

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh břehové MVE Terezín s využitím technologie

„DIVE-Turbine“

Design of bank SHPP Terezín using the „DIVE-Turbine“
technology

Vedoucí práce: Dr. Ing. Petr Nowak

2019

Lucie Vodrážková

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vodrážková** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **423820**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra hydrotechniky**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Vodní hospodářství a vodní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh břehové MVE Terezín s využití technologie "Drive-turbine"

Název diplomové práce anglicky:

Design of bank SHPP Terezín using the "Dive-turbine" technoligy

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Dr. Ing. Petr Nowak, katedra hydrotechniky FSv

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

Datum zadání diplomové práce: **01.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Dr. Ing. Petr Nowak
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze, dne 7.1.2019

.....

jméno a příjmení

Poděkování

Ráda bych poděkovala Dr. Ing. Petru Nowakovi a Ing. Jiřímu Součkovi za jejich čas a odborné rady v průběhu tvorby této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Evě Škařupové za pomoc při tvorbě výpočetní sítě a za věcné poznámky k obsahu této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu vhodné tvarové varianty nátokové a odtokové části MVE Terezín při využití technologie „DIVE - Turbine“.

Cílem práce je provést matematickou simulaci nátokové a odtokové části elektrárny a na základě jejího vyhodnocení provést úpravu geometrie tak, aby byly průtočné podmínky co nejvhodnější. Po prvotní analýze dat a výpočtu hydroenergetického potenciálu byly sestaveny prostorové modely, jimž byla následně vytvořena výpočetní síť. Byly nastaveny okrajové podmínky a počáteční podmínka a následně byla spuštěna matematická simulace. Po dokončení konvergence simulace byly výsledky vyhodnoceny a při výskytu problémů byla upravena jejich geometrie.

Z jednotlivých geometrických variant byla na základě výsledků simulací zvolena jedna varianta nátokové a odtokové části, díky níž jsou minimalizovány ztráty a je zvýšena efektivita nátoky a odtoku do a z elektrárny.

Klíčová slova: malá vodní elektrárna, hydroenergetický potenciál, DIVE-Turbine, CFD simulace

Abstract

The purpose of this thesis is to find a suitable shape of inlet and outlet for SHPP Terezín using the „DIVE-Turbine“ technology.

The goal is to perform CFD simulation of the inlet and outlet and to adjust their design according to these calculations to gain the most appropriate flow conditions. Based on the acquired data and results from the hydroenergetic potential computation, 3D model of the power plant was created and mesh was implemented. Consecutively, initial and boundary conditions were set and the simulation was initiated. Once the iteration has been finished, results were evaluated. In case of unfavourable results, the geometry of examined parts was changed.

The most suitable design, which minimalizes energetic loss and maximalizes effectivity of inlet and outlet, was chosen as an appropriate option for future execution.

Key words: small hydropower plant, hydroenergetic potential, DIVE-Turbine, CFD simulation

Obsah

1. Úvod	3
2. Stávající stav	4
2.1 Popis jezu	4
2.2 Fotodokumentace	5
3. Popis MVE	7
4. Technologie „Dive-Turbine“	9
4.1 Jednoduchá regulace	12
4.2 Dvojitá regulace	13
4.3 Hybridní regulace	14
5. Hydroenergetický potenciál lokality	15
5.1 Účinnostní charakteristiky	15
5.2 Průměrné denní průtoky	19
5.3 Průtoky elektrárnou	21
5.4 Čistý spád	25
5.5 Výkon a roční výroba	26
6. Prostorové řešení	28
6.1 Stavební omezení	28
6.2 Optimalizace půdorysného uspořádání	28
6.3 Průtočné profily	31
7. Tvorba 3D modelu	32
7.1 Výpočetní software	32
7.2 Výpočetní síť	32
7.3 Fyzikální parametry modelu	33
7.4 Model nátokové části	33
7.4.1 Rozdělení výpočetní sítě	34
7.4.2 Stanovení horní okrajové podmínky	35
7.4.3 Stanovení dolní okrajové podmínky	35
7.4.4 Okrajové podmínky	35
7.5 Model odtokové části	48

7.5.1 Rozdělení výpočetní sítě.....	49
7.5.2 Stanovení horní okrajové podmínky	50
7.5.3 Stanovení dolní okrajové podmínky.....	50
7.5.4 Okrajové podmínky	50
7.6 Počáteční podmínka	60
8. Vyhodnocení výstupů z modelu	60
8.1 Model nátokové části	61
8.1.1 Varianta A1	62
8.1.2 Varianta A2	67
8.1.3 Varianta A3	72
8.1.4 Porovnání.....	84
8.2 Model odtokové části	88
8.2.1 Varianta B1	88
8.2.2 Varianta B2.....	94
8.2.3 Porovnání.....	99
9. Závěr.....	102
10. Použitá literatura.....	103
11. Seznam obrázků.....	104
12. Seznam tabulek.....	107
13. Seznam grafů	108

1. Úvod

Obcí Terezín, nacházející se v okrese Litoměřice v Ústeckém kraji, protéká řeka Ohře. Na východním okraji města Terezín se v ř. km 2,626 nachází pohyblivý jez. Hydroenergetický potenciál vzniklý výstavbou tohoto stupně není doposud využíván. Proto má být na pravém břehu řeky Ohře v jezovém profilu vybudována malá vodní elektrárna.

