

HYDROENERGETICKÉ VYUŽITÍ VELMI MALÝCH SPÁDŮ V ZÁVISLOSTI NA EKONOMICKÉ EFEKTIVITĚ

Stanislav Hes

ČVUT v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

1. Úvod do problematiky

V dnešní době se většina států světa snaží zajistit dodávky elektrické energie pro své obyvatelstvo a průmysl. Při neustále rostoucí poptávce po elektrické energii, rostoucích cenách fosilních paliv a přetrvávajícímu odporu vůči jaderné energetice v některých státech, je jednou z možností jak tento problém řešit, soustředění se na výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Celosvětovým leaderem v oblasti prosazování obnovitelných zdrojů je v současnosti Evropská unie. Důkazem může být odvážný plán z roku 2008 prosazující, aby v roce 2020 20% z celkově vyrobené elektrické energie v EU připadalo na obnovitelné zdroje. Podíl byl rozpočítán numericky bez ohledu na reálný potenciál mezi členské státy EU na základě HDP na obyvatele. Pro ČR vyplývá závazek ve výši 13%, přičemž nyní pochází z OZE cca 6% elektrické energie. Pokud chce ČR splnit cíl, ke kterému se v rámci EU zavázala, bude potřeba využít každou ekonomicky rentabilní příležitost výstavby obnovitelného zdroje. Mezi OZE patří vodní, větrná, solární, geotermální energie a spalování biomasy. Výhodou obnovitelných zdrojů je jejich nevyčerpatelnost a šetrnost k životnímu prostředí v porovnání s fosilními zdroji. Velkou nevýhodou je diskontinuita dodávek elektrické energie v čase, způsobená přírodními podmínkami, která způsobuje problémy v řízení distribučních a přenosových soustav (kromě spalování biomasy).

Relativně stabilním OZE z hlediska dodávky elektrické energie v čase je vodní elektrárna. Průtok se nemění v řádu desítek procent během sekundy a dá se předem celkem přesně odhadnout. U akumulčních a přečerpávacích vodních elektráren je navíc možnost využít prostor nádrže pro zadržení vody, kterou lze následně využít pro regulaci elektrické soustavy v době pološpičkového a špičkového odběru z elektrické soustavy. Velkou výhodou je rychlé najetí zdroje na plný výkon. Problémem dalšího rozvoje vodních elektráren je skutečnost, že většina vhodných a ekonomicky efektivních lokalit již byla obsazena. Proto je výzvou najít nová technologická řešení, která by umožnila výstavbu na zatím z tohoto důvodu neobsazených lokalitách.

2. Vodní elektrárny a jejich využití v České republice

Využívání energie z vodních elektráren ve světě závisí na množství vhodných lokalit pro výstavbu vodních elektráren, na podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů a technické úrovni jednotlivých států. Vodní elektrárny lze podle režimu provozu dělit na akumulční, průtočné a přečerpávací.

V České republice jsou vhodné lokality pro stavbu velkých akumulčních nádrží vyčerpány. Stavby velkých vodních děl nepřipadají v úvahu vzhledem k potřebě velkého zátopové-

ho území, které bývá obydleno. Přečerpávací vodní elektrárny pracují při špičkovém zatížení elektrické soustavy a jejich výstavba je realizována dle potřeby regulace soustavy. Především díky podpoře výkupních cen z OZE, dotací a nízkoúročených půjček došlo v posledních letech k realizaci mnoha projektů malých vodních elektráren (MVE). Jedná se o vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW_e včetně. Další zvyšování výkonů z vodních elektráren lze dosáhnout modernizací jejich technologie, nebo výstavbou MVE ve zbývajících lokalitách, kde doposud stavba nebyla realizována. Většina neobsazených lokalit má malý spád, kvůli kterému je ohrožena návratnost vynaložené investice.

V České republice je podporována výroba energie z obnovitelných zdrojů. Distributoři elektrické energie (ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s., PRE Distribuce, a.s.) mají dle zákona povinnost připojit každý obnovitelný zdroj energie. Podle platné legislativy rozhoduje o ceně takto vyrobené elektřiny Energetický regulační úřad. Minimální výkupní cena je podle zákona garantovaná na 15 let dopředu s možností roční korekce +/- 5%. V následujících tabulkách je přehled výkupních cen a zelených bonusů podle nyní platného cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2007. Výše ceny je závislá na datumu uvedení do provozu.

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu 2008 včetně	2600	1400
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	2450	1250
MVE uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruované MVE	2220	1020
MVE uvedená do provozu před 1. lednem 2005	1730	530

Tab. 1: Výkupní ceny elektřiny a zelené bonusy z malých vodních elektráren

V případě špičkové a pološpičkové elektrárny, jejíž provoz je stanoven v povolení k nakládání s vodami mohou být stanovena dvoutarifní pásma:

- a) VT – pásmo platnosti vysokého tarifu stanovené provozovatelem distribuční soustavy v délce 8 hodin denně
- b) NT – pásmo v platnosti nízkého tarifu stanovené provozovatelem distribuční soustavy v době mimo platnost VT

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny v pásmu VT v Kč/MWh	Výkupní ceny elektřiny v pásmu NT v Kč/MWh
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu 2008 včetně	3800	2000
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	3800	1780
MVE uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruované MVE	3470	1600
MVE uvedená do provozu před 1. lednem 2005	2700	1250

Tab. 2: Výkupní ceny elektřiny z malých vodních elektráren při kalkulaci VT a NT

Datum uvedení do provozu	Zelené bunusy v pásmu VT v Kč/MWh	Zelené bunusy v pásmu NT v Kč/MWh
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu 2008 včetně	2210	1010
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	2210	790
MVE uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruované MVE	1880	610
MVE uvedená do provozu před 1. lednem 2005	1110	260

Tab. 3: Zelené bunusy za vyrobenou elektrickou energii z malých vodních elektráren při kalkulaci VT a NT

3. Princip funkce vodních elektráren a závislost výkonu na přírodních podmínkách

Zdrojem koloběhu povrchových vod v tocích na Zemi je energie ze Slunce. Voda, která se odpařuje ze zemského povrchu kondenzuje v mracích a jako déšť dopadá zpět na zemský povrch. Velikost teoretického výkonu vodní elektrárny závisí na spádu, průtoku, gravitační konstantě a hustotě vody podle následujícího vztahu.

$$P_t = Q * \rho * g * H \quad (1)$$

P_tteoretický výkon [W]
 Qprůtok turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 $\rho = 1000$hustota čisté vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 $g = 9,81$gravitační konstanta [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
 Hvýškový rozdíl hladin [m]

Při přeměně hydraulické energie na mechanickou nastávají ve vodní turbíně ztráty. Nelze dosáhnout 100% účinnosti.

$$P_{ef} = \eta_t * P_t \quad (2)$$

P_{ef}efektivní výkon turbíny (na spojce motoru) [W]
 η_tcelková účinnost vodní turbíny [-]

Ztráty v turbíně lze rozdělit na:

a) Objemové

Objemové ztráty jsou způsobené skutečností, že ne celý průtok Q projde oběžným kolem turbíny. Část vody obteče mezerami mezi oběžným kolem a prstencem odsávací trubky, další voda proniká ucpávkou kolem hřídele turbíny a proto nevykoná žádnou práci.

b) Hydraulické

Část spádu se spotřebuje na překonání průtokových odporů v turbíně. Průtokové odpory v turbíně vznikají třením vody o stěny turbínových kanálů, vlivem ohybu vodního proudu a vlivem víření vody. Spád, který je k dispozici se proto zmenší o rychlostní výšku $c_2^2/2 * g$ odpovídající rychlosti c_2 , kterou voda opouští oběžné kolo. Výsledkem je, že využitelný spád pro přeměnu energie bude menší.

c) Mechanické

Třením v ložiscích turbíny, v ucpávce hřídele turbíny a třením vnějších ploch oběžného kola o vodu, která ho obklopuje vznikají mechanické ztráty.

