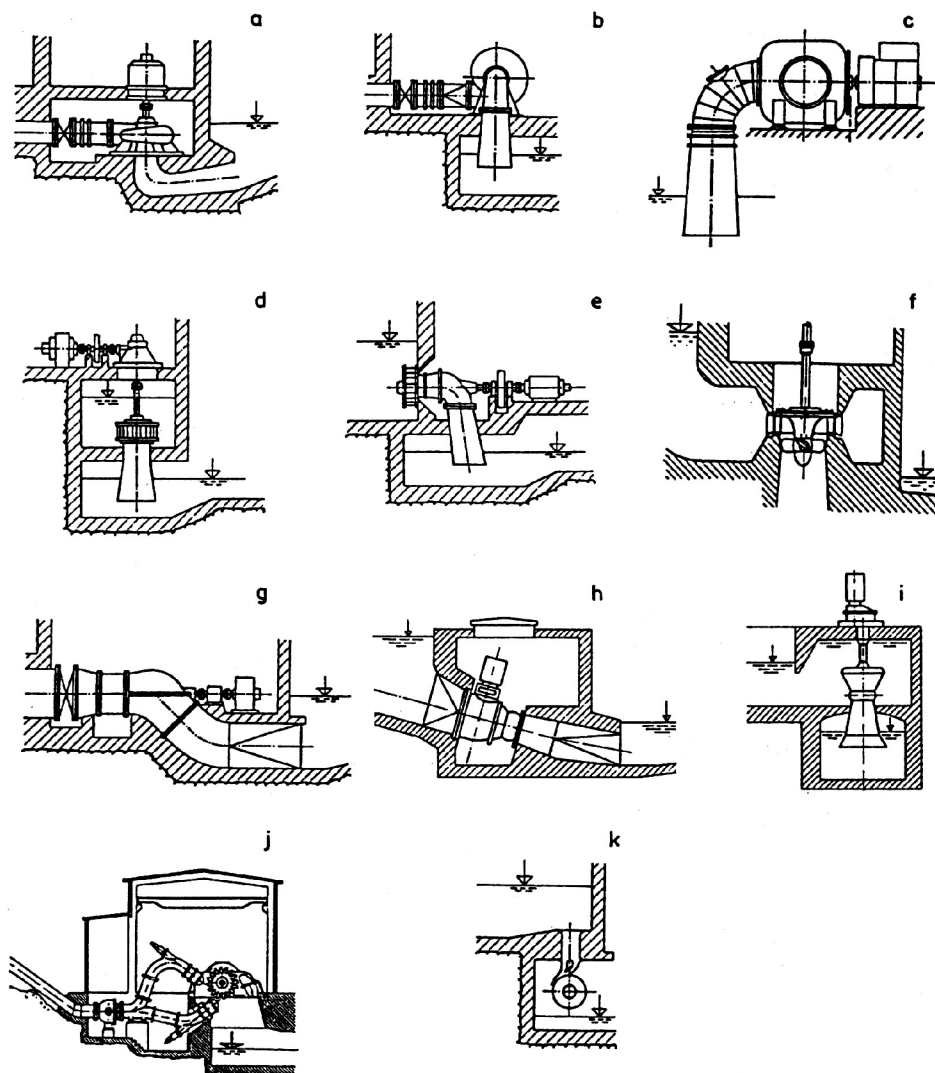
Značná část elektráren je provozována se soustrojím z let 1920 až 1950. Soustrojí vykazují v průměru o 15 % nižší účinnost než moderní technologie. Staré MVE také převážně nevyužívají optimálně hydropotenciál vlivem nedokonalého provozního zabezpečení (automatika, regulace). Tyto realizace nemuseli v době svého uvádění do provozu úplně využívat svůj hydropotenciál, ale byly většinou projektovány pouze na výkon, který požadoval provozovatel.

4. Koncepční řešení turbín v MVE

Turbína vyžaduje vhodné projekční začlenění do malé vodní elektrárny. Konstruktivní uspořádání dnes obvykle používaných malých vodních motorů vychází z osvědčených a dlouholetou praxí ověřených principů hydraulického řešení. Nová nekonvenční řešení jsou většinou modifikacemi známých typů turbín, popřípadě se jedná o aplikace zkušeností z příbuzných oborů proudových strojů.

Vstupní a výstupní partie turbíny ovlivňují celkovou účinnost energetické přeměny ve vodním díle. Zásady řešení přívodu a odvodu vody jsou obecnějšího charakteru, konkrétní typ oběžného kola je výrazně neovlivňuje.

U přetlakových turbín zařizuje odvod vody od oběžného kola v podstatě difuzor, v němž se rychlost proudění postupně plynule snižuje. U rovnotlakých turbín se odvod vody řeší jako skříň, která zachytává a odvádí vodu prošlou z oběžného kola. Skříň zároveň tvoří nosnou konstrukci uložení oběžného kola.

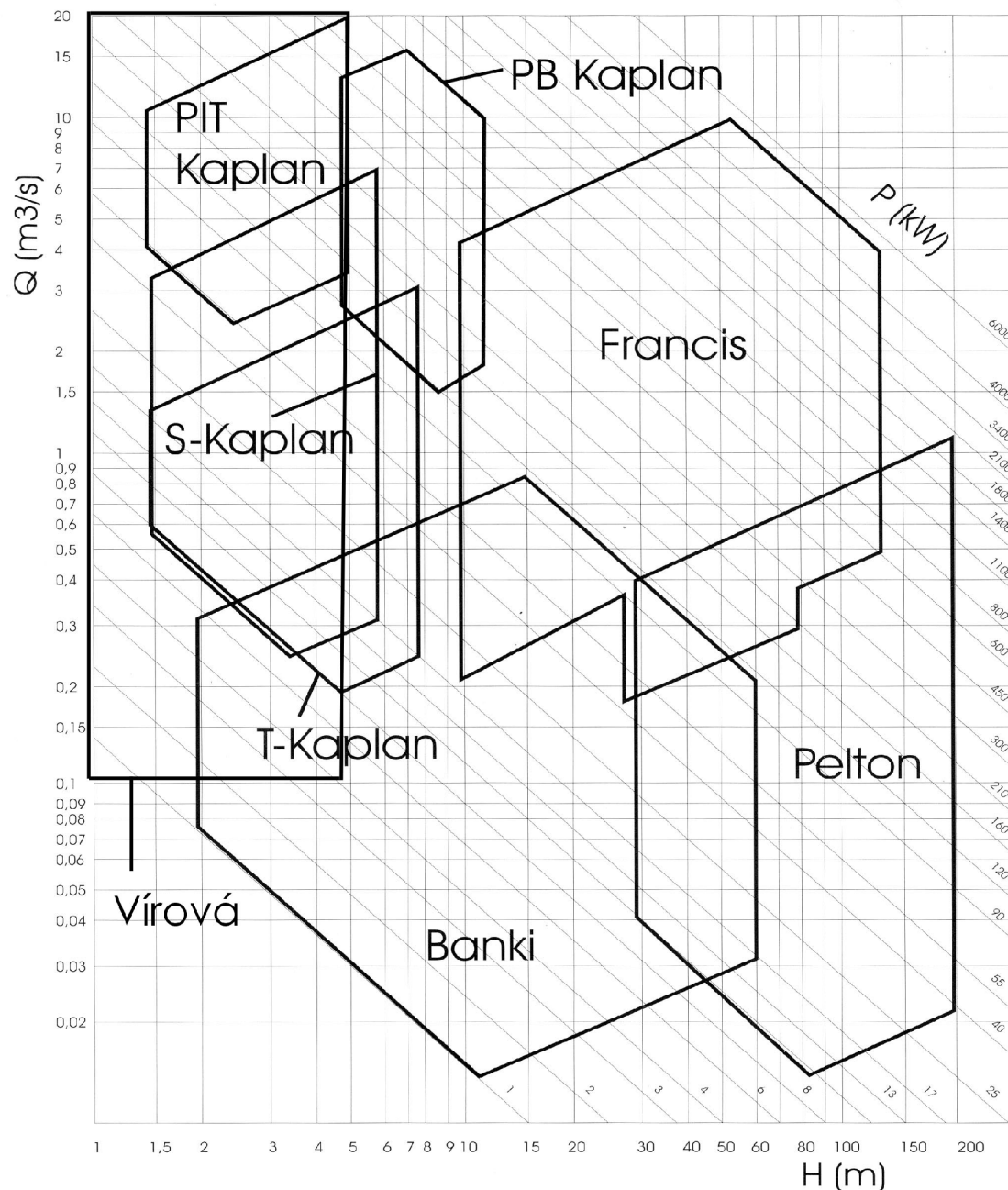


obr.6 Obvyklá koncepční řešení turbín pro MVE : a) vertikální spirálová, b) horizontální spirálová, c) horizontální kotlová, d) vertikální kašnová, e) horizontální kašnová, f) vertikální s betonovou spirálou, g) h) i) přímotoká, j) horizontální se dvěma dýzami, k) s dvojnásobným průtokem [3]

5. Výběr vhodného turbosoustrojí

Problematikou výběru vhodné technologie se zabývají projektanti malých vodních elektráren. Je však užitečné umět se orientovat alespoň v základní charakteristice typů vodních turbin dle průtoků a spádů.