Vzhledem k historii města Terezín je celá oblast obce památkově chráněna. Proto je nutné brát při návrhu nové MVE Terezín ohledy na stávající stavby, které se nacházejí v okolí plánované výstavby této elektrárny.

Jako vhodné řešení pro tuto lokalitu se jeví využití německé technologie „DIVE-Turbine“. Tím bude zajištěno využití spádu vzniklého tímto stupněm za minimalizace stavebních zásahů do břehu a staveb v okolí jezu.

Pro volbu vhodného tvarového řešení je nutné provést prostorovou analýzu průtokových poměrů nátokové a odtokové části plánované MVE Terezín. Na základě této analýzy je možné zvolit ideální tvar nátokové i odtokové části této elektrárny, a tím maximalizovat efektivitu využití spádu vzniklého terezínským stupněm.

V minulosti již byly provedeny studie týkající se výstavby břehové MVE Terezín. Jedná se o studie společnosti Aquatis a.s., ve kterých byly řešeny různé varianty břehové elektrárny v této lokalitě, týkající se osazení přímoproudých, nebo vertikálních Kaplanových turbín. Je tedy možné pro optimalizaci tvarového řešení MVE Terezín s využitím technologie „DIVE-Turbine“ navázat na tyto studie.

2. Stávající stav

Vodní stupeň VD Terezín v ř. km 2,626 řeky Ohře je posledním stupněm před vtokem do Labe. Skládá se z pohyblivého jezu a rybiho přechodu umístěného na levém břehu. VD Terezín je majetkem Povodí Ohře s.p.

2.1 Popis jezu

Vlastní jez je složen ze tří jezových polí o světlosti 22 m. Tato pole jsou oddělena betonovými pilíři s osovou vzdáleností 25 m. Na pravém břehovém pilíři se nachází velín jezu. Jednotlivá pole jsou hrazena dutými ocelovými klapkami s přelivnou hranou při vztyčení na kótě 147,75 m n. m. a při sklopení na kótě 145,48 m n. m. Klapky mají otočnou osu ve výšce 145,30 m n. m. Hradící konstrukce je tvořena hradícím plechem o tloušťce 12 mm a poloměru 5163 mm a je na horní hraně opatřena rozražeči.

Pohyb jezových klapek je umožněn pohybovací troubou, jež je jednostranně připojena na hradící těleso a je zasunutá do jezového pilíře. Na ni je připojena pohybovací páka na konci osazená pístní tyčí hydromotoru.

Každý pilíř je osazen bočními štíty klapek, které umožňují nepřímý ohřev díky nemrznoucí kapalině. Prostor pod klapkou je zavzdušněn pomocí ocelové trouby DN 300, zabetonované v pilíři a vyvedené na jeho korunu.

Manipulace s klapkami je prováděna buď z velínu jezu, umístěného na pravém břehovém pilíři, nebo jednotlivě z pilířů.

Spodní stavba jezu je tvořena betonovým prahem o výšce 1,15 m s korunou upravenou sklápění klapky. Pod jezovým prahem se nachází betonový vývar délky 11,30 m a hloubky 1,1 m, zakončený šikmým prahem se sklonem 1:4. Práh je opatřen rozražeči a je zajištěn štětovou stěnou.