η_vobjemová účinnost [-]
 η_hhydraulická účinnost [-]
 η_mmechanická účinnost [-]

Celkovou účinnost vodní turbíny lze vyjádřit pomocí objemové, hydraulické a mechanické účinnosti vztahem:

$$\eta_t = \eta_v * \eta_h * \eta_m \quad (3)$$

Celková účinnost vodní turbíny se pohybuje v rozmezí 0,75 – 0,93 v závislosti na typu, velikosti, spádu a zatížení. Turbína předává mechanickou energii přes převodovku generátoru, který vyrábí elektrickou energii, která se přes transformátor dodává do distribuční sítě. Při této přeměně energie opět dochází ke ztrátám jak v převodovce, tak v generátoru.

$\eta_{\text{převod}}$účinnost převodovky [-]

η_{gen} účinnost generátoru [-]

η_{trafo}účinnost transformátoru [-]

Účinnost generátoru se pohybuje v rozmezí 0,85 – 0,99 v závislosti na typu a velikosti. Synchronní generátory dosahují účinnosti 0,90 a výše, asynchronní pouze 0,85 – 0,92.

Účinnost převodovky se podle typu pohybuje v rozmezí 0,94 – 0,99. Účinnost transformátorů se pohybuje v rozmezí 0,92 – 0,98. Celkovou účinnost přeměny hydraulické energie vody na elektrickou energii v předávacím místě distribuční sítě lze vyjádřit součinem jednotlivých účinností. U velkých elektráren v případě optimálního turbínového průtoku bývá hodnota η_{celk} v rozmezí 0,80 – 0,85.

$$\eta_{\text{celk}} = \eta_t * \eta_{\text{převod}} * \eta_{\text{gen}} * \eta_{\text{trafo}} \quad (4)$$

Výkon v bodě připojení vodní elektrárny do distribuční sítě lze tedy vyjádřit:

$$P = Q * \rho * g * H * \eta_{\text{celk}} \quad (5)$$

P.....výkon v bodě připojení elektrárny [W]

Výkon P lze také vyjádřit zjednodušeným vztahem:

$$P_{\text{zjednoduseny}} = K * Q * H \quad (6)$$

$P_{\text{zjednoduseny}}$zjednodušené vyjádření výkonu P [kW]

Koeficient K = 8 u MVE velkých výkonů (5-10 MW), kvalitní turbíny Kaplan a Pelton

K = 7 u MVE menších výkonů s dobrou kvalitou turbín Kaplan, Pelton, Bánki

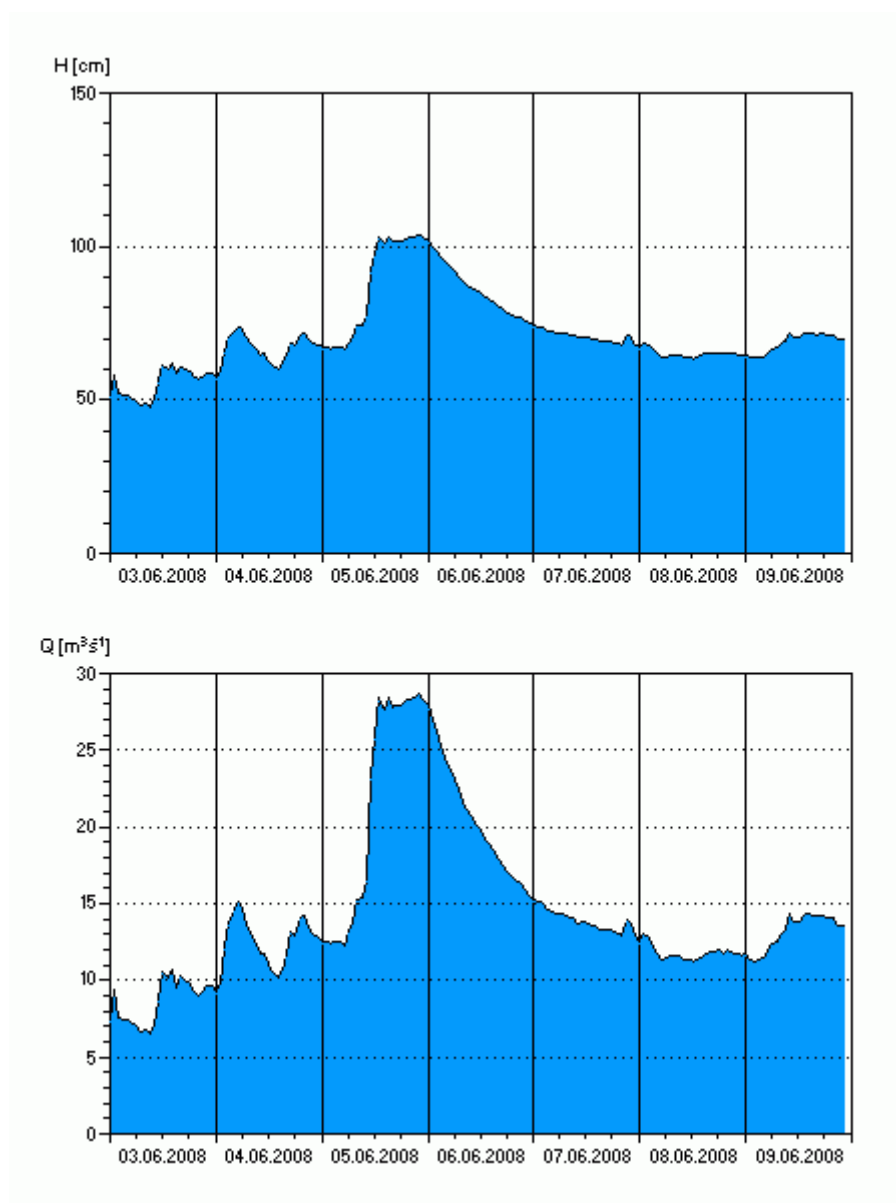
K = 5-6 u MVE s turbínami bez dvojité regulace

Vzhledem k tomu, že každá vodní elektrárna je svým způsobem unikátní stavbou, se hodnota koeficientu K liší případ od případu. Uvedený příklad slouží jen pro základní orientaci.

Velikost spádu H je závislá na rozdílu hladin a průtoku. U vodních elektráren s velmi malým spádem se při zvětšujícím průtoku spád snižuje, a proto klesá i výkon vodní elektrárny.