Teorie vodních turbin je již na vysokém stupni vývoje, proto lze stěží očekávat výrazné zdokonalování (pro běžné průtoky a spády). Vývoj se ubírá k prefabrikaci částí MVE a zejména k instalaci kompaktních soustrojí, tím dojde k omezení nákladných montáží.



graf č.3 Základní charakteristika vodních turbin, jejich dosažitelný výkon P a oblasti použití v závislosti na dispozičních vodního zdroje

vysvětlivky: Q – spád, H – průtok

PIT, PB, S, T – různé typy kaplanovy turbíny [7]

6. výchozí stav MVE letohrad

6.1 Popis lokality

Zeměpisně jsou vodní dílo a malá vodní elektrárna Letohrad situovány do severovýchodní části Pardubického kraje, do ústeckého regionu a spádové oblasti města Letohrad. Jedná se o lokalitu, která tvoří přirozené centrum s určitou koncentrací průmyslu a s poměrně vysokou hustotou zalidnění avšak i s rekreačním charakterem. Geologicky se nachází vodní dílo a MVE na pískovci České křídlové tabule a čtvrtohorních šterkopískových nánosech. Profil v místě stavby tvoří vrstva náplavových zemin pod níž jsou zeminy tvořené zvětváním skalního podloží. Hladina podzemní vody koresponduje s úrovní hladiny v toku. Přírodní podmínky jsou rozmanité, převládá podhorský charakter a členitá konfigurace terénu. Nadmořská výška vodního díla je 355 m.

Stavba se nenachází na území národního parku ani CHKO, leží na území významného chráněného přírodního útvaru, jímž je tok Tiché Orlice. Lokalita vyhovuje po všech stránkách i požadavkům na ochranu životního prostředí, z hlediska přístupnosti a možnosti vyvedení výkonu tj. připojení na distribuční soustavu.

Přírodní podmínky lokality jsou rozmanité a konfigurace terénu je výhodná. Klimatické podmínky v této části Orlických hor a povodí Tiché Orlice jsou příhodné a odpovídají klasifikaci mírného podnebí. Dlouhodobý roční úhrn srážek je na úrovni 918 mm. Nejvyšší průměrné teploty v letních měsících dosahují 18 až 20 °C, nejchladnějším měsícem je leden. Lokalita leží v klimatické oblasti MT4 a je charakterizována těmito údaji:

- nejnižší dlouhodobá teplota dle ČSN $t_e = -15\text{ °C}$
- krajina s intenzivními větry
- roční průměrná teplota vzduchu 6,8 °C
- délka topného období pro $t_{em} = 12\text{ °C}$ je 240 dnů
- střední venkovní teplota v topném období $t_{es} = 2,8\text{ °C}$
- denní střední teplota v nejchladnějším měsíci (leden) je -3 °C
- roční úhrn slunečního záření dopadajícího na plochu 1 m² je cca 1000 kWh
- průměrná roční rychlost větru je 3,6 ± 0,5 m/s

V období extrémních klimatických podmínek zamrzá v těchto místech Tichá Orlice téměř pravidelně, ale v důsledku vysoké rychlosti proudění a díky odpadnímu teplu z velkých sídelních aglomerací (zejména Jablonné nad Orlicí a Letohrad) je možno MVE provozovat celoročně.



obr.7 Mapa města Letohrad [5]



Obr.8 Detail výřezu z předchozí mapy s označeným místem, kde se nachází objekt MVE [5]

6.2 Hydrologické poměry

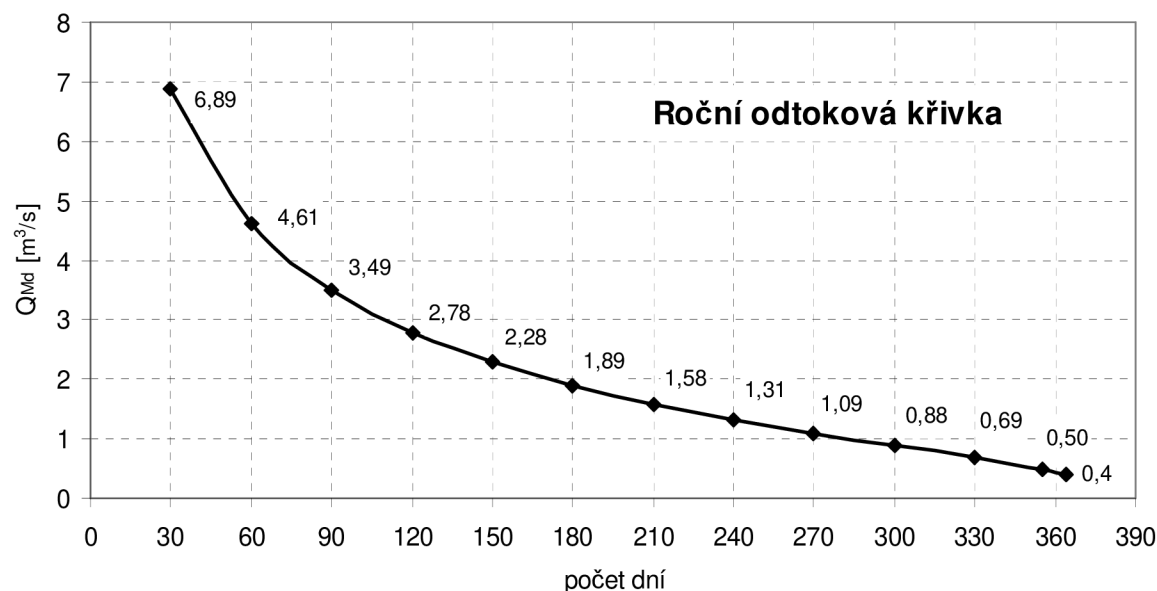
Vodní dílo, u kterého je umístěna malá vodní elektrárna Letohrad a ze kterého bude odebírat vodu, se nachází na 65,381 říčním kilometru Tiché Orlice. V těchto místech odvádí koryto řeky Tiché Orlice vody z celé východní a jihovýchodní části Orlických hor a z části Svitavské vrchoviny. Pramen řeky se nachází u města Králíky – v lokalitě Horní Orlice, v nadmořské výšce 780 m. Přítoky Tiché Orlice na horním toku jsou Lipkovský potok, Těchonínský, Černovický a Orličský potok, který odvádí vody z Červenovodského sedla, dále Čenkovický, Tisecký a Tiscový potok. Hlavním přítokem v horní části Tiché Orlice je říčka Čermenka a v Letohradu (pod jezem MVE Letohrad) je to Lukavický potok. Vzhledem k velkému spádu je na horním toku mnoho jezů.

Hydrologická data:

tok: Tichá Orlice
hydrologické číslo povodí: 1 – 02 – 02 – 023
v profilu: Letohrad – jez v cca 65,4 km
plocha povodí (A): 207,61 km²
průměrná dlouhodobá roční výška srážek (P_a): 918 mm
průměrný dlouhodobý průtok (Q_a): 2,95 m³/s
třída: II

M [dny]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q _{Md} [m ³ /s]	6,89	4,61	3,49	2,78	2,28	1,89	1,58	1,31	1,09	0,88	0,69	0,50	0,4

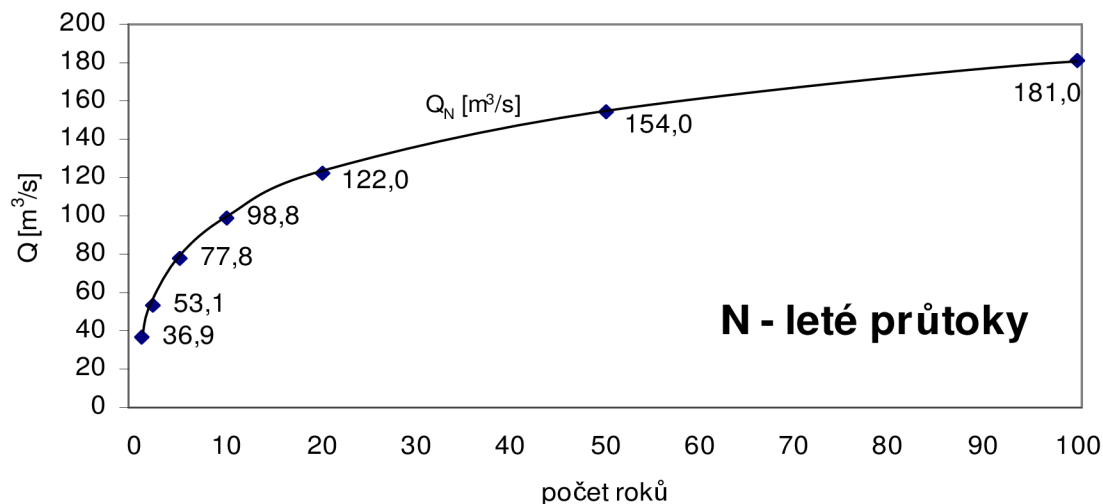
tabulka č.7 M – denní průtoky (Q_{Md}) Tiché Orlice v Letohradu



graf č.4

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
Q _N [m ³ /s]	36,9	53,1	77,8	98,8	122	154	181

tabulka č.8 N – leté maximální průtoky (Q_N) Tiché Orlice v Letohradu



graf č.5

Hydrologická data poskytl Český hydrometeorologický ústav - Pobočka Hradec Králové .