2.2 Fotodokumentace



Obrázek 1 - Pohled na jez - proti proudu



Obrázek 2 - Pohled na lokalitu kolmo na tok



Obrázek 3 - Pohled na velín jezu - umístění MVE Terežín

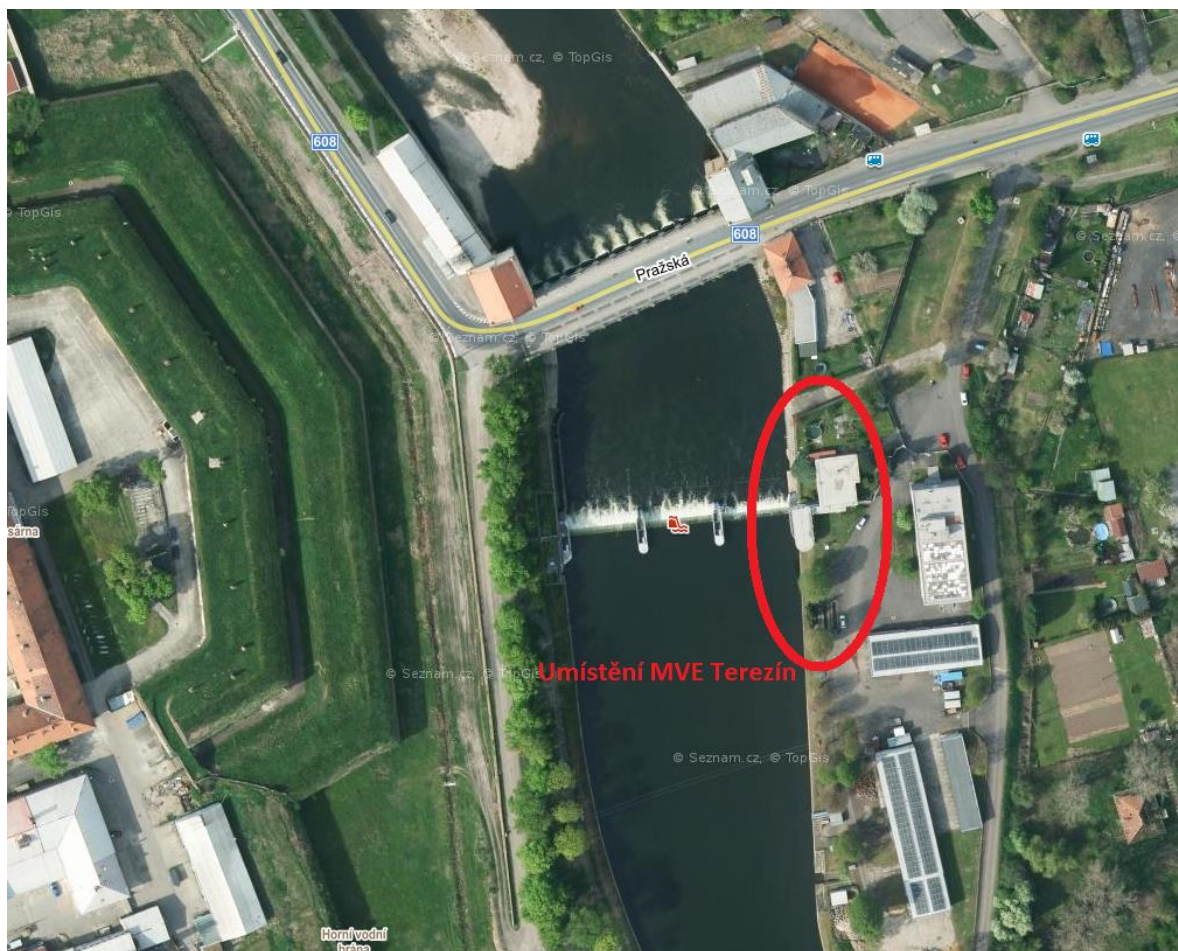


Obrázek 4 - Sjezd k vodě na pravém břehu pod jezem

3. Popis MVE

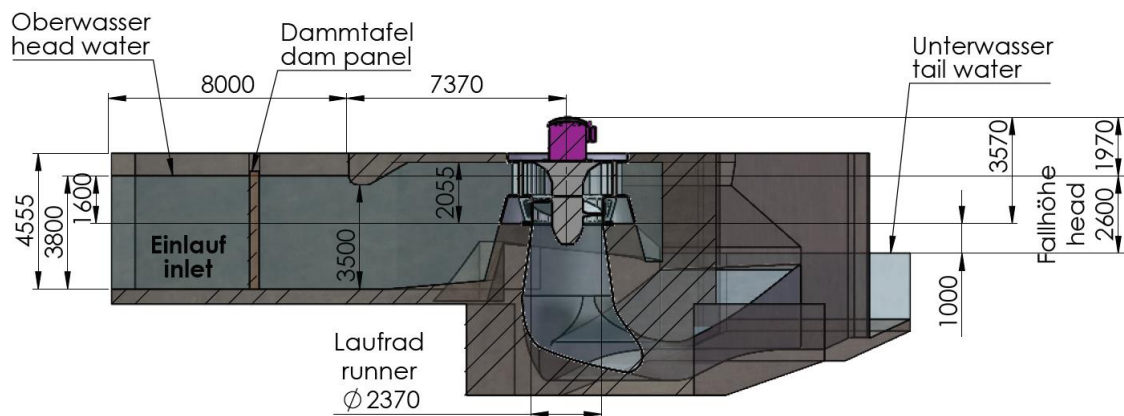
MVE Terezín bude umístěna na pravém břehu jezů v ř. km 2,626. Tato jezová elektrárna bude osazena dvěma soustrojími typu „Dive-Turbine“ s vertikální osou. Každé soustrojí bude dimenzováno na návrhový průtok $Q_n = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Oběžná kola s pevnými lopatkami budou mít průměr $D = 2,37 \text{ m}$. Každé soustrojí bude mít výkon $P_{el} = 357 \text{ kW}$. Elektrárna bude využívat spád $H_n = 2,6 \text{ m}$.

Tyto hodnoty byly převzaty na základě předchozích studií, zabývajících se problematikou výstavby MVE Terezín.



Obrázek 5 - Umístění MVE Terezín

Po konzultaci s výrobcem technologie „DIVE-Turbine“ byl navržen základní tvarový koncept MVE Terezín. Na následujícím obrázku (Obrázek 6) je zobrazen výkres konstrukce „DIVE- Turbine“, navržený pro břehovou MVE Terezín výrobcem.