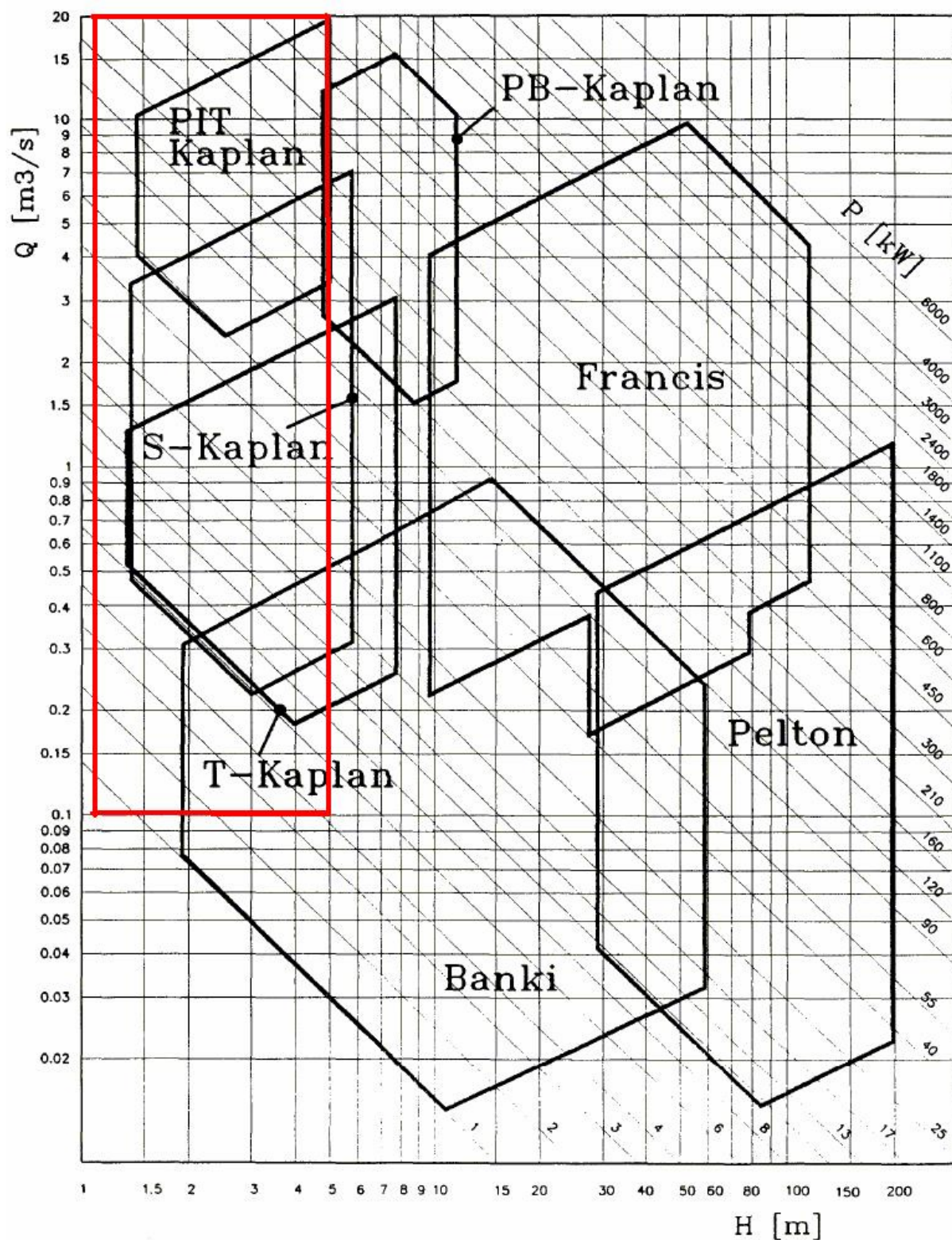
4. Problematika velmi malých spádů

Při návrhu vodní elektrárny pro malé spády je nutné uvažovat kolísání spádu v závislosti na průtoku. Při vysokém stavu vodní hladiny se spád snižuje, příčinou je vzdutí vody pod vzdouvacím zařízením. Například hladina pod jezem a nad jezem se může při povodňových stavech téměř vyrovnat. Proto je nutné počítat s tím, že elektrárna bude několik dní v roce mimo provoz v důsledku ztráty spádu. Minimální hydroenergeticky využitelný spád je pro vírové turbíny 1 m, pro Kaplanovi turbíny 1,5 m. Naopak při nízkém stavu vodní hladiny se spád zvyšuje. Spád lze zvýšit instalací jezových klapek na korunu jezu, nutnou podmínkou je ovšem souhlas majitelů přilehlých pozemků a orgánů státní správy, protože v důsledku instalace takového zařízení stoupne vodní hladina. Další možností zvýšení spádu je výstavba derivačního a odpadního kanálu, podél vodního toku. V tomto případě je nutné počítat se zvýšenými náklady na výkup pozemků a úpravu kanálu.



Obr. 1: Výška vodní hladiny v závislosti na průtoku - příklad (zdroj - www.pvl.cz)

Dále je nezbytné počítat s manipulačním řádem dané elektrárny. V zájmu ochrany přírody musí být většinou část vody ponechána v původním řečišti a nelze ji tedy využít pro výrobu elektrické energie v MVE. Často je třeba při výstavbě počítat s vybudováním rybiho přechodu, který také mírně snižuje využitelný průtok.

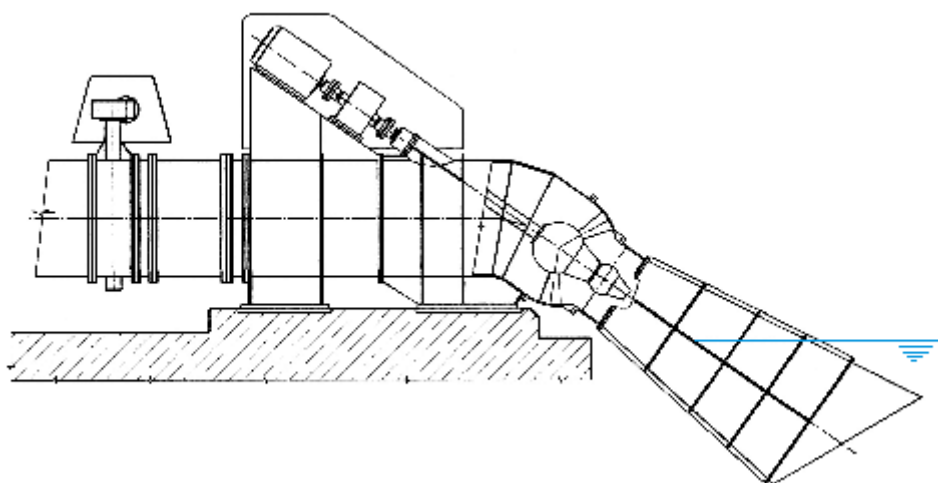


Obr. 2: $Q - H$ diagram – orientační oblast použití turbín (Vírová turbína – červená oblast)

5. Technická řešení pro velmi malé spády – turbíny

Kaplanova turbína

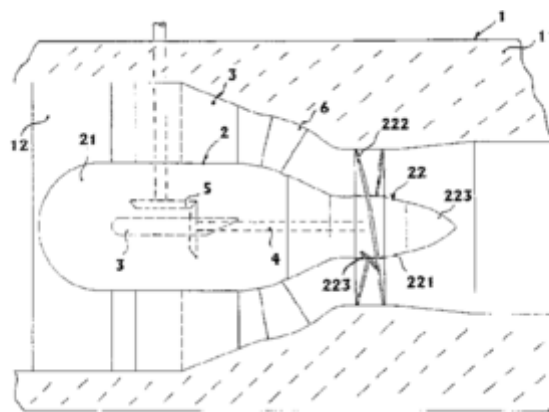
Kaplanova turbína se skládá ze spirály, z rozváděcího kola, oběžného kola a savky. Rozváděcí kolo distribuuje vodu podle průtoku a stavu vodní hladiny na lopatky oběžného kola a tím optimalizuje výkon turbíny. Savka zajišťuje další dodatečnou přeměnu části přivedené zůstatkové hydraulické energie vody v mechanickou energii hřídele. Jedná se o rychlostní přetlakovou turbínu, dosahuje účinnosti až 95% a je použitelná pro spády 1,5 – 75 m. Pro malé spády má Kaplanova turbína 3 – 5 lopat oběžného kola. Existuje několik typů provedení, pro velmi malé spády se nejčastěji používá přímoproudá varianta.