6.3 Historie MVE Letohrad

Původní vodní elektrárna , která se nacházela v lokalitě Letohrad, byla v sedmdesátých letech odstavena a postupně zlikvidována. Po roce 1990 byla zahájena celková rekonstrukce. Podle nového projektu byl zbudován derivační kanál se strojovnou, hrubými česlemi a stavidly. Strojovna měla být osazena třemi vertikálními Kaplanovými turbínami. Dokončení realizace bylo však přerušeno nedořešenými problémy s restitucemi pozemků, kde MVE stojí. Až po roce 2000 bylo možné pokračovat. Naskytla se možnost získat podporu v rámci Státního programu na podporu úspor energie a zvýšení využití obnovitelných a druhotných zdrojů, která však byla podmíněna instalací nového turbosoustrojí od renomovaného výrobce (původní turbíny vyrobily svépomocí SOU Letohrad – současný provozovatel). S novou turbínou byla přiznána státní dotace a projekt byl úspěšně dokončen a spuštěn počátkem roku 2004.



Obr.9 Celkový pohled na MVE Letohrad

6.4 Účel a popis vodohospodářského díla

Účelem stavby MVE je využití hydroenergetického potenciálu řeky Tiché Orlice na jezu v Letohradu. Elektrárna slouží pro výrobu elektrické energie s dodávkou do veřejné sítě, případně pro vlastní spotřebu. Elektrická energie je vyráběna celoročně v závislosti na průtokovém a povoleném maximálním množství vody po odpočtu minimálního zůstatkového množství (sanační průtok) v hodnotě: $Q_S = 0,605 \text{ m}^3/\text{s}$

Rozdělení typu MVE dle ČSN 73 6881:

- podle umístění strojovny: derivační
- podle uspořádání strojovny: krytá
- podle spádu: nízkotlaká
- podle řízení provozu: automatická s občasným dohledem
- podle provozovatele: resortní (veřejná)
- podle instalovaného výkonu: vodní minielektrárna

Malá vodní elektrárna se skládá z 5 podobjektů:

1. jezové zařízení:

- a) spádový stupeň – pohyblivý segmentový jez:
Jedná se segmentový jez kolmý k ose toku o délce 10 m. Segment se vysouvá vzhůru z jezové kapsy. Maximální vzduť jezu je na kótě 356,67 m.n.m. Manipulace se segmentem se provádí ručně.
- b) boční přeliv:
Pevný boční přeliv je v ose toku v délce 20 m.
- c) vtok do náhonu s nápuštěným stavidlem:
Před stavidly jsou umístěny hrubé česle z dřevěné kulatiny.



Obr.10 Stavidla a hrubé česle

2. otevřený náhon:

Jedná se o otevřený zpevněný náhon dlouhý 35 m. Na konci přivaděče před budovou MVE jsou umístěny jemné česle s hrabacím soustrojím. Před česly je stavidlo štěrkové propusti, které ústí do betonové trouby o průměru 600 mm napojené obtokem do odpadního náhonu.



Obr.11 Jemné česle s hrabacím soustrojím

3. budova MVE:

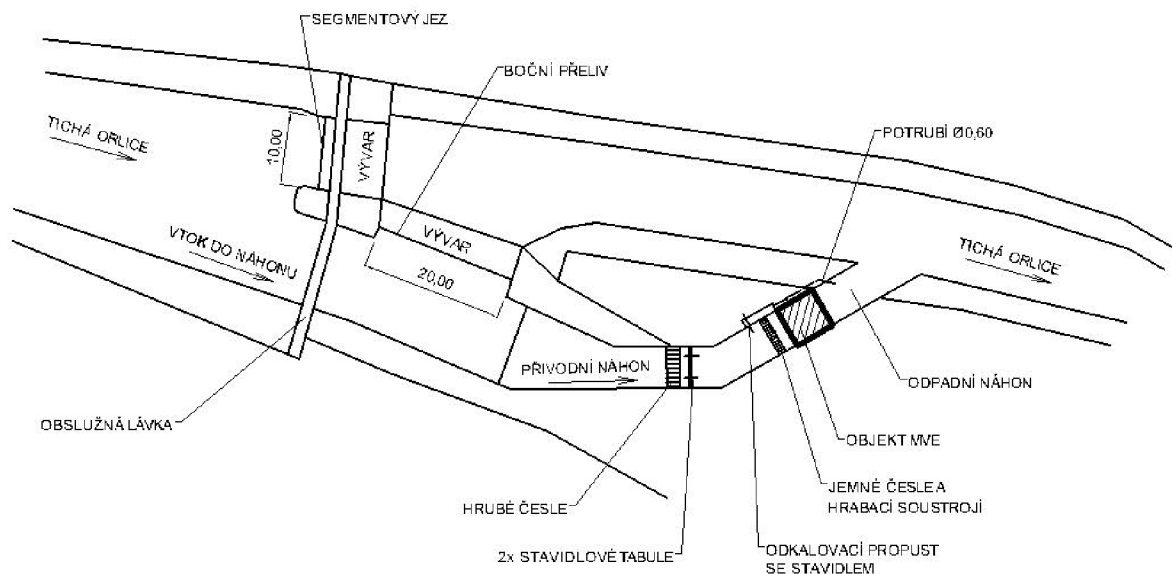
Jedná se o zděný objekt, ve kterém je umístěna jedna Kaplanova turbína a ostatní technologie.

4. odpadní náhon:

Jedná se o otevřené koryto se zpevněným dnem a břehy.

5. přípojka nízkého napětí:

MVE je napojena přípojkou na trafostanici v areálu SOU o celkové délce 270 m.



obr.12 Situační nákres, kótováno v metrech

6.5 Hlavní technické parametry MVE

provozní kóta horní hladiny	356,70 m.n.m.
provozní kóta dolní hladiny	354,41 m.n.m.
návrhový spád	2,29 m
maximální průtok turbínou	2,65 m ³ /s
počet soustrojí	1 ks
typ turbíny	vertikální Kaplanova kašnová turbína
průměr oběžného kola	Ø 1000 mm
jmenovité / průběžné otáčky turbíny	253,8 min ⁻¹ / 615,2 min ⁻¹
převod	řemenový převod plochým řemenem
jmenovité otáčky generátoru	1000 min ⁻¹
výkon	45 kW



Obr.13 Řemenový převod mezi turbínou a generátorem

6.6 Popis instalované Kaplanovy turbíny

Jedná se o vertikální Kaplanovu turbínu se čtyřlopatovým oběžným kolem o průměru 1000 mm se spirálovou kašnou. Stroj, který je pravotočivý při pohledu ve směru toku vody, má za provozu regulovatelné rozváděcí i oběžné lopaty. Nastavení rozváděcích lopat je dáno hladinovou regulací podle horní hladiny. Lopaty oběžného kola jsou pak nastavovány automaticky podle optimální vazby mezi rozváděcím a oběžným kolem. Tato vazba závisí na aktuálním spádu a je naprogramována v softwaru řídicího systému. Rozváděcí lopaty jsou ovládány přes regulační kruh hydraulickým servomotorem, pomocí tlakového oleje z hydraulického agregátu. Oběžné lopaty jsou ovládány servomotorem s elektrickým pohonem, přes táhlo v dutém hřídeli a samomazně uložený přestavný mechanismus.



Obr.14 Regulační prstenec ovládající rozváděcí lopatky pomocí hydraulického pohonu