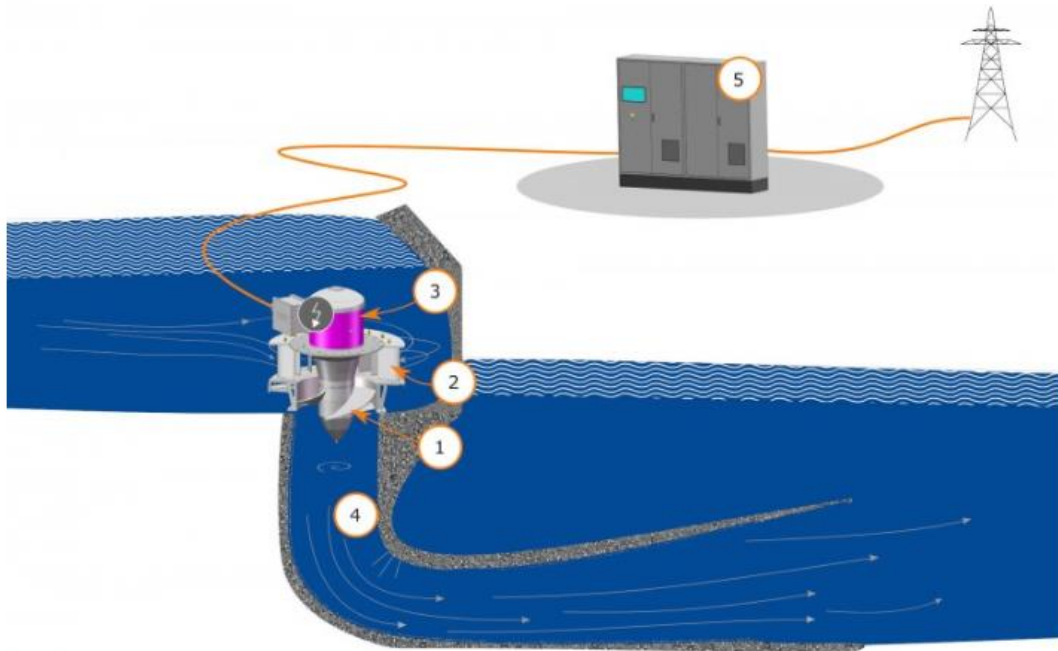


Obrázek 6 - Řez MVE Terezín navržený výrobcem

Toto tvarové řešení konstrukce bylo při optimalizaci nátokové a odtokové části respektováno.

4. Technologie „Dive-Turbine“

„Dive-Turbine“ je koncept ponořené turbíny s vertikální osou a pevnými lopatky oběžného kola. Generátor je přímo spojen s hřídelí turbíny a je zcela ponořen. Vygenerovaná elektřina je zpracována v řídicí jednotce navazující na síť. Regulace se provádí pomocí změny otáček a polohy lopatek rozvaděče. Regulace otáček je řízena generátorem z permanentních magnetů a elektrickými měniči.

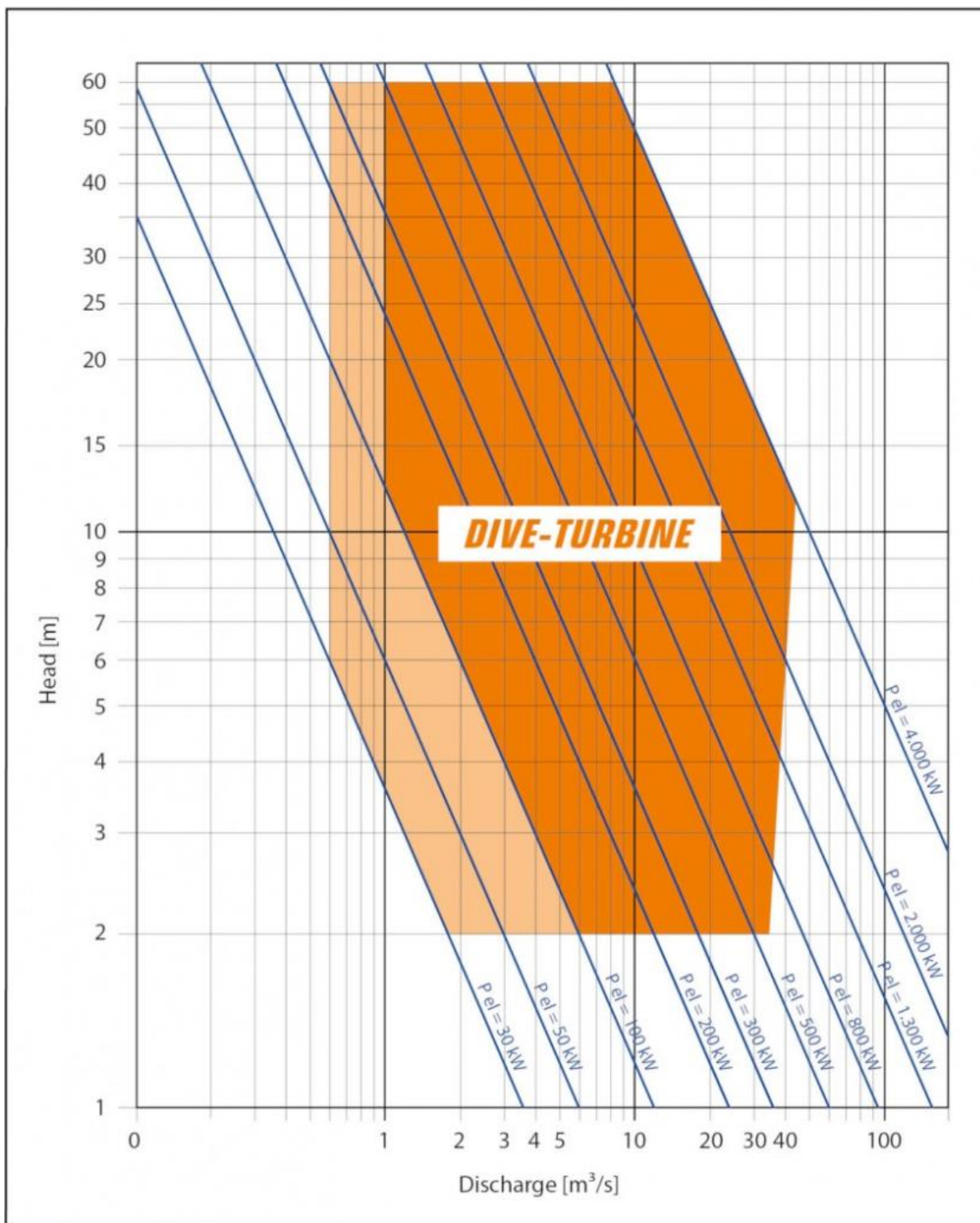


Obrázek 7 - Koncept „Dive-Turbine“^[3]

Na obrázku výše (Obrázek 7) je znázorněno schéma využití konceptu „Dive-Turbine“.