Obr. 3: Schéma Kaplanovi přímoproudé turbíny

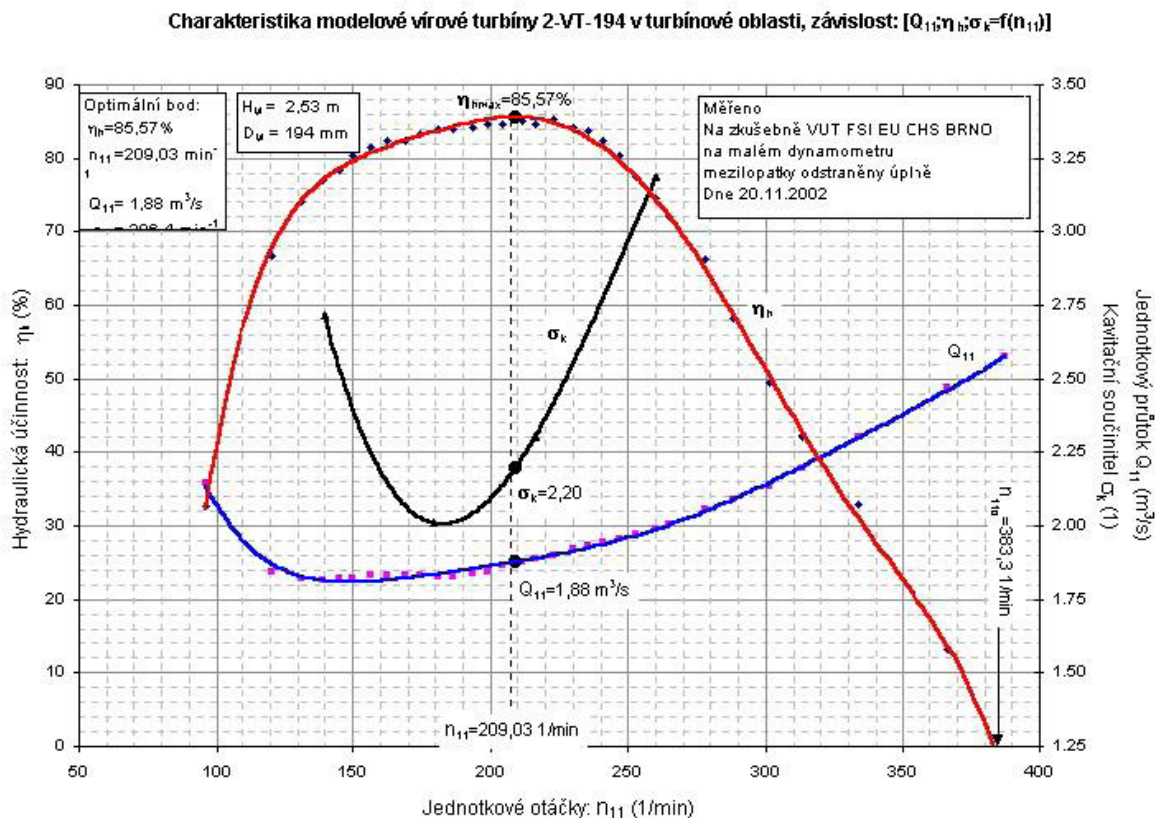
Vírová turbína

V roce 2000 byla vědeckým týmem v čele s Profesorem Ing. Františkem Pochylým, CSc. z FSI VUT v Brně vyvinuta vírová turbína. Jedná se o novou koncepci vodní turbíny určenou speciálně pro malé spády (1 – 3 m) a velké průtoky (dle velikosti oběžného kola). Jde ve své podstatě o upravenou Kaplanovu turbínu. Princip spočívá v tom, že voda vstupuje do oběžného kola ve směru osy rotace a za ním obíhá proti směru rotace kola. Voda vstupuje do sací roury s určitou rotační složkou. Turbína se obejde bez rozváděcího kola. Pracuje s vyššími otáčkami než Kaplanova turbína a proto v určitých případech není nutné používat převodovku. První prototyp dvoulopátkové vírové turbíny byl vyzkoušen v roce 2000 a při spádu 2,5 m dosahoval účinnosti 86%. První konstrukce vodní elektrárny s vírovou turbínou byla realizována v Krásněvsi na Českomoravské vrchovině. Hlavní výhodou vírové turbíny je její schopnost pracovat od spádu 1 m do 3 m. Nevýhodou je nižší účinnost v porovnání s Kaplanovou turbínou pro spády větší než 3 m.



Obr. 4: Schéma vírové turbíny (zdroj - www.upv.cz)

Turbína pro nízké spády a vysoké průtoky kapaliny sestává ze statoru (1), v komoře (12) jehož tělesa (11) je uchycen rotor (2) s oběžným kolem (22) uloženým na hřídeli (4), vyvedeném vně komory (12) tělesa (11). Podstata řešení spočívá v tom, že na středovém náboji (221) jsou vytvořeny minimálně dvě oběžné lopatky (222) ve tvaru zborcené šroubové plochy, jejíž zborcení se směrem ke středovému náboji (221) zvyšuje, přičemž maximální rozdíl mezi vstupním a výstupním úhlem oběžné lopatky (222) je menší než 25° a úhel (.f.l.) opsání oběžné lopatky (222) je menší nebo roven 125° .

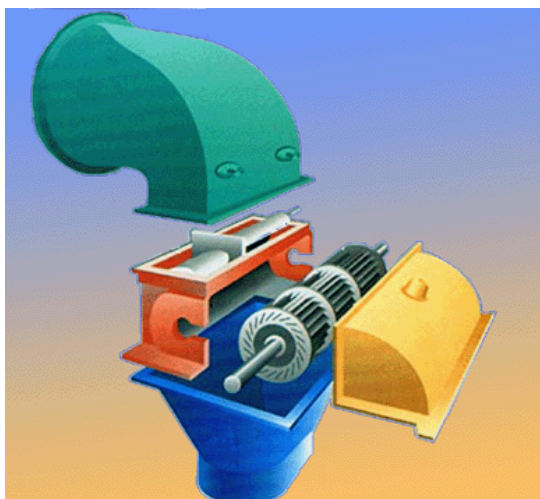


Obr. 5: Charakteristika vírové turbíny v turbínové oblasti - příklad

Cena oběžného kola vírové turbíny je přibližně 2x nižší než cena oběžného kola Kaplanovi turbíny. 25 – 30% ceny turbíny tvoří oběžné kolo, zbytek ceny připadá na rozváděcí kolo a plášť. Oběžné kolo vodní elektrárny tvoří zhruba 1:20 – 1:25 výsledné ceny stavby MVE. Použití vírové turbíny proto představuje úsporu nákladů a vzhledem ke svému pracovnímu rozsahu zvyšuje celkovou výrobu elektrické energie z MVE v oblasti velmi nízkých spádů.

Bánkiho turbína

Jedná se o rovnotlakou turbínu s jednoduchou konstrukcí. Oběžné kolo s pevnými lopatkami je uloženo na horizontální hřídeli. Voda proudí přes vtokový kus obdélníkového průřezu na část oběžného kola a dvakrát jím proteče než skončí v odpadním kanálu. Průtok se reguluje klapkou. Turbína je použitelná pro velmi malé spády jen při velmi malých průtocích, z čehož vyplývá nízký maximální výkon v řádu jednotek kW, který lze získat. Proto není tato turbína v tomto případě z energetického hlediska příliš zajímavá. V případě velmi malých spádů je použitelná pro malé domácí elektrárny, které ovšem nepředstavují velké investiční příležitosti.



Obr. 6: Zjednodušené schéma Bánkiho turbíny

V ČR existuje několik výrobců, kteří se zabývají výstavbou MVE a výrobou komponent.

Výrobci MVE a zařízení: ČKD Blansko
 Mavel
 Exmont
 Hydrohrom
 Ziromont

6. Případová studie – příklad roční výroby elektrické energie z MVE

Pro účely případové studie byla vybrána lokalita Nespeky – Sázava. Cílem případové studie je získat data o množství vyrobené elektrické energie za období 1 roku ve fiktivní nově postavené MVE, ve které budou nainstalovány 2 Vírové turbíny. Jejich použití je vhodné zejména s ohledem na velmi malý spád. K dispozici jsou data o velikosti průměrných denních průtoků za období 1 roku + sada dat o stavu vodní hladiny při daném průtoku. Nejprve bude určena závislost mezi průtokem a stavem vodní hladiny, poté bude s její pomocí pro každý daný průměrný denní průtok za období 1 roku určen stav vodní hladiny a ten bude využit pro výpočet čistého spádu. Z vypočtených dat spádu, průtoku a účinností bude vypočítána celková výroba elektrické energie v daném roce. Technická specifikace trubín se určuje na základě hodnoty Q_a , která je pro lokalitu Nespeky – Sázava rovna 23,4 m³/s. Pro dané Q_a platí:

$$Q_{90} \approx (Q_a - Q_o) * 1,15 \quad (7)$$

Q_aprůměrný roční průtok [m³*s⁻¹]

Q_onevyužitelné odběry [m³*s⁻¹]