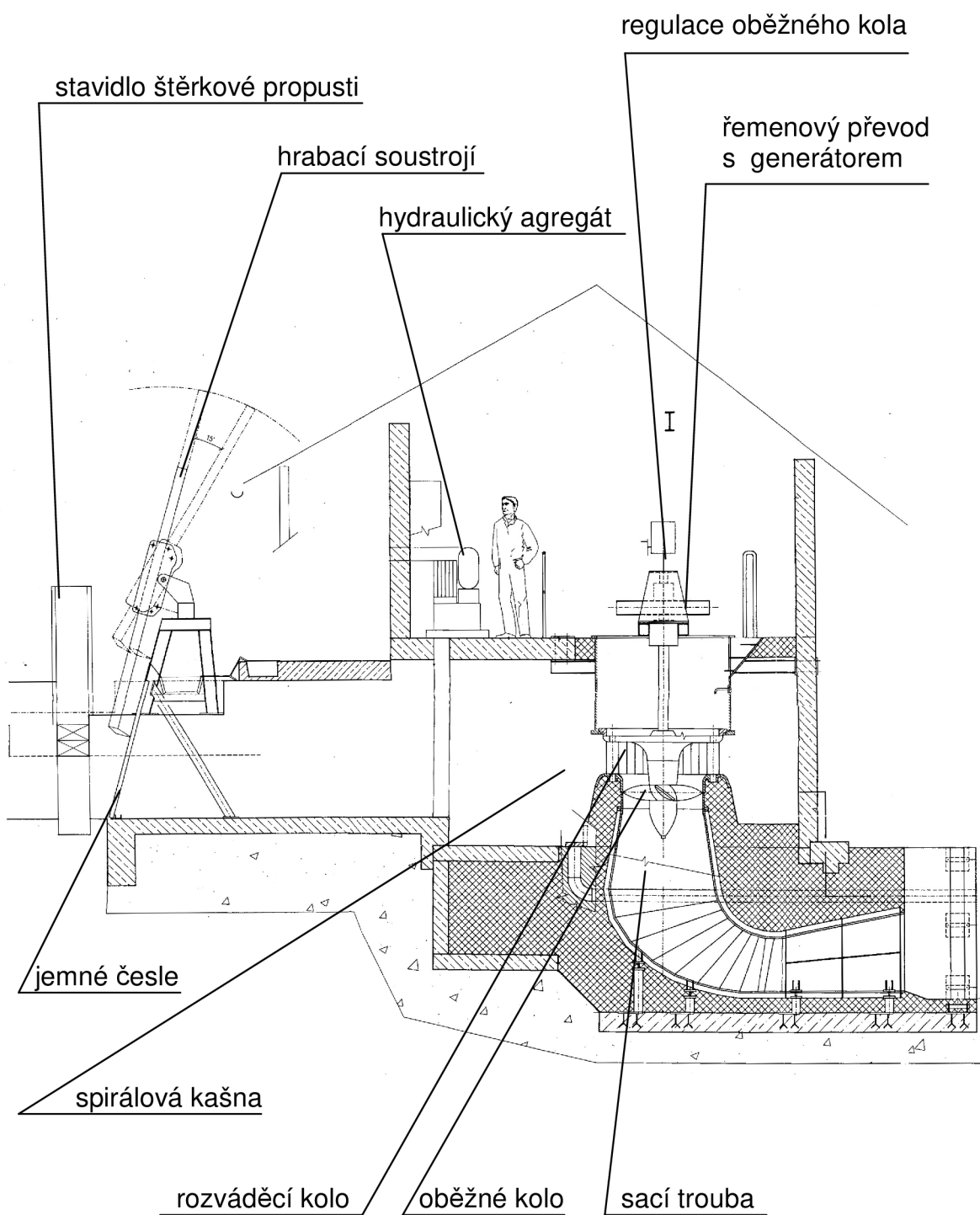
Obr.15 Hydraulický agregát



Obr.16 Elektrický servomotor, který ovládá natočení oběžných lopat



Obr.17 Generátor



Obr.18 Řez strojovnou MVE Letohrad [5]

7. Hydroenergetický potenciál na 65,4 říčním kilometru Tiché Orlice

7.1 Teoretický hydroenergetický a elektroenergetický potenciál

Protéká-li každou sekundu množství kapaliny Q [m^3/s] o měrné hmotnosti ρ [kg/m^3] při výškovém rozdílu H [m] ve směru zemské tíže, koná kapalina každou sekundu práci, čili odevzdá výkon P_H [W]. Zde uvažujeme přeměnu hydraulické energie na elektrickou se 100 % účinností. [3]

Výpočet hydroenergetického potenciálu:

$$P_{H,t} = g \cdot \rho \cdot Q_{Md} \cdot H \quad (1.0)$$

Výpočet elektroenergetického potenciálu:

$$P_{E,t} = P_{H,t} \cdot t \quad (1.1)$$

$$t = 30 \cdot 24 = 720 \text{ hod}$$

ttrvání průtoku pro hodnotu 30 dnů

M [dní]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q_{Md} [m^3/s]	6,89	4,61	3,49	2,78	2,28	1,89	1,58	1,31	1,09	0,88	0,69	0,5	0,4
$P_{H,t}$ [kW]	154,78	103,56	78,40	62,45	51,22	42,46	35,49	29,43	24,49	19,77	15,50	11,23	8,99
$P_{E,t}$ [kWh]	111444	74565	56450	44966	36878	30570	25556	21189	17630	14234	11161	8087	6470
$\Sigma P_{E,t}$ [kWh/rok]	459200,5												

tabulka č.9 Teoretický potenciál

Celková teoreticky vyrobitelná elektrická energie činí 459,2 MWh za rok.

7.2 Reálně využitelný hydroenergetický a elektroenergetický potenciál

Reálně využitelný potenciál je vždy nižší než teoretický, protože bezztrátové využití toku není možné. Musí se respektovat geologické, hydrologické a topologické podmínky. Působí zde ztráty třecí a místní. Využitelný průtok je omezen vodohospodářským plánem a musí být vždy zaručen sanační průtok. Další ztráty tvoří přeměna hydraulické energie na mechanickou a potom na elektrickou.

V našich podmínkách představuje reálně využitelný hydroenergetický potenciál přibližně 40 až 50 % potenciálu teoretického. Zde také uvažujeme přeměnu hydraulické energie na elektrickou se 100 % účinností. [3]

Pro výpočet byla zvolena hodnota 45 %.

Výpočet hydroenergetického potenciálu:

$$P_{H,r} = P_{H,t} \cdot 0,45 \quad (1.2)$$

Výpočet elektroenergetického potenciálu:

$$P_{E,r} = P_{H,r} \cdot t \quad (1.3)$$

$$t = 30 \cdot 24 = 720 \text{ hod}$$

ttrvání průtoku pro střední hodnotu 30 dnů

M [dní]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q_{Md} [m^3/s]	6,89	4,61	3,49	2,78	2,28	1,89	1,58	1,31	1,09	0,88	0,69	0,5	0,4
$P_{H,t}$ [kW]	154,78	103,56	78,40	62,45	51,22	42,46	35,49	29,43	24,49	19,77	15,50	11,23	8,99
$P_{H,r}$ [kW]	69,65	46,60	35,28	28,10	23,05	19,11	15,97	13,24	11,02	8,90	6,98	5,05	4,04
$P_{E,r}$ [kWh]	50150	33554	25402	20235	16595	13757	11500	9535	7934	6405	5022	3639	2911
$\Sigma P_{E,r}$ [kWh/rok]	206640,2												

tabulka č.10 Reálný potenciál

Celková reálně vyrobitelná elektrická energie činí 206,6 MWh za rok.

8. Návrh turbín pomocí univerzální charakteristiky a odhad roční výroby elektrické energie pro dvě různá technologická uspořádání

V návrhu jsou propočítány dvě alternativní varianty, s cílem zjistit, která z možností je efektivnější z hlediska množství vyrobené elektrické energie. První počítá s instalací jednoho za provozu plně regulovatelného soustrojí. Druhá varianta zvažuje použití tří menších turbín se stejnými parametry, tak jak bylo plánováno podle původního projektu MVE Letohrad (popsáno v kapitole 6.3). Tyto tři turbíny by byly neregulovatelné, se snižujícím se využitelným průtokem pro elektrárnu by se jednotlivé vodní motory postupně odstavovali z provozu.

8.1 Výběr typu vodní turbíny

K určení typu vodní turbíny byla použita Základní charakteristika vodních turbín (graf č.3). Podle technické dokumentace je návrhový spád $H = 2,29$ m. V našich geografických podmínkách se volí jmenovitý průtok turbínou Q_n odpovídající 90-ti dennímu až 120-ti dennímu průtoku průměrně vodného roku. Pro návrh volím průtok Q_{120} .

Výpočet jmenovitého průtoku pro jednu turbínu:

$$Q_{n1} = Q_{120} - Q_s = 2,78 - 0,605 = 2,175 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (1.4)$$