- 1 – Oběžné kolo s pevnými lopatkami
- 2 – Rozváděcí kolo s regulovanými lopatkami
- 3 – Generátor z permanentních magnetů (PMG)
- 4 – Savka
- 5 – Kontrola MVE a napojení na síť

Tento koncept je vhodný pro výšku spádu 2 – 60 m, průtok 0,6 – 40 m³/s a dokáže vygenerovat 30 kW – 4 MW elektrické energie.



Obrázek 8 - Graf využitelnosti konceptu „Dive-Turbine“^[3]

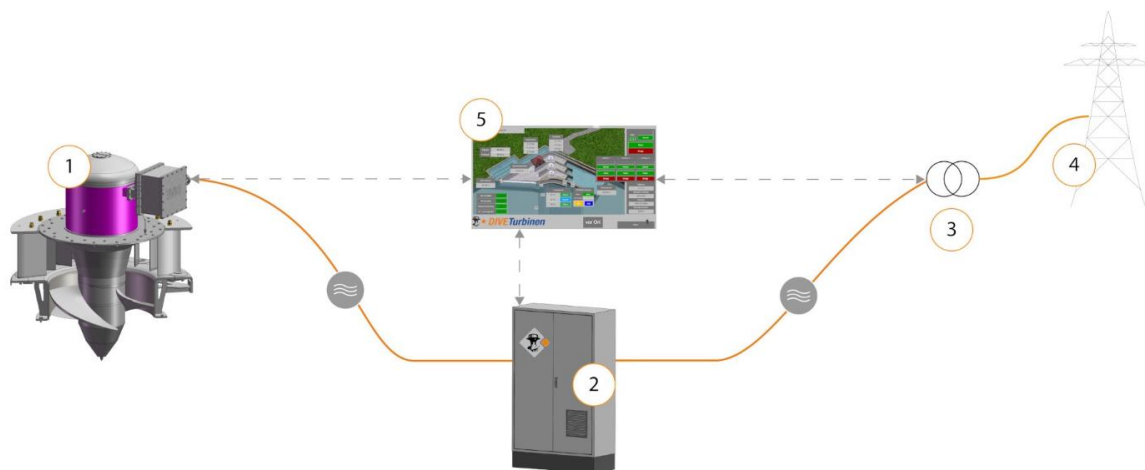
Díky technologii „Dive-Turbine“ není nutné stavět žádnou strojovnu, pouze malý objekt pro umístění elektrického vybavení, a tak se minimalizují stavební náklady. Kompletně ponořená turbína i generátor zajišťují bezpečný provoz v povodňových oblastech. Při využití tohoto konceptu není potřeba mechanický převod (PMG lze zkonstruovat i pro velmi nízké otáčky a velký moment při vysoké účinnosti), tudíž zde nedochází k přenosovým ztrátám, není nutná údržba a hluk a vibrace jsou na minimu. Díky tomu je možné využít technologii „Dive-Turbine“ i v obytných lokalitách.

Veškeré části soustrojí, které jsou v kontaktu s vodou jsou vyrobeny z nerezové oceli, a proto má koncept „Dive-Turbine“ vysokou odolnost proti opotřebení a korozi a dlouhou životnost. Pevné lopatky oběžného kola zajišťují bezúdržbový provoz a prostředí umožňující proplutí ryb, kvůli nízkému riziku kolize ryby s lopatkou. Mezi lopatkami a nábojem oběžného kola nejsou mezery, a tím je eliminováno případné uvíznutí ryby v oběžném kole. Díky nízké rychlosti oběžného kola se snižuje riziko kolize při vstupu ryb do prostoru turbíny. ^[3]

Regulace při využití technologie „Dive-Turbine“ může být buď jednoduchá, dvojitá, či hybridní.

4.1 Jednoduchá regulace

Jednoduchá regulace umožňuje regulovat pouze změnou polohy rozváděcích lopatek. Při využití tohoto způsobu za instalace jednoho soustrojí lze využít pouze velmi omezený rozsah průtoků. Je tedy výhodnější instalovat více soustrojí s nižšími návrhovými průtoky. Výhodou je však potřeba pouze jedné skříně s elektroinstalací, která je velice nákladná. Odpadá tedy další nutnost frekvenčního měniče, střídače a filtrů vyšších harmonických. ^[3]