$Q_{90} \approx 22$90-ti denní průtok [m³*s⁻¹]

průtok[m ³ /s]	v.stav [cm]	průtok[m ³ /s]	v.stav [cm]	průtok[m ³ /s]	v.stav [cm]	průtok[m ³ /s]	v.stav [cm]
4,54	39,80	8,63	55,40	9,73	58,90	12,22	66,30
6,63	48,40	8,69	55,60	9,76	59,00	12,34	66,60
6,74	48,80	8,75	55,80	9,79	59,10	12,50	67,00
7,17	50,40	8,84	56,10	9,83	59,20	12,78	67,70
7,74	52,40	8,90	56,30	9,86	59,30	13,02	68,30
7,77	52,50	8,93	56,40	9,96	59,60	13,26	68,90
7,80	52,60	9,05	58,20	10,03	59,80	13,60	70,00
7,91	53,00	9,06	56,80	10,13	60,10	13,68	70,20
7,94	53,10	9,12	57,00	10,22	60,40	13,76	70,40
8,12	53,70	9,15	57,10	10,31	60,70	13,80	70,50
8,18	53,90	9,22	57,30	10,49	61,30	14,04	71,10
8,24	54,10	9,25	57,40	10,86	62,40	14,12	71,30
8,27	54,20	9,28	57,50	11,28	63,60	14,16	71,40
8,30	54,30	9,31	57,60	11,31	63,70	14,20	71,50
8,33	54,40	9,38	57,80	11,40	64,00	14,24	71,60
8,42	54,70	9,41	57,90	11,44	64,10	14,36	71,90
8,45	54,80	9,47	58,10	11,56	64,40	14,40	72,00
8,48	54,90	9,50	58,20	11,64	64,60	22,38	90,20
8,54	55,10	9,66	58,70	11,68	64,70	28,00	102,00
8,57	55,20	9,70	58,80	11,86	65,20	x	x

Tab. 4: Data o průtoku a spádu v lokalitě Nespeky – Sázava (zdroj www.pvl.cz)

Z dat o průtoku z tabulky č. 5 za uvažovaný rok lze usoudit, že se z hydrologického hlediska jedná o mírně podprůměrný rok. V tomto roce je průměrný průtok 19,88 což je cca 85% Q_a .

Technická specifikace MVE:

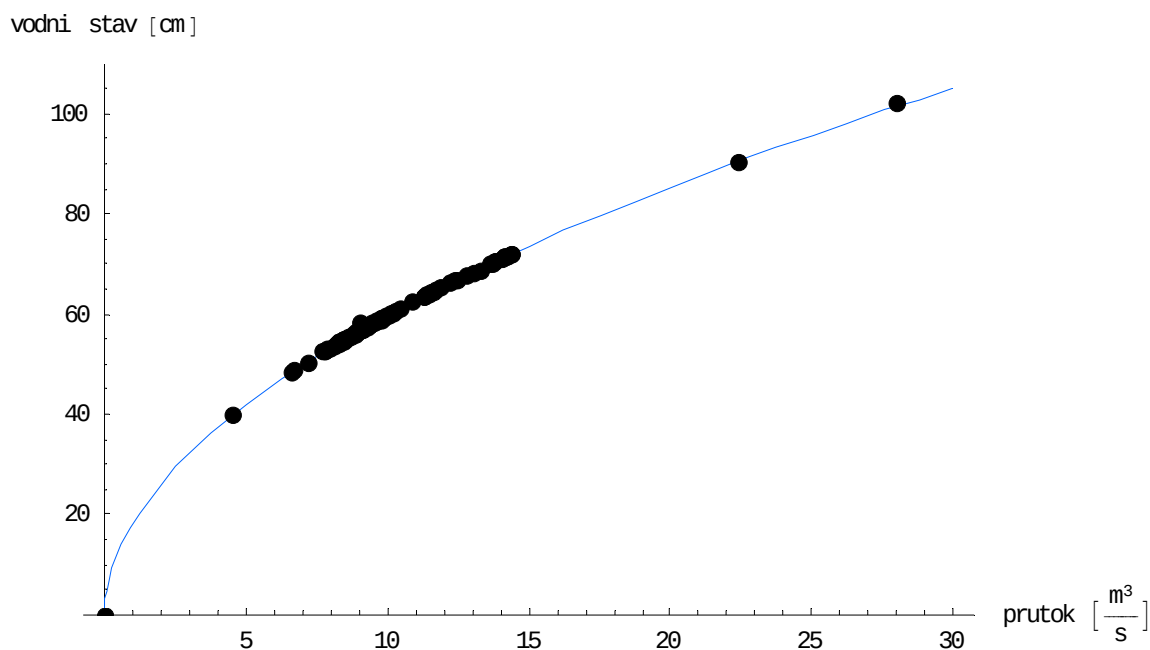
Typ turbín:	2 x vírová t.
Maximální hltnost:	2 x 11 m ³ /s
Typ generátorů:	synchronní
Průměrná účinnost turbín:	79%
Účinnost převodovek:	98%
Účinnost generátorů:	95%
Účinnost trafa:	96%
Min. průtok turbínou:	3,66 m ³ /s
Hrubý spád při průtoku 22 m ³ /s:	2 m
Čistý spád při průtoku 22 m ³ /s:	1,9 m
Odběr vody – biologický průtok Q ₃₅₅ :	3,42 m ³ /s
Odběr vody –rybí přechod:	0,1 m ³ /s
Typ elektrárny:	jezová s krátkým odpadním kanálem

den	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
1	74,31	81,93	74,33	81,12	65,33	50,19	50,22	53,39	45,60	55,27	81,40	93,10
2	81,40	74,21	71,71	79,26	66,12	48,72	50,66	51,76	45,52	55,83	79,40	93,73
3	83,98	76,94	88,57	74,58	66,26	48,39	54,44	50,08	45,64	56,45	82,65	94,09
4	88,20	81,65	96,48	87,07	67,81	70,22	55,54	48,12	46,08	55,54	84,73	112,35
5	87,05	83,91	102,47	91,76	64,74	70,43	60,14	47,28	46,39	55,93	91,96	121,77
6	95,97	105,37	108,35	82,20	62,36	90,46	69,90	43,74	46,51	57,23	94,27	125,90
7	94,35	86,12	110,35	80,10	60,44	71,58	65,95	43,28	49,49	57,45	97,07	129,72
8	89,89	81,12	117,02	82,90	59,66	64,40	85,85	42,74	49,64	57,77	104,57	126,93
9	85,74	85,88	114,15	76,72	58,22	67,04	81,67	44,19	50,01	59,71	107,65	125,30
10	88,14	96,42	122,20	79,85	57,31	70,01	73,93	43,16	50,26	57,80	112,74	124,06
11	122,12	90,23	141,09	78,00	55,60	71,37	62,12	42,06	50,87	58,09	116,61	125,75
12	117,61	85,61	156,82	81,21	54,41	66,29	55,90	38,95	50,94	58,75	114,32	123,69
13	111,18	82,68	161,29	83,40	54,10	62,86	52,91	39,00	51,51	63,44	122,82	119,03
14	107,46	80,08	180,55	87,31	52,91	53,76	51,37	38,63	51,79	66,60	127,25	112,57
15	102,01	79,35	275,26	96,09	52,18	51,76	52,14	38,77	51,09	60,56	123,30	110,71
16	100,89	76,97	260,62	92,04	51,37	52,91	50,98	38,21	51,05	62,60	115,13	109,16
17	96,95	80,43	246,58	87,84	50,87	51,62	51,76	37,35	51,97	63,44	19,15	96,09
18	90,43	81,90	232,42	85,17	50,66	49,35	51,65	36,29	51,05	64,25	123,70	83,71
19	88,12	89,22	219,64	100,47	51,23	50,98	51,58	35,99	53,25	65,28	150,66	81,90
20	101,86	93,28	205,48	91,08	51,37	53,66	51,26	33,42	53,53	67,51	159,39	87,31
21	107,61	94,01	192,44	87,61	51,83	53,39	50,80	32,39	54,51	69,61	138,52	96,11
22	101,71	122,12	175,51	82,15	53,66	53,25	49,24	32,23	55,34	65,95	129,72	114,10
23	102,89	117,77	166,30	76,46	71,40	48,94	48,83	31,56	55,04	71,82	123,72	122,24
24	99,83	99,83	145,64	71,94	53,80	65,95	47,28	29,17	55,67	80,47	115,46	96,44
25	98,11	83,91	134,55	69,08	51,69	54,07	46,86	29,23	56,45	76,38	110,64	85,90
26	96,11	83,82	122,30	73,93	50,19	50,22	44,84	38,58	55,74	76,07	107,38	81,70
27	93,10	88,54	114,28	71,14	47,62	49,35	42,23	33,74	56,32	71,76	106,50	78,98
28	81,72	86,44	105,67	73,60	45,88	48,94	53,70	32,23	55,77	68,70	101,71	76,72
29	79,14	x	100,12	71,37	46,43	49,35	61,56	34,37	53,87	71,66	98,36	75,84
30	81,72	x	94,01	69,02	46,51	49,60	57,71	85,61	54,61	76,75	96,42	73,70
31	86,12	x	88,06	x	49,93	x	54,37	56,55	x	79,35	x	74,21