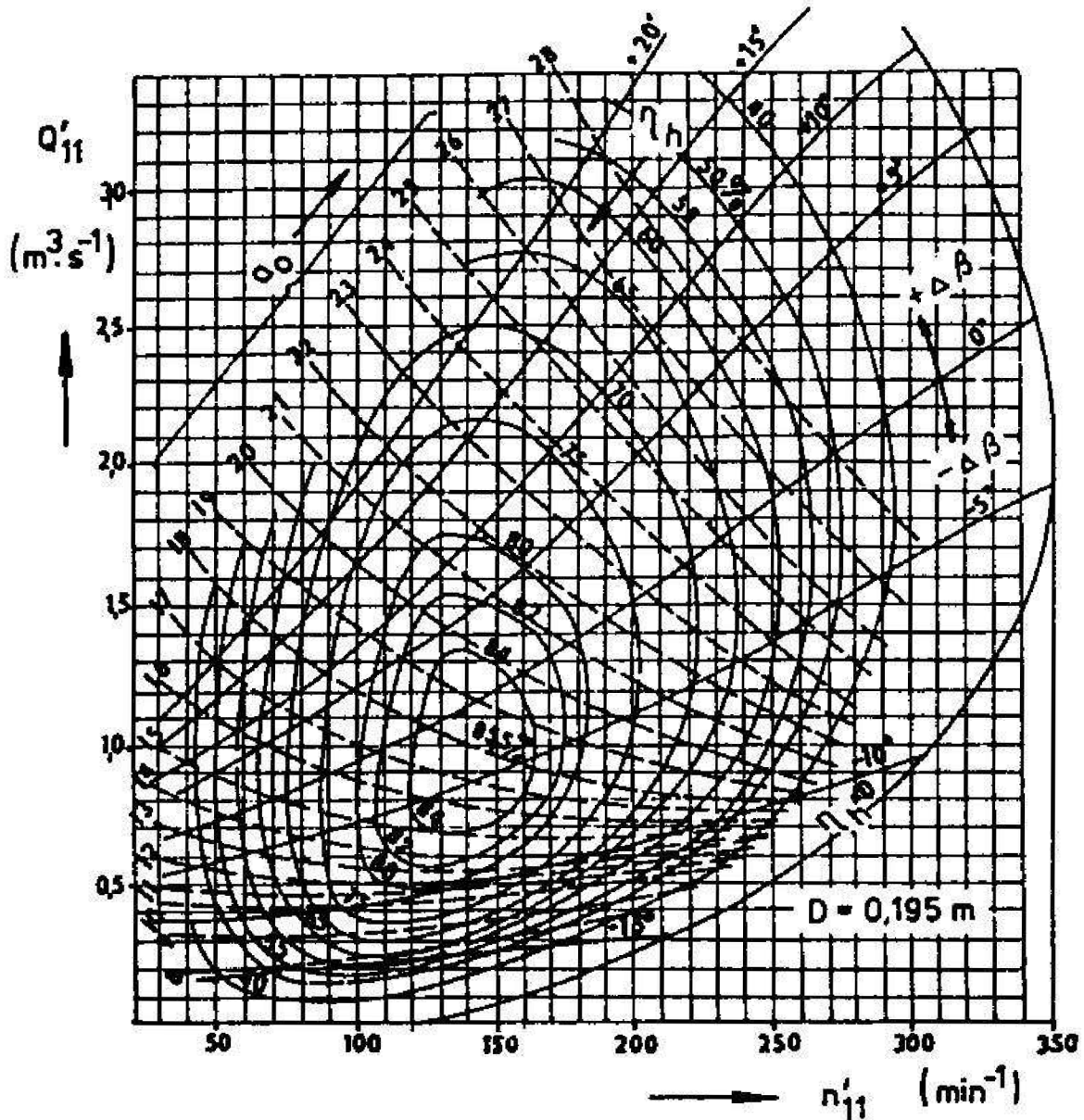
Výpočet jmenovitého průtoku pro jednu ze tří turbín:

$$Q_{n1-3} = \frac{(Q_{120} - Q_s)}{3} = \frac{2,78 - 0,605}{3} = 0,725 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (1.5)$$

Z grafu jsem zjistil, že pro oba případy :
T₁) $H = 2,29\text{m}$, $Q_{n1} = 2,175 \text{ m}^3/\text{s}$
T₁₋₃) $H = 2,29\text{m}$, $Q_{n1-3} = 0,725 \text{ m}^3/\text{s}$

je vhodné použít **turbínu typu Kaplan**.

Pro výpočet základních parametrů vodních turbín byla použita Univerzální charakteristika modelové Kaplanovy turbíny ČKD Blansko. Zmíněná charakteristika a postup výpočtu jsou uvedeny v literatuře [2].



graf č.6 Univerzální charakteristika modelové Kaplanovy turbíny ČKD Blansko, typu 4-K-69; model o průměru oběžného kola 0,195 m zkoušen při spádu 3 m [2]

8.2 Výpočet základních parametrů turbíny T₁

1) Určení jmenovitého průtoku turbínou:

$$Q_{n1} = Q_{120} - Q_S = 2,78 - 0,605 = \underline{2,175 \text{ m}^3 / \text{s}} \quad (1.6)$$

2) Průměr oběžného kola:

V charakteristice najdeme oblast s nejvyšší účinností, tj. $\eta_m = 85,5 \%$. Této oblasti odpovídají jednotkové otáčky $n_{11}' = 140 \text{ ot/min}$ a jednotkový průtok $Q_{11}' = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$D_1 = \frac{Q_{n1}}{Q_{11}' \cdot \sqrt{H}} = \frac{2,175}{1,1 \cdot \sqrt{2,29}} = \underline{1,3 \text{ m}} \quad (1.7)$$

3) Otáčky turbíny:

$$n_1 = \frac{n_{11}' \cdot \sqrt{H}}{D_1} = \frac{140 \cdot \sqrt{2,29}}{1,3} = \underline{162,97 \text{ ot/min}} \quad (1.8)$$

4) Průběžné otáčky:

Průběžné otáčky jsou nejvyšší otáčky zcela odlehčené turbíny, tzn. kroučící moment a účinnost jsou rovny nule.

Z charakteristiky zjistíme hodnotu maximálních průběžných jednotkových otáček.

$n_{11}'_{max} = 350 \text{ ot/min}$.

$$n_{1max} = n_{11}'_{max} \cdot \sqrt{H} \cdot \frac{1}{D_1} = 350 \cdot \sqrt{2,29} \cdot \frac{1}{1,3} = \underline{407,42 \text{ ot/min}} \quad (1.9)$$

5) Účinnost turbíny za optimálních podmínek:

Pro přepočet účinností byly odvozeny různé vztahy. Pro Kaplanovy turbíny dává nejvyšší hodnoty účinnosti, které se nejvíce blíží skutečnosti, přepočet podle Huttona.

U Kaplanových turbín tvoří ztráty asi ze 70 % tření a z 30 % ztráty kinetické. [3]

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta_m) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{D_m \cdot \sqrt{H_m}}{D_1 \cdot \sqrt{H}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] = 1 - (1 - 0,855) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{0,195 \cdot \sqrt{3}}{1,3 \cdot \sqrt{2,29}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] \quad (2.0)$$

$$\eta_1 = \underline{0,885} \Rightarrow \underline{88,5\%}$$

8) Výkon na hřídeli při jmenovitých parametrech:

$$P_1 = \eta_1 \cdot \rho \cdot Q_{n1} \cdot g \cdot H = 0,885 \cdot 1000 \cdot 2,175 \cdot 9,81 \cdot 2,29 \quad (2.1)$$

$$P_1 = \underline{43242 \text{ W}} \Rightarrow \underline{43,2 \text{ kW}}$$

9) Elektrický výkon soustrojí:

V následující tabulce jsou uvedeny dosahované účinnosti jednotlivých transformací energie pro MVE do výkonu 100 kW.

	η [%]
převod	80 až 100
generátor	70 až 95
transformátor	90 až 95

tabulka č.11 Dosahované účinnosti v MVE do 100 kW

Literatura uvádí účinnost řemenového převodu mezi 96 až 98 %. [2]

$$P_{e1} = P_1 \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{trans} = 43,2 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = \underline{38,2kW} \quad (2.2)$$

8.3 Výpočet základních parametrů turbíny T₁₋₃

Výpočet pro tři stejné turbíny typu Kaplan.

1) Určení jmenovitého průtoku turbínou:

$$Q_{n1-3} = \frac{(Q_{120} - Q_s)}{3} = \frac{2,78 - 0,605}{3} = \underline{0,725m^3/s} \quad (2.3)$$

2) Průměr oběžného kola:

$$D_{1-3} = \frac{Q_{n1-3}}{Q_{11} \cdot \sqrt{H}} = \frac{0,725}{1,1 \cdot \sqrt{2,29}} = \underline{0,44m} \quad (2.4)$$

3) Otáčky turbíny:

$$n_{1-3} = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{D_{1-3}} = \frac{140 \cdot \sqrt{2,29}}{0,44} = \underline{481,49ot/min} \quad (2.5)$$

4) Průběžné otáčky:

$$n_{1-3max} = n_{11max} \cdot \sqrt{H} \cdot \frac{1}{D_{1-3}} = 350 \cdot \sqrt{2,29} \cdot \frac{1}{0,44} = \underline{1203,74ot/min} \quad (2.6)$$

5) Účinnost turbíny za optimálních podmínek:

$$\eta_{1-3} = 1 - (1 - \eta_m) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{D_m \cdot \sqrt{H_m}}{D_1 \cdot \sqrt{H}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] = 1 - (1 - 0,855) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{0,195 \cdot \sqrt{3}}{0,44 \cdot \sqrt{2,29}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] \quad (2.7)$$

$$\eta_{1-3} = \underline{0,868 \Rightarrow 86,8\%}$$

8) Výkon na hřídeli při jmenovitých parametrech:

$$P_{1-3} = \eta_{1-3} \cdot \rho \cdot Q_{n1-3} \cdot g \cdot H = 0,868 \cdot 1000 \cdot 0,725 \cdot 9,81 \cdot 2,29 \quad (2.8)$$

$$P_{1-3} = \underline{14135,3W \Rightarrow 14,1kW}$$

9) Elektrický výkon soustrojí:

$$P_{e1-3} = P_{1-3} \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{trans} = 14,1 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = \underline{12,5kW} \quad (2.9)$$

10) Celkové výkony všech tří turbín:

$$P_{3celk} = 3 \cdot P_{1-3} = 3 \cdot 14,1 = \underline{42,3kW} \quad (3.0)$$

$$P_{e3celk} = 3 \cdot P_{e1-3} = 3 \cdot 12,5 = \underline{37,5kW}$$

8.4 Odhad roční výroby elektrické energie turbínou T₁

Zde je uveden postup výpočtu. Všechny výsledky jsou uvedeny v *tabulce č. 12 Porovnávací tabulka* (kapitola 8.6). Výroba elektřiny se přeruší, jestliže účinnost turbíny η_I klesne pod 80 %. V tu chvíli je provoz MVE neefektivní a neekonomický.