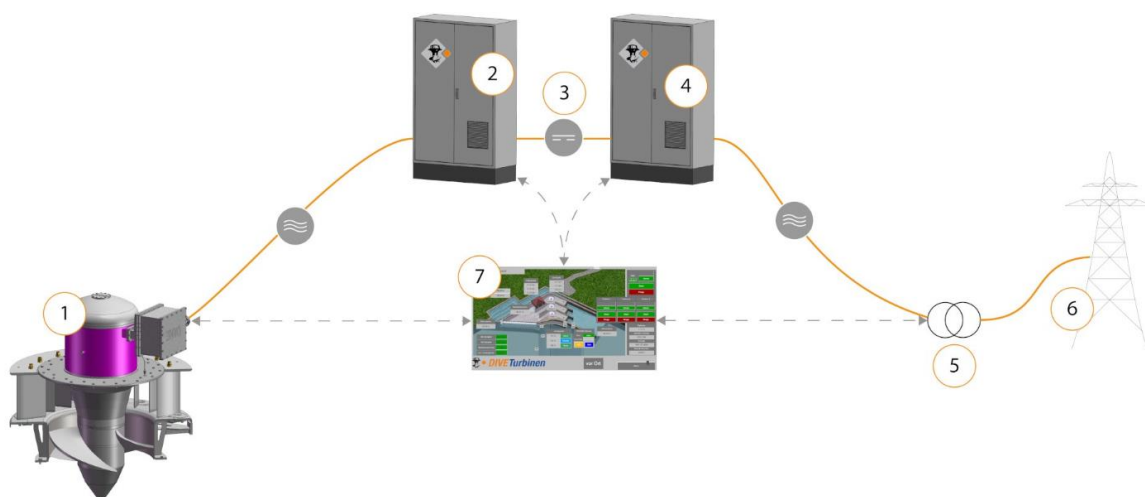
Obrázek 9 - Jednotná regulace^[3]

Na obrázku výše (Obrázek 9) je znázorněné schéma konceptu „Dive-Turbine” při využití jednotné regulace.

- 1 - „Dive-Turbine” s generátorem
- 2 – Síťový synchronizátor a kompenzátor – ochrana generátoru
- 3 – Transformátor
- 4 – Síť
- 5 – Ovládání MVE

4.2 Dvojitá regulace

Dvojitá regulace umožňuje regulovat jak pomocí otevírání a zavírání lopatek rozváděcího kola, tak pomocí změny otáček. Tato varianta vyžaduje umístění dvou elektroinstalačních skříní, mezi kterými dochází ke změně ze střídavého proudu na stejnosměrný a nazpět. Dochází zde tedy k vyšším energetickým ztrátám, než u regulace jednoduché. Dvojitá regulace změnou otáček nebo polohy rozváděcích lopatek zajišťuje vysokou účinnost i při částečném zatížení. Vysoká výroba energie při využití od 10% do 100% návrhového průtoku. [3]



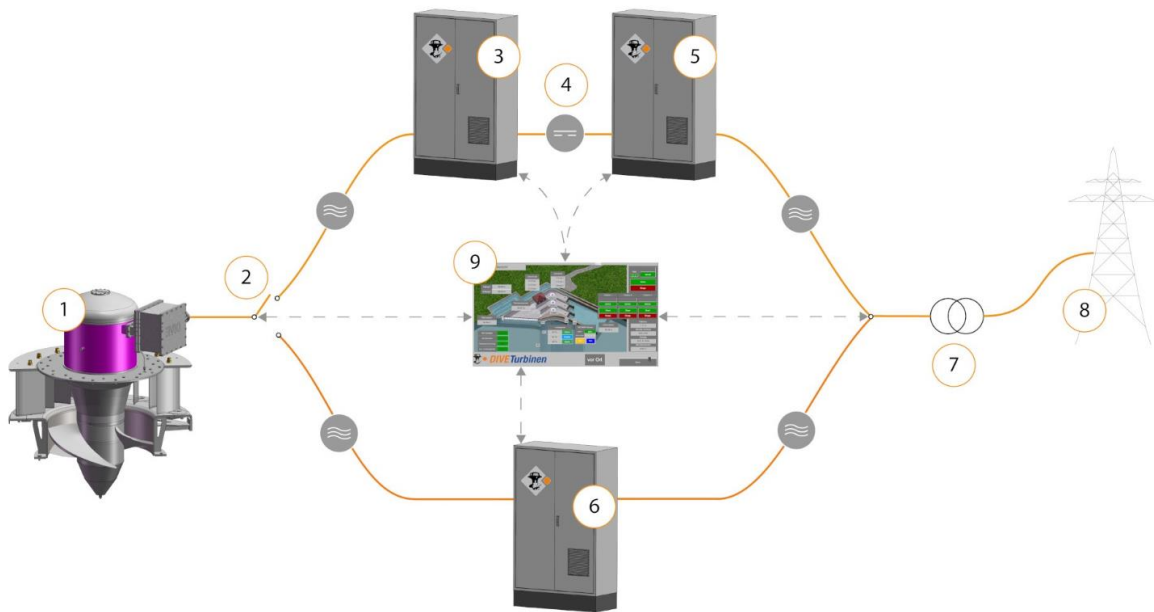
Obrázek 10 - Dvojitá regulace ^[3]

Na obrázku výše (Obrázek 10) je znázorněno schéma dvojité regulace technologie „Dive-Turbine“.

- 1 - „Dive-Turbine“ s generátorem
- 2 – Měnič generátoru
- 3 – Propojení stejnosměrným proudem
- 4 – Síťový měnič
- 5 – Síť
- 6 – Ovládání MVE

4.3 Hybridní regulace

Hybridní způsob regulace je spojením obou předchozích způsobů, tedy jednoduché i dvojitě regulace. Při využití této varianty je možné přepínat mezi jednoduchou a dvojitou regulací. Při průtocích, které je možné regulovat pouze polohou lopatek rozvaděče funguje soustrojí na principu jednoduché regulace a jsou tedy eliminovány energetické ztráty, ke kterým dochází při regulaci dvojitě. Při průtocích, které by při jednoduché regulaci zůstaly nevyužity se soustrojí přepne na regulaci dvojitou. Je tedy možné využít při instalaci jednoho soustrojí větší rozmezí průtoků, přičemž jsou ztráty oproti dvojitě regulaci značně eliminovány. Nevýhodou je však potřeba tří elektroinstalačních skříní s veškerým vybavením. ^[3]



Obrázek 11 - Hybridní regulace ^[3]

Na obrázku výše (Obrázek 11) je znázorněno schéma využití konceptu „Dive-Turbine“ s hybridní regulací.