Tab. 5: Průměrné denní hodnoty průtoku (v m³/s) lokalita Nespeky – Sázava

7. Případová studie – získaná data

V programu CurveExpert byl s pomocí vstupních dat nalezen matematický model závislosti průtoku na stavu vodní hladiny. Model byl dosazen do programu Mathematika a pro každou hodnotu průtoku v daném roce byl zjištěn příslušný stav vodní hladiny. Vypočítaný stav vodní hladiny byl porovnán se skutečností, že při čistém spádu 1,9 m je výška hladiny 89,66 cm a průtok 22 m³/s. Výsledkem je čistý spád, který dále slouží pro výpočet průměrného denního výkonu a celkového množství vyrobené energie za uvažovaný rok.



Obr. 7: Závislost stavu vodní hladiny na průtoku v lokalitě Nespeky – Sázava

den	využitelný Q [m ³ /s]	skut. využitý Q [m ³ /s]	č. spád[m]	výkon[kW]	výroba [kWh]
1	11,75	11,75	2,05	167,13	4011,15
2	14,71	14,71	1,98	202,01	4848,24
3	15,85	15,85	1,96	214,83	5155,99
4	17,79	17,79	1,91	235,92	5662,09
5	17,25	17,25	1,93	230,14	5523,40
6	21,59	21,59	1,84	274,70	6592,73
7	20,77	20,77	1,85	266,60	6398,45
8	18,59	18,59	1,90	244,36	5864,55
9	16,65	16,65	1,94	223,64	5367,34
10	17,76	17,76	1,92	235,60	5654,43
11	36,59	22,00	1,58	240,07	5761,77
12	33,76	22,00	1,62	246,95	5926,74
13	29,90	22,00	1,68	256,75	6161,89
14	27,76	22,00	1,72	262,42	6297,96
15	24,75	22,00	1,78	270,72	6497,26
16	24,15	22,00	1,79	272,43	6538,20
17	22,09	22,00	1,83	278,42	6682,15

18	18,85	18,85	1,89	247,07	5929,58
19	17,75	17,75	1,92	235,49	5651,88
20	24,67	22,00	1,78	270,95	6502,70
21	27,85	22,00	1,72	262,17	6292,15
22	24,59	22,00	1,78	271,17	6508,14
23	25,23	22,00	1,77	269,37	6464,81
24	23,59	22,00	1,80	274,03	6576,80
25	22,69	22,00	1,82	276,65	6639,66
26	21,66	21,66	1,84	275,38	6609,16
27	20,15	20,15	1,87	260,38	6249,20
28	14,85	14,85	1,98	203,60	4886,46
29	13,74	13,74	2,01	190,84	4580,10
30	14,85	14,85	1,98	203,60	4886,46
31	16,82	16,82	1,94	225,49	5411,77
32	14,94	14,94	1,98	204,62	4910,96
33	11,71	11,71	2,05	166,64	3999,45
34	12,82	12,82	2,03	180,01	4320,28
35	14,82	14,82	1,98	203,26	4878,28
36	15,82	15,82	1,96	214,50	5148,00
37	26,59	22,00	1,74	265,59	6374,28
38	16,82	16,82	1,94	225,49	5411,77
39	14,59	14,59	1,99	200,64	4815,38
40	16,71	16,71	1,94	224,29	5383,04
41	21,82	21,82	1,83	276,94	6646,60
42	18,75	18,75	1,89	246,03	5904,61
43	16,59	16,59	1,94	222,98	5351,62
44	15,27	15,27	1,97	208,35	5000,40
45	14,14	14,14	2,00	195,47	4691,38
46	13,83	13,83	2,00	191,88	4605,23
47	12,83	12,83	2,03	180,13	4323,14
48	14,29	14,29	1,99	197,20	4732,86
49	14,93	14,93	1,98	204,51	4908,24
50	18,27	18,27	1,90	241,00	5783,99
51	20,24	20,24	1,86	261,29	6270,99
52	20,60	20,60	1,86	264,91	6357,73
53	36,59	22,00	1,58	240,07	5761,77
54	33,86	22,00	1,62	246,70	5920,81
55	23,59	22,00	1,80	274,03	6576,80
56	15,82	15,82	1,96	214,50	5148,00
57	15,78	15,78	1,96	214,06	5137,32
58	17,95	17,95	1,91	237,62	5702,87
59	16,97	16,97	1,93	227,12	5450,83
60	11,76	11,76	2,05	167,25	4014,08
61	10,73	10,73	2,08	154,55	3709,26
62	17,96	17,96	1,91	237,73	5705,41
63	21,85	21,85	1,83	277,23	6653,61
64	25,00	22,00	1,77	270,01	6480,33
65	28,27	22,00	1,71	261,05	6265,13
66	29,42	22,00	1,69	258,00	6192,03

67	33,40	22,00	1,63	247,84	5948,15
68	31,66	22,00	1,66	252,21	6053,12
69	36,64	22,00	1,57	239,95	5758,91
70	49,59	22,00	1,39	211,16	5067,94
71	61,71	22,00	1,23	187,19	4492,48
72	65,37	22,00	1,18	180,38	4329,14
73	82,26	22,00	0,99	0,00	0,00
74	191,21	22,00	0,04	0,00	0,00
75	171,59	22,00	0,19	0,00	0,00
76	153,71	22,00	0,33	0,00	0,00
77	136,64	22,00	0,47	0,00	0,00
78	122,04	22,00	0,60	0,00	0,00
79	106,79	22,00	0,74	0,00	0,00
80	93,59	22,00	0,87	0,00	0,00
81	77,67	22,00	1,04	158,71	3809,01
82	69,59	22,00	1,13	172,75	4145,96
83	52,97	22,00	1,34	204,23	4901,56
84	44,91	22,00	1,45	221,13	5307,06
85	36,71	22,00	1,57	239,79	5754,90
86	31,74	22,00	1,65	252,01	6048,24
87	26,76	22,00	1,74	265,13	6363,10
88	23,74	22,00	1,80	273,60	6566,43
89	20,60	20,60	1,86	264,91	6357,73
90	17,72	17,72	1,92	235,18	5644,21
91	14,59	14,59	1,99	200,64	4815,38
92	13,79	13,79	2,00	191,42	4594,06
93	11,86	11,86	2,05	168,47	4043,29
94	17,26	17,26	1,93	230,25	5525,98
95	19,49	19,49	1,88	253,67	6088,08
96	15,06	15,06	1,97	205,98	4943,56
97	14,15	14,15	2,00	195,59	4694,15
98	15,37	15,37	1,97	209,47	5027,37
99	12,73	12,73	2,03	178,94	4294,57
100	14,04	14,04	2,00	194,32	4663,66
101	13,26	13,26	2,02	185,22	4445,22
102	14,63	14,63	1,98	201,10	4826,34
103	15,59	15,59	1,96	211,94	5086,49
104	17,37	17,37	1,92	231,43	5554,36
105	21,65	21,65	1,84	275,28	6606,81
106	19,63	19,63	1,88	255,10	6122,45
107	17,62	17,62	1,92	234,11	5618,61
108	16,39	16,39	1,94	220,79	5299,06
109	23,93	22,00	1,79	273,06	6553,32
110	19,16	19,16	1,89	250,28	6006,63
111	17,51	17,51	1,92	232,93	5590,39
112	15,04	15,04	1,98	205,76	4938,13
113	12,62	12,62	2,03	177,63	4263,08
114	10,82	10,82	2,08	155,67	3736,19
115	9,73	9,73	2,11	141,92	3406,18