Maximální hltnost turbíny:

Je to maximální možný průtok, který je turbína schopna využít. Přetlakové turbíny je možné přehltit až na 1,2 násobek jmenovitého průtoku. [2]

$$Q_{1max} = Q_{n1} \cdot 1,2 = \underline{2,61m^3 / s} \quad (3.1)$$

Využitelný průtok pro MVE:

Využitelný průtok Q_v získáme odečtením sanačního průtoku Q_s od běžného denního průtoku Q_{md} . Pro výpočet byly použity hodnoty průtoků v 10-ti denním intervalu.

Příklad výpočtu:

interval 10 dnů, $Q_v = 1,83 m^3/s$

Zpětně si zjistíme jednotkový průtok modelové turbíny Q_{11}' . V univerzální charakteristice zjistíme podle průtoku modelovou účinnost η_m . Modelovou účinnost přepočítáme podle Huttonova vztahu na účinnost skutečné turbíny η_I . Potom dopočítáme výkony P_I , P_{eI} a vyrobenou elektrickou energii N_I za deset dní.

$$Q_{11}' = \frac{Q_v}{D_1^2 \cdot \sqrt{H}} = \frac{1,83}{1,3^2 \cdot \sqrt{2,29}} = \underline{0,7156m^3 / s} \Rightarrow \eta_m = 84 \quad (3.2)$$

$$\eta_I = 1 - (1 - \eta_m) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{D_m \cdot \sqrt{H_m}}{D_1 \cdot \sqrt{H}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] = 1 - (1 - 0,84) \cdot \left[0,3 + 0,7 \left(\frac{0,195 \cdot \sqrt{3}}{1,3 \cdot \sqrt{2,29}} \right)^{\frac{1}{5}} \right] \quad (3.3)$$

$$\eta_I = \underline{0,873} \Rightarrow 87,3\%$$

$$P_I = \eta_I \cdot \rho \cdot Q_v \cdot g \cdot H = 0,873 \cdot 1000 \cdot 1,83 \cdot 9,81 \cdot 2,29 \quad (3.4)$$

$$P_I = \underline{35889,7W} \Rightarrow \underline{35,9kW}$$

$$P_{eI} = P_I \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{trans} = 35,9 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = \underline{31,7kW} \quad (3.5)$$

$$N_I = P_{eI} \cdot h = 31,7 \cdot (10 \cdot 24) = \underline{7018kWh} \quad (3.6)$$

8.5 Odhad roční výroby elektrické energie třemi turbínami

Všechny výsledky jsou opět uvedeny v kapitole 8.6. Postup výpočtu je shodný jako pro turbínu T_1 . V tomto případě je regulace prováděna postupným odstavováním turbín v závislosti na průtoku malou vodní elektrárnou. Všechny tři turbíny mají neměnnou účinnost 86,8 %.

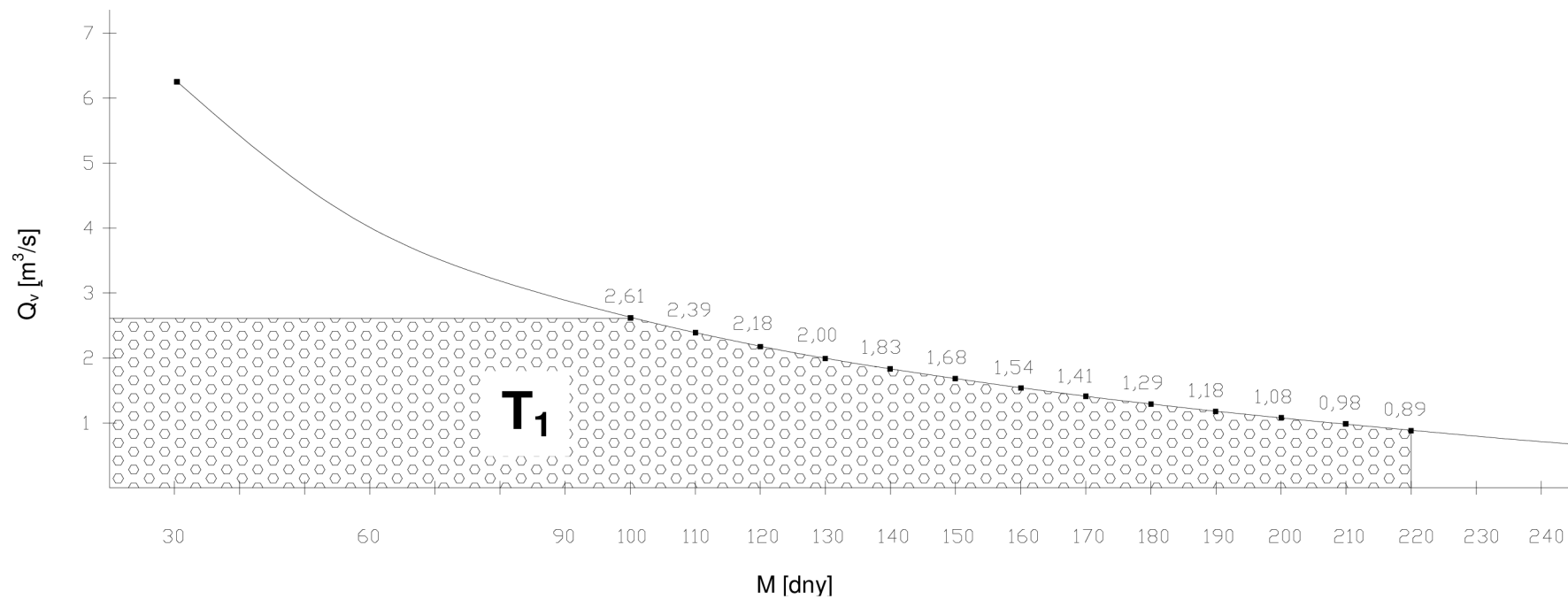
Maximální hlnost turbíny:

$$Q_{1-3 \max} = Q_{n1-3} \cdot 1,2 = \underline{0,87 m^3 / s} \quad (3.7)$$

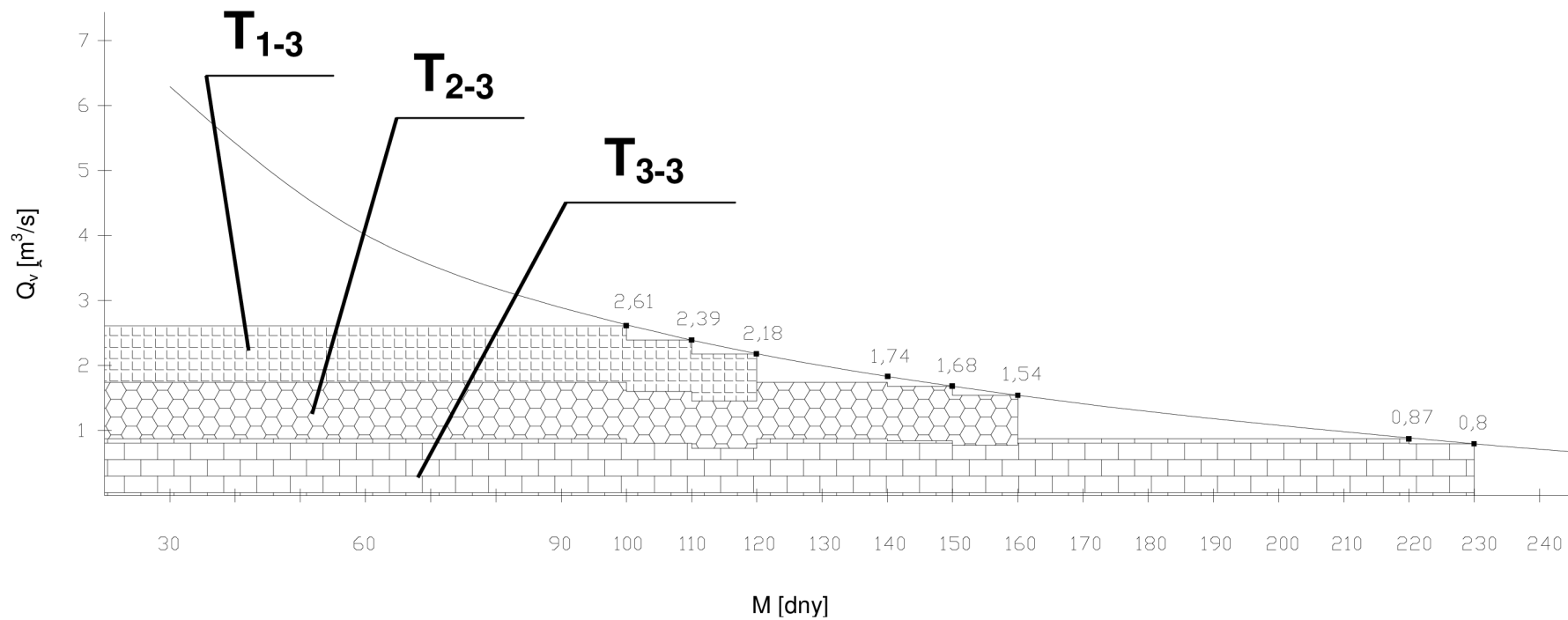
8.6 Určení efektivnějšího způsobu výroby elektřiny v MVE