- 1 - „Dive-Turbine“ s generátorem
- 2 – Přepínač mezi jednotnou a dvojitou regulací
- 3 – Měnič generátoru
- 4 – Propojení stejnosměrným proudem
- 5 – Síťový měnič
- 6 - Síťový synchronizátor a kompenzátor – ochrana generátoru
- 7 – Transformátor
- 8 – Síť
- 9 – Ovládání MVE

5. Hydroenergetický potenciál lokality

Na základě parametrů MVE Terežín byl vypočten hydroenergetický potenciál lokality při využití technologie „DIVE-Turbine“. Využito bude jedno soustrojí s jednoduchou regulací a druhé soustrojí s regulací dvojitou. Tím bude maximalizován rozsah využití průtoků a tím i roční výroba energie.

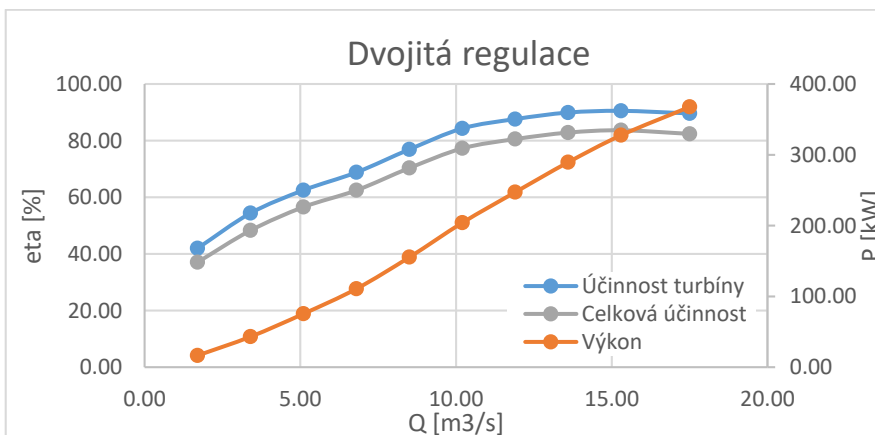
Hydrologická data pro následující výpočty dodal Povodí Ohře s.p., návrhové parametry MVE Terežín byly převzaty z přechozích studií a účinnostní charakteristiky byly dodány výrobcem technologie „DIVE-Turbine“.

5.1 Účinnostní charakteristiky

Nejprve byla sestavena závislost účinností a výkonu na průtoku soustrojím s dvojitou regulací (Tabulka 1) a pro tyto závislosti byl vykreslen graf (Graf 1).

Dvojitá regulace						
Q	Hnetto	eta turb	eta gen	eta invert	eta celk	P el
[m ³ /s]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]
1.70	2.69	42.00	93.00	95.00	37.11	16.65
3.40	2.68	54.40	93.00	95.50	48.32	43.19
5.10	2.67	62.50	94.30	96.00	56.58	75.58
6.80	2.66	68.80	94.60	96.00	62.48	110.87
8.50	2.65	76.90	94.80	96.50	70.35	155.45
10.20	2.64	84.30	95.00	96.50	77.28	204.15
11.90	2.63	87.60	95.30	96.50	80.56	247.34
13.60	2.62	89.90	95.50	96.50	82.85	289.60
15.30	2.61	90.50	95.80	96.50	83.66	327.75
17.50	2.60	89.60	95.80	96.00	82.40	367.81

Tabulka 1 – Dvojitá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku

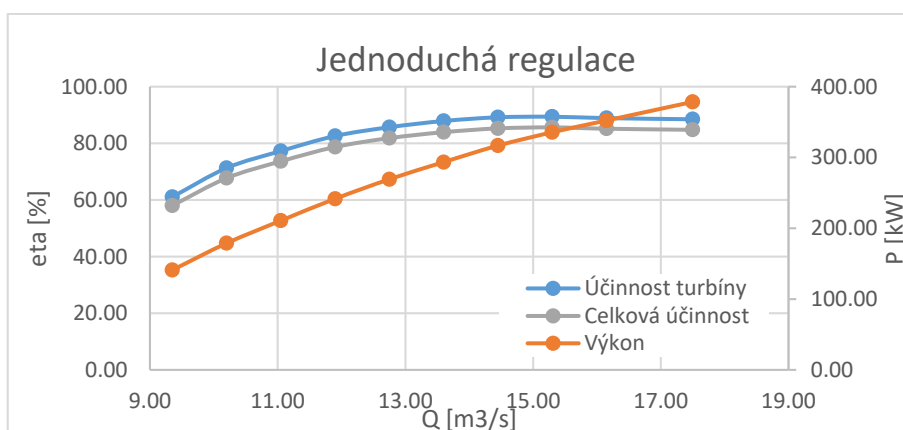


Graf 1- Dvojitá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku

Totéž bylo provedeno i pro soustrojí s jednoduchou regulací (Tabulka 2 a Graf 2).