116	11,60	11,60	2,06	165,30	3967,21
117	10,51	10,51	2,09	151,80	3643,19
118	11,47	11,47	2,06	163,71	3928,99
119	10,60	10,60	2,08	152,93	3670,26
120	9,71	9,71	2,11	141,67	3400,04
121	8,37	8,37	2,14	124,26	2982,16
122	8,65	8,65	2,14	127,94	3070,61
123	8,70	8,70	2,13	128,60	3086,34
124	9,26	9,26	2,12	135,88	3261,22
125	8,16	8,16	2,15	121,48	2915,43
126	7,34	7,34	2,17	110,48	2651,49
127	6,70	6,70	2,19	101,74	2441,66
128	6,44	6,44	2,20	98,20	2356,76
129	5,98	5,98	2,21	91,78	2202,78
130	5,70	5,70	2,22	87,73	2105,42
131	5,17	5,17	2,24	80,24	1925,66
132	4,81	4,81	2,25	75,05	1801,14
133	4,72	4,72	2,26	73,74	1769,82
134	4,37	4,37	2,27	68,64	1647,26
135	4,16	4,16	2,27	65,55	1573,15
136	3,93	3,93	2,28	62,14	1491,46
137	3,79	3,79	2,29	60,06	1441,47
138	3,73	3,73	2,29	59,17	1419,99
139	3,89	3,89	2,28	61,55	1477,20
140	3,93	3,93	2,28	62,14	1491,46
141	4,06	4,06	2,28	64,07	1537,70
142	4,59	4,59	2,26	71,85	1724,44
143	10,61	10,61	2,08	153,05	3673,27
144	4,63	4,63	2,26	72,43	1738,42
145	4,02	4,02	2,28	63,48	1523,49
146	3,60	0,00	2,29	0,00	0,00
147	2,91	0,00	2,32	0,00	0,00
148	2,46	0,00	2,34	0,00	0,00
149	2,60	0,00	2,33	0,00	0,00
150	2,62	0,00	2,33	0,00	0,00
151	3,53	0,00	2,30	0,00	0,00
152	3,60	0,00	2,29	0,00	0,00
153	3,20	0,00	2,31	0,00	0,00
154	3,11	0,00	2,31	0,00	0,00
155	10,16	10,16	2,09	147,39	3537,38
156	10,24	10,24	2,09	148,40	3561,65
157	18,86	18,86	1,89	247,17	5932,07
158	10,68	10,68	2,08	153,93	3694,27
159	8,04	8,04	2,15	119,88	2877,14
160	8,98	8,98	2,13	132,25	3174,07
161	10,08	10,08	2,10	146,38	3513,07
162	10,60	10,60	2,08	152,93	3670,26
163	8,71	8,71	2,13	128,73	3089,48
164	7,51	7,51	2,17	112,78	2706,65

165	4,62	4,62	2,26	72,29	1734,93
166	4,04	4,04	2,28	63,77	1530,59
167	4,37	4,37	2,27	68,64	1647,26
168	4,00	4,00	2,28	63,18	1516,38
169	3,37	3,37	2,30	0,00	0,00
170	3,82	3,82	2,29	60,51	1452,20
171	4,59	4,59	2,26	71,85	1724,44
172	4,51	4,51	2,26	70,68	1696,43
173	4,47	4,47	2,26	70,10	1682,40
174	3,26	3,26	2,31	0,00	0,00
175	8,59	8,59	2,14	127,15	3051,71
176	4,71	4,71	2,26	73,60	1766,34
177	3,61	3,61	2,29	0,00	0,00
178	3,37	3,37	2,30	0,00	0,00
179	3,26	3,26	2,31	0,00	0,00
180	3,37	3,37	2,30	0,00	0,00
181	3,44	3,44	2,30	0,00	0,00
182	3,61	3,61	2,29	0,00	0,00
183	3,73	3,73	2,29	59,17	1419,99
184	4,82	4,82	2,25	75,19	1804,62
185	5,15	5,15	2,24	79,95	1918,78
186	6,60	6,60	2,20	100,36	2408,56
187	10,04	10,04	2,10	145,87	3500,90
188	8,59	8,59	2,14	127,15	3051,71
189	16,70	16,70	1,94	224,18	5380,42
190	14,83	14,83	1,98	203,38	4881,00
191	11,60	11,60	2,06	165,30	3967,21
192	7,26	7,26	2,18	109,39	2625,44
193	5,26	5,26	2,24	81,52	1956,60
194	4,37	4,37	2,27	68,64	1647,26
195	3,93	3,93	2,28	62,14	1491,46
196	4,15	4,15	2,28	65,40	1569,61
197	3,82	3,82	2,29	60,51	1452,20
198	4,04	4,04	2,28	63,77	1530,59
199	4,01	4,01	2,28	63,33	1519,93
200	3,99	3,99	2,28	63,03	1512,82
201	3,90	3,90	2,28	61,70	1480,76
202	3,77	3,77	2,29	59,76	1434,31
203	3,34	0,00	2,30	0,00	0,00
204	3,23	0,00	2,31	0,00	0,00
205	2,82	0,00	2,32	0,00	0,00
206	2,71	0,00	2,33	0,00	0,00
207	2,20	0,00	2,35	0,00	0,00
208	1,57	0,00	2,37	0,00	0,00
209	4,60	4,60	2,26	72,00	1727,94
210	7,07	7,07	2,18	106,81	2563,38
211	5,82	5,82	2,22	89,48	2147,43
212	4,80	4,80	2,25	74,90	1797,67
213	4,51	4,51	2,26	70,68	1696,43

214	4,04	4,04	2,28	63,77	1530,59
215	3,57	0,00	2,30	0,00	0,00
216	3,04	0,00	2,32	0,00	0,00
217	2,82	0,00	2,32	0,00	0,00
218	1,93	0,00	2,36	0,00	0,00
219	1,82	0,00	2,36	0,00	0,00
220	1,69	0,00	2,37	0,00	0,00
221	2,04	0,00	2,35	0,00	0,00
222	1,79	0,00	2,37	0,00	0,00
223	1,53	0,00	2,38	0,00	0,00
224	0,83	0,00	2,41	0,00	0,00
225	0,84	0,00	2,41	0,00	0,00
226	0,76	0,00	2,41	0,00	0,00
227	0,79	0,00	2,41	0,00	0,00
228	0,67	0,00	2,41	0,00	0,00
229	0,49	0,00	2,42	0,00	0,00
230	0,27	0,00	2,43	0,00	0,00
231	0,21	0,00	2,44	0,00	0,00
232	0,00	0,00	2,46	0,00	0,00
233	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00
234	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00
235	0,00	0,00	2,48	0,00	0,00
236	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
237	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
238	0,75	0,00	2,41	0,00	0,00
239	0,00	0,00	2,46	0,00	0,00
240	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00
241	0,00	0,00	2,45	0,00	0,00
242	16,59	16,59	1,94	222,98	5351,62
243	5,46	5,46	2,23	84,38	2025,08
244	2,39	0,00	2,34	0,00	0,00
245	2,37	0,00	2,34	0,00	0,00
246	2,40	0,00	2,34	0,00	0,00
247	2,51	0,00	2,34	0,00	0,00
248	2,59	0,00	2,33	0,00	0,00
249	2,62	0,00	2,33	0,00	0,00
250	3,41	0,00	2,30	0,00	0,00
251	3,45	0,00	2,30	0,00	0,00
252	3,55	0,00	2,30	0,00	0,00
253	3,62	0,00	2,29	0,00	0,00
254	3,79	3,79	2,29	60,06	1441,47
255	3,81	3,81	2,29	60,36	1448,62
256	3,97	3,97	2,28	62,74	1505,70
257	4,05	4,05	2,28	63,92	1534,15
258	3,85	3,85	2,29	60,95	1462,92
259	3,84	3,84	2,29	60,81	1459,35
260	4,10	4,10	2,28	64,66	1551,89
261	3,84	3,84	2,29	60,81	1459,35
262	4,47	4,47	2,26	70,10	1682,40