	M	[dny]	30	60	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300				
	Q_{Md}	[m ³ /s]	6,89	4,61	3,49	3,24	2,96	2,78	2,61	2,44	2,28	2,15	2,02	1,89	1,79	1,69	1,58	1,50	1,41	1,31	1,24	1,17	1,09	1,03	0,96	0,88				
	Q_v	[m ³ /s]	6,29	4,01	2,89	2,63	2,39	2,18	2,00	1,83	1,68	1,54	1,41	1,29	1,18	1,08	0,98	0,89	0,8	0,71	0,63	0,56	0,49	0,42	0,35	0,28				
turbína T ₁	Q_1	[m ³ /s]	2,61	2,61	2,61	2,61	2,39	2,18	2,00	1,83	1,68	1,54	1,41	1,29	1,18	1,08	0,98	0,89	0,8											
	η_1	[%]	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5	87,3	87,3	87,3	85,7	85,7	84,2	84,2	80	80	80	76,2											
	P_1	[kW]	51,9	51,9	51,9	51,9	47,5	43,3	39,2	35,9	32,9	29,7	27,1	24,4	22,3	19,4	17,7	16												
	P_{e1}	[kW]	45,9	45,9	45,9	45,9	42	38,3	34,7	31,7	29,1	26,2	24	21,6	19,7	17,2	15,6	14,1	MIMO PROVOZ											
	h	[hod]	90*24=2160				240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240												
	N_1	[kWh]	45,9*2160=99144				11015	10086	9192	8329	7018	6984	6297	5762	5184	4736	4120	3744	3395											
	$N_{1celkem}$		185006 kWh/rok																											
3 turbíny (T ₁₋₃ , T ₂₋₃ , T ₃₋₃)	Q_{1-3}	[m ³ /s]	0,87	0,87	0,87	0,87	0,8	0,73																						
	Q_{2-3}	[m ³ /s]	0,87	0,87	0,87	0,87	0,8	0,73	0,87	0,87	0,84	0,77																		
	Q_{3-3}	[m ³ /s]	0,87	0,87	0,87	0,87	0,8	0,73	0,87	0,87	0,84	0,77	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,8											
	Q_{3celk}	[m ³ /s]	2,61	2,61	2,61	2,61	2,39	2,18	1,74	1,74	1,68	1,54	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,8											
	P_{1-3}	[kW]	16,9	16,9	16,9	16,9	15,6	14,2																						
	P_{2-3}	[kW]	16,9	16,9	16,9	16,9	15,6	14,2	19,6	19,6	16,4	15									MIMO PROVOZ									
	P_{3-3}	[kW]	16,9	16,9	16,9	16,9	15,6	14,2	19,6	19,6	16,4	15	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	15,6											
	P_{3celk}	[kW]	50,9	50,9	50,9	50,9	46,8	42,7	33,9	33,9	32,6	30	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	15,6											
	P_{e3celk}	[kW]	45	45	45	45	41,4	37,8	30	3	29	26,6	15	15	15	15	15	15	13,8											
	h	[hod]	100*24=2400				240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240										
N_3	[kWh]	45*2400=108000				9934	9065	7202	7202	6954	6374	3601	3601	3601	3601	3601	3601	3601	3311											
$N_{3celkem}$		179648 kWh/rok																												

tabulka č.12 Porovnávací tabulka roční výroby elektrické energie pro MVE Letohrad



graf č.7 Znáornění využití potenciálu turbínou T_1



graf č.8 Znáznornění využití potenciálu turbínami T_{1-3} , T_{2-3} , T_{3-3}

Z výsledků je jasné, že efektivněji využijeme energetický potenciál toku turbínou T_1 . Varianta T_1 vyrobí ročně 185 006 kWh elektřiny, což pokryje 80,7 % reálně využitelného potenciálu. Druhá varianta využije jen 78,2 %.

Proto je při výpočtu návratnosti investice dále uvažována jenom varianta T_1 .

9. Přibližné určení tržeb a doby návratnosti investice

Roční výroba elektrické energie:

$$N_{Icelkem} = 185006 \text{ kWh/rok}$$

Investiční Náklady:

Hodnoty nákladů investičních i provozních jsou odvozeny od údajů poskytnutých provozovatelem malé vodní elektrárny.

Investiční náklady zahrnují např. :
náklady na pořízení projektové dokumentace
stavební náklady
výroba, dodávka a montáž technologického zařízení
(strojní část, elektroinstalace, automatické řízení)

vlastní kapitál.....2 580 000 Kč

dotace.....1 720 000 Kč

Projekt splnil kritéria, která byla stanovena pro přiznání státní podpory v rámci Státních programů na podporu úspor energie pro rok 2002 (Program 5. A. SFŽP). Dotace činí 40 % z celkových investičních nákladů.

$$IN_{celk} = 4\,300\,000 \text{ Kč}$$

Provozní náklady:

Provozní náklady jsou v jednotlivých letech uvažovány konstantní a mohou se skládat z těchto položek:
poplatek za odběr vody
pojistné
údržba, opravy a servis
mzdy, sociální a zdravotní pojištění
náklady na spotřební údržbový materiál

Malé vodní elektrárny do 1MW výkonu jsou podle nové legislativy (tzv. „Vodní zákon“) osvobozeny od poplatků za pronájem (pozemku, jezu).

$$PN_{celk} = 60\,000 \text{ Kč/rok}$$

Tržba za vyrobenou energii:

Získaná energie: a) je z části využívána v areálu SPŠ a SOU Letohrad (30 %), kde ušetří drahé nákupy elektrické energie
b) je z části dodávána do elektrizační soustavy (70 %)

ad a): vyrobená energie pro vlastní spotřebu

30 %.....55 501,8 kWh/rok

Areál SOU Letohrad se při odběru elektřiny z distribuční sítě řadí do distribuční sazby C26d, určené podnikem, který zprostředkovává dodávku energie - v tomto případě Skupina ČEZ. Následující údaje jsou převzaty z oficiálních webových stránek ČEZu.

VT.....pásmo platnosti vysokého tarifu, platí 8 hodin denně

NT.....pásmo platnosti nízkého tarifu, platí mimo platnost vysokého tarifu

Cena ušetřené energie nemůže zahrnovat stálé platby, protože MVE není schopna zaručit stálou dodávku elektřiny pro potřeby SOU v závislosti na stavu vody. Stálé platby zahrnují plat za příkon podle jmenovité proudové hodnoty jističe před elektroměrem a pevné ceny silové elektřiny. Množství ušetřené energie je rovné součtu plateb za spotřebu elektřiny v NT a VT.

Celková cena elektřiny zahrnující dopravu a obchod mimo stálých plateb činí:

VT.....3,52 Kč/kWh

NT.....1,66 Kč/kWh

$$VT \rightarrow 365 \cdot 8 = 2920 \text{ hod / rok} \rightarrow \frac{55501,8}{8760} \cdot 2920 = \underline{18500,6 \text{ kWh / rok}} \rightarrow \quad (3.7)$$

$$\rightarrow 18500,6 \cdot 3,52 = \underline{65122,1 \text{ Kč / rok}}$$

$$NT \rightarrow 365 \cdot 16 = 5840 \text{ hod / rok} \rightarrow \frac{55501,8}{8760} \cdot 2920 = \underline{37001,2 \text{ kWh / rok}} \rightarrow \quad (3.8)$$

$$\rightarrow 37001,2 \cdot 1,66 = \underline{61421,9 \text{ Kč / rok}}$$

Po součtu dostaneme celkovou ušetřenou cenu za elektřinu, kterou nemusíme nakoupit.

$$\underline{E_{vl} = 65122,1 + 61421,9 = 126544 \text{ Kč / rok}} \quad (3.9)$$

ad b): vyrobená energie prodaná do elektrické sítě

70 %.....129 504,2 kWh/rok

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě [Kč/kWh]
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu včetně	2,70
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	2,54
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruovaná malá vodní elektrárna	2,30
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu před 1. lednem 2005	1,79

tabulka č.13 Výkupní ceny elektřiny pro MVE

Podle Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (ERU) č.8/2008 ze dne 18. listopadu 2008 je stanovena výkupní cena elektrické energie pro rekonstruované MVE na 2,30 Kč/kWh.

Podle ERU se rekonstruovanou MVE rozumí stávající výrobní elektřiny, na které bylo po 13. srpnu 2002 provedena a dokončena rekonstrukce nebo modernizace. Za takovou rekonstrukci se považuje:

- výměna nebo generální oprava turbíny
- výměna nebo převinutí generátoru
- oprava elektročásti spočívající v zabránění působení zpětných vlivů na síť
- výměna regulačních zařízení
- výměna nebo instalace nového automatického řízení

Tyto požadavky MVE Letohrad splňuje, jelikož zde došlo k instalaci nového turbosoustrojí, automatického řízení i generátoru. Došlo i k rekonstrukci stavební části.

$$\underline{E_{sít} = 129504,2 \cdot 2,30 = 297859,7 \text{ Kč / rok}} \quad (4.0)$$

Celková tržba za vyrobenou energii:

$$E_{celk} = E_{vl} + E_{sít} = 126544 + 297859,7 = \underline{\underline{424403,7 \text{ Kč / rok}}} \quad (4.1)$$

DN.....doba návratnosti investice

$$DN = \frac{2580000 + (7 * 60000)}{424403,7} \quad (4.2)$$

$DN \cong 7,1$ let

Návratnost investice podle zjednodušeného výpočtu vychází na přibližně 7 let, což se dá hodnotit jako dobrá investice vzhledem k dlouhé životnosti vodních elektráren.

Závěr

Vodní energie nehraje v energetické bilanci České republiky příliš velkou roli. Z opačného pohledu je však velmi cenným obnovitelným zdrojem energie. Využívat hydroenergetický potenciál našich toků má řadu nepopíratelných výhod. Jedná se o prakticky nevyčerpatelný zdroj energie. Díky tomu je možné ušetřit fosilní paliva, náklady na jeho těžbu a náklady spojené s distribucí elektrické energie. V neposlední řadě také dochází k omezení množství skleníkových plynů a škodlivých zplodin, které je jinak nutné drahými způsoby odstraňovat ze spalin. Z ekologického hlediska je to neznečišťující a bezodpadový energetický zdroj. Musíme se však zabývat i ostatními aspekty, jimiž jsou např. migrace vodních živočichů a určité narušení původních přírodních podmínek v místě, kde je instalované vzdouvací zařízení s elektrárnou.

Vývoj v oblasti MVE doznal v posledních let sto letech rozsáhlých změn. Zajímavostí je, že v roce 1933 bylo na území ČR evidováno na 11 700 malých vodních elektráren a v roce 2001 byl jejich počet pouze 1 380, ale roční výroba elektřiny je zhruba 3,5 krát vyšší než v roce 1933. Je to způsobeno postupným zdokonalením a zvýšením účinností soustrojí.

V České republice bylo v roce 2005 vyrobeno malými vodními elektrárnami 1,071 TWh elektřiny. Tato hodnota tvoří asi 68 % technicky využitelného potenciálu. Zbývajících 32 % disponuje spíše nízkými a extrémně nízkými spády.

Zjednodušený návrh vodní elektrárny propočítává dvě varianty s různými strojními technologiemi a následně určuje tu více efektivní. Podle propočtů vyšla jako efektivnější první varianta. Je to záměr instalovat jedno soustrojí o výkonu 43,2 kW, které má za provozu regulovatelné rozváděcí i oběžné kolo (výsledek je shodný se současným provedením MVE Letohrad). Dále jsou vykalkulovány ceny za prodanou a pro potřeby provozovatele využitou elektřinu. Návrh investice je přibližně 7 let, v případě přiznání státní dotace ve výši 40 % celkových investičních nákladů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] CENK, Miroslav, et al. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE. 2. upr. vyd. Praha : FCC PUBLIC, 2001. 208 s. ISBN 80-901985-8-9.
- [2] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr. MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [3] MELICHAR, Jan, VOJTEK, Jan, BLÁHA, Jaroslav. MALÉ VODNÍ TURBÍNY : Konstrukce a provoz. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 299 s. ISBN 80-01-01808-0.
- [4] MOTLÍK, Jan, et al. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE A MOŽNOSTI JEJICH UPLATNĚNÍ V ČESKÉ REPUBLICĚ. Praha : ČEZ, a. s., 2003. 145 s.
- [5] TECHNICKÁ DOKUMENTACE, vypůjčena od provozovatele

Internetové zdroje:

- [6] BERANOVSKÝ, Jiří, TRUXA, Jan. Plánování OZE v ČR v kontextu státní energetické koncepce a EU. Wwww.energetika.cz [online]. 2005 [cit. 2009-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.energetika.cz/>>.
- [7] Elektrarny.xf.cz [online]. c2005 , 1. 7. 2007 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://elektrarny.xf.cz/>>.
- [8] HES, Stanislav. HYDROENERGETICKÉ VYUŽITÍ VELMI MALÝCH SPÁDŮ V ZÁVISLOSTI NA EKONOMICKÉ EFEKTIVITĚ. Cez.cz [online]. . [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/>>.
- [9] KAREL , Kabeš. Malé vodní elektrárny jsou důležitým obnovitelným zdrojem energie. Odborné časopisy [online]. 2008, č. 10 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/>>.
- [10] Mve.energetika.cz [online]. . , 22. 1. 2009 [cit. 2009-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://mve.energetika.cz/>>.
- [11] Vodní energie a historie využití v ČR. Česká energetika [online]. 2006 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://ceskaenergetika.cz/>>.
- [12] VYUŽITÍ VODNÍ ENERGIE. Elektrarny.xf.cz [online]. . [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://elektrarny.xf.cz/>>.
- [13] Wwww.cez.cz [online]. ČEZ, a. s., c2009 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/>>.

Seznam použitých zkratk a symbolů

D_1	[m]	průměr oběžného kola turbíny T_1
D_{1-3}	[m]	průměr oběžného kola turbíny T_{1-3}
D_m	[m]	průměr oběžného kola modelové turbíny ČKD Blansko
DN	[roky]	doba návratnosti investice
$E_{sít}$	[Kč/rok]	cena za vyrobenou energii dodanou do rozvodné sítě
E_{vl}	[Kč/rok]	částka ušetřená za nenakoupenou elektřinu od distributora
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
H	[m]	návrhový spád
h	[hod]	počet provozních hodin
H_m	[m]	spád modelové turbíny
IN_{celk}	[Kč]	celkové investiční náklady
M	[dny]	počet dní
n_1	[ot/min]	otáčky turbíny T_1
N_1	[kWh]	množství vyrobené elektrické energie
$N_{1celkem}$	[kWh/rok]	roční množství vyrobené el. energie
n_{11}'	[ot/min]	jednotkové otáčky modelové turbíny
$n_{11}'_{max}$	[ot/min]	průběžné jednotkové otáčky modelové turbíny
n_{1max}	[ot/min]	průběžné otáčky turbíny T_1
n_{1-3}	[ot/min]	otáčky turbíny T_{1-3}
n_{1-3max}	[ot/min]	průběžné otáčky turbíny T_{1-3}
N_3	[kWh]	množství el. energie vyrobené třemi turbínami
$N_{3celkem}$	[kWh/rok]	roční množství el. energie vyrobené třemi turbínami
NT	[-]	nízký tarif
η_1	[%]	účinnost turbíny T_1
η_{1-3}	[%]	účinnost turbíny T_{1-3}
η_{gen}	[%]	účinnost generátoru
η_m	[%]	účinnost modelové Kaplanovy turbíny
$\eta_{př}$	[%]	účinnost převodu
η_{trans}	[%]	účinnost transformátoru
P_{e1}	[kW]	elektrický výkon turbíny T_1
P_{e1-3}	[kW]	el. výkon turbíny T_{1-3}
P_{e3celk}	[kW]	celkový el. výkon tří turbín
$P_{E,r}$	[kWh]	reálně využitelný elektroenergetický potenciál
$P_{E,t}$	[kWh]	teoretický elektroenergetický potenciál
$P_{H,r}$	[kW]	reálně využitelný hydroenergetický potenciál
$P_{H,t}$	[kW]	teoretický hydroenergetický potenciál
P_1	[kW]	hydraulický výkon turbíny T_1
P_{1-3}	[kW]	hydraulický výkon turbíny T_{1-3}
P_{3celk}	[kW]	celkový hydraulický výkon tří turbín
PN_{celk}	[Kč/rok]	celkové roční provozní náklady
Q_1	[m ³ /s]	průtok turbínou T_1
Q_{1max}	[m ³ /s]	maximální hlnost turbíny T_1
Q_{1-3}	[m ³ /s]	průtok turbínou T_{1-3}
Q_{11}'	[m ³ /s]	jednotkový průtok modelové turbíny
Q_{120}	[m ³ /s]	120-ti denní průtok vody lokalitou MVE Letohrad
Q_{Md}	[m ³ /s]	denní průtok

Q_n	$[m^3/s]$	jmenovitý průtok turbínou
Q_{n1}	$[m^3/s]$	jmenovitý průtok turbínou T_1
Q_{n1-3}	$[m^3/s]$	jmenovitý průtok turbínou T_{1-3}
Q_{3celk}	$[m^3/s]$	celkový průtok třemi turbínami
Q_s	$[m^3/s]$	sanační průtok
Q_v	$[m^3/s]$	využitelný průtok vody pro objekt MVE
ρ	$[kg/m^3]$	měrná hmotnost
VT	[-]	vysoký tarif