Jednoduchá regulace						
Q	Hnetto	eta turb	eta gen	eta invert	eta celk	P el
[m ³ /s]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]
9.35	2.65	61.10	95.00	100.00	58.05	141.09
10.20	2.64	71.30	95.00	100.00	67.74	178.93
11.05	2.64	77.30	95.30	100.00	73.67	210.82
11.90	2.63	82.60	95.30	100.00	78.72	241.68
12.75	2.63	85.70	95.50	100.00	81.84	269.23
13.60	2.62	87.90	95.50	100.00	83.94	293.43
14.45	2.62	89.20	95.60	100.00	85.28	316.71
15.30	2.61	89.40	95.80	100.00	85.65	335.51
16.15	2.61	88.90	95.80	100.00	85.17	352.17
17.50	2.60	88.50	95.80	100.00	84.78	378.43

Tabulka 2 - Jednoduchá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku



Graf 2 - Jednoduchá regulace - závislost účinností a výkonu na průtoku

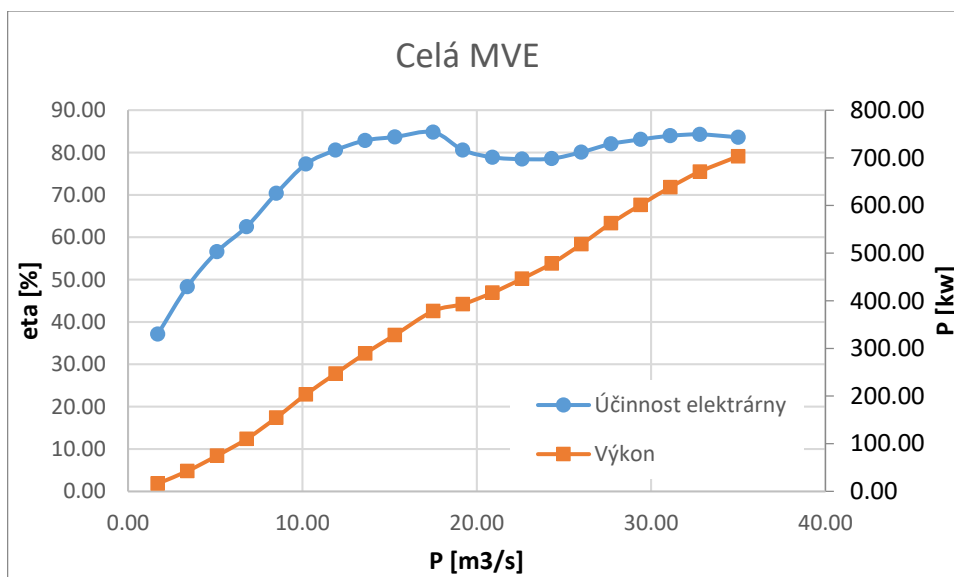
MVE Terezín bude provozována tak, že při průtocích nižších, než je průtok návrhový, bude v provozu pouze soustrojí TG1 s dvojitou regulací. Při dosažení návrhového průtoku, tedy $Q_{n;1/2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bude uvedeno do provozu soustrojí TG2 s jednoduchou regulací. Při průtocích vyšších, než je průtok návrhový, budou v souběhu obě soustrojí. Soustrojí TG2 bude využívat návrhový průtok $Q_{n;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a soustrojí TG1 zbylý využitelný průtok.

Tento způsob provozu je naznačen v následující tabulce (Tabulka 3), v níž je vypočtena také celková účinnost a výkon elektrárny.

Q celk	Hn	TG1 - dvojitá regulace			TG2 - jednoduchá regulace			eta MVE	P MVE
		Q	eta celk	P	Q	eta celk	P		
[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]	[%]	[kW]	[m ³ /s]	[%]	[kW]	[%]	[kW]
1.70	2.65	1.70	37.11	16.40			0.00	37.11	16.40
3.40	2.65	3.40	48.32	42.67			0.00	48.32	42.67
5.10	2.65	5.10	56.58	74.89			0.00	56.58	74.89
6.80	2.64	6.80	62.48	110.14			0.00	62.48	110.14
8.50	2.64	8.50	70.35	154.76			0.00	70.35	154.76
10.20	2.63	10.20	77.28	203.61			0.00	77.28	203.61
11.90	2.63	11.90	80.56	247.05			0.00	80.56	247.05
13.60	2.62	13.60	82.85	289.58			0.00	82.85	289.58
15.30	2.61	15.30	83.66	327.97			0.00	83.66	327.97
17.50	2.60			0.00	17.50	84.80	378.51	84.80	378.51
19.20	2.59	1.70	37.11	16.03	17.50	84.80	377.03	80.58	393.05
20.90	2.58	3.40	48.32	41.56	17.50	84.80	375.41	78.86	416.96
22.60	2.57	5.10	56.58	72.65	17.50	84.80	373.65	78.43	446.30
24.30	2.55	6.80	62.48	106.43	17.50	84.80	371.75	78.55	478.19
26.00	2.54	8.50	70.35	148.98	17.50	84.80	369.72	80.08	518.70
27.70	2.52	10.20	77.28	195.24	17.50	84.80	367.55	82.03	562.79
29.40	2.51	11.90	80.56	235.95	17.50	84.80	365.24	83.08	601.19
31.10	2.49	13.60	82.85	275.46	17.50	84.80	362.80	83.95	638.26
32.80	2.47	15.30	83.66	310.72	17.50	84.80	360.22	84.27	670.93
35.00	2.45	17.50	82.40	346.59	17.50	84.80	356.67	83.60	703.26

Tabulka 3 - Celá MVE - závislost účinnosti a výkonu na průtoku