263	4,55	4,55	2,26	71,27	1710,44
264	4,84	4,84	2,25	75,48	1811,57
265	5,09	5,09	2,24	79,09	1898,10
266	5,00	5,00	2,25	77,79	1867,01
267	5,19	5,19	2,24	80,52	1932,54
268	5,43	5,43	2,23	83,95	2014,83
269	5,21	5,21	2,24	80,81	1939,42
270	5,39	5,39	2,23	83,38	2001,16
271	5,22	5,22	2,24	80,95	1942,86
272	4,65	4,65	2,26	72,73	1745,41
273	4,87	4,87	2,25	75,92	1821,98
274	5,07	5,07	2,24	78,80	1891,20
275	5,24	5,24	2,24	81,24	1949,73
276	5,43	5,43	2,23	83,95	2014,83
277	5,15	5,15	2,24	79,95	1918,78
278	5,27	5,27	2,24	81,67	1960,03
279	5,67	5,67	2,22	87,36	2096,59
280	5,74	5,74	2,22	88,35	2120,34
281	5,84	5,84	2,22	89,76	2154,19
282	6,46	6,46	2,20	98,42	2362,08
283	5,85	5,85	2,22	89,90	2157,57
284	5,94	5,94	2,22	91,16	2187,95
285	6,15	6,15	2,21	94,11	2258,56
286	7,71	7,71	2,16	115,47	2771,25
287	8,82	8,82	2,13	130,17	3124,01
288	6,74	6,74	2,19	102,29	2454,87
289	7,42	7,42	2,17	111,56	2677,48
290	7,71	7,71	2,16	115,47	2771,25
291	7,99	7,99	2,15	119,21	2861,15
292	8,35	8,35	2,14	123,99	2975,82
293	9,15	9,15	2,12	134,46	3227,05
294	9,93	9,93	2,10	144,47	3467,37
295	8,59	8,59	2,14	127,15	3051,71
296	10,77	10,77	2,08	155,05	3721,23
297	14,31	14,31	1,99	197,43	4738,37
298	12,59	12,59	2,03	177,27	4254,47
299	12,46	12,46	2,04	175,71	4217,12
300	10,75	10,75	2,08	154,80	3715,25
301	9,59	9,59	2,11	140,13	3363,17
302	10,71	10,71	2,08	154,30	3703,27
303	12,74	12,74	2,03	179,06	4297,43
304	13,83	13,83	2,00	191,88	4605,23
305	14,71	14,71	1,98	202,01	4848,24
306	13,85	13,85	2,00	192,12	4610,80
307	15,26	15,26	1,97	208,24	4997,70
308	16,19	16,19	1,95	218,59	5246,28
309	19,59	19,59	1,88	254,69	6112,64
310	20,73	20,73	1,85	266,20	6388,88
311	22,15	22,00	1,83	278,25	6677,88

312	26,15	22,00	1,75	266,81	6403,35
313	27,87	22,00	1,72	262,12	6290,86
314	30,82	22,00	1,67	254,36	6104,69
315	33,15	22,00	1,63	248,46	5963,08
316	31,76	22,00	1,65	251,96	6047,02
317	37,04	22,00	1,57	239,00	5736,07
318	39,93	22,00	1,52	232,26	5574,19
319	37,35	22,00	1,56	238,27	5718,44
320	32,25	22,00	1,65	250,72	6017,25
321	34,72	22,00	2,61	244,59	5870,12
322	37,61	22,00	1,56	237,65	5703,71
323	56,82	22,00	1,29	196,58	4717,82
324	63,80	22,00	1,20	183,28	4398,67
325	47,73	22,00	1,41	215,07	5161,70
326	41,59	22,00	1,50	228,48	5483,57
327	37,62	22,00	1,56	237,63	5703,14
328	32,45	22,00	1,64	250,21	6005,16
329	29,59	22,00	1,69	257,56	6181,33
330	27,72	22,00	1,72	262,52	6300,55
331	27,22	22,00	1,73	263,88	6333,01
332	24,59	22,00	1,78	271,17	6508,14
333	22,82	22,00	1,81	276,27	6630,52
334	21,82	21,82	1,83	276,94	6646,60
335	20,15	20,15	1,87	260,38	6249,20
336	20,46	20,46	1,86	263,50	6324,08
337	20,64	20,64	1,86	265,31	6367,32
338	30,59	22,00	1,67	254,96	6118,92
339	36,37	22,00	1,58	240,60	5774,39
340	39,04	22,00	1,54	234,31	5623,47
341	41,59	22,00	1,50	228,48	5483,57
342	39,72	22,00	1,53	232,74	5585,77
343	38,65	22,00	1,54	235,22	5645,22
344	37,84	22,00	1,56	237,11	5690,71
345	38,94	22,00	1,54	234,54	5629,04
346	37,60	22,00	1,56	237,68	5704,27
347	34,64	22,00	1,61	244,78	5874,81
348	30,72	22,00	1,67	254,62	6110,87
349	29,63	22,00	1,69	257,45	6178,82
350	28,73	22,00	1,71	259,82	6235,74
351	21,65	21,65	1,84	275,28	6606,81
352	15,73	15,73	1,96	213,50	5123,97
353	14,93	14,93	1,98	204,51	4908,24
354	17,37	17,37	1,92	231,43	5554,36
355	21,66	21,66	1,84	275,38	6609,16
356	31,63	22,00	1,66	252,29	6054,95
357	36,67	22,00	1,57	239,88	5757,19
358	21,83	21,83	1,83	277,04	6648,93
359	16,72	16,72	1,94	224,40	5385,65
360	14,84	14,84	1,98	203,49	4883,73

361	13,67	13,67	2,01	190,02	4560,52
362	12,73	12,73	2,03	178,94	4294,57
363	12,37	12,37	2,04	174,63	4191,20
364	11,51	11,51	2,06	164,20	3940,76
365	11,71	11,71	2,05	166,64	3999,45

Tab. 6: Výroba elektrické energie z MVE – vypočítaná data

Tržní cena silové elektřiny.....1,41 Kč/kWh
Celkové množství vyrobené elektrické energie.....1247,63 [MWh]
Celkové tržby (zel. bonus + tržní cena).....3 505 840,- [Kč]

8. Závěr a zhodnocení výsledků práce

Výsledkem práce je shrnutí problematiky hydroenergetického využívání velmi malých spádů a přehled ekonomicky efektivních technických řešení. Přínosem je upozornění na nový typ technologie - vírovou turbínu, která dokáže využívat nižší spády než turbína Kaplanova a v porovnání s ní pracuje mezi spády 1,5 - cca 3 m s vyšší účinností. Cena Vírové turbíny je přitom nižší, díky jednodušší konstrukci.

Cílem případové studie bylo stanovení množství vyrobené elektrické energie na základě vstupních dat o průtoku a vypočtených dat o velikosti spádu. Byly respektovány biologický průtok, rybí přechod, maximální a minimální hltnost turbín, změna spádu v závislosti na průtoku a konstantní účinnosti turbín. Pro ještě přesnější modelování by bylo třeba znát univerzální turbínovou charakteristiku, ze které by se dala zjistit závislost účinnosti na spádu a průtoku turbínou. Taková charakteristika ovšem není běžně dostupná a výrobci turbín ji neposkytují.

9. Seznam literatury

- [1] Hodák T., Gabriel P., Dušička P., Čihák F.: Malé vodní elektrárny, Jaga 2003
- [2] Úřad průmyslového vlastnictví – www.upv.cz, patent Vírová turbína
- [2] Mišta Z., Rott T.: Zvýšení využití hydroenergetického potenciálu v ČR ve skupině ČEZ, 2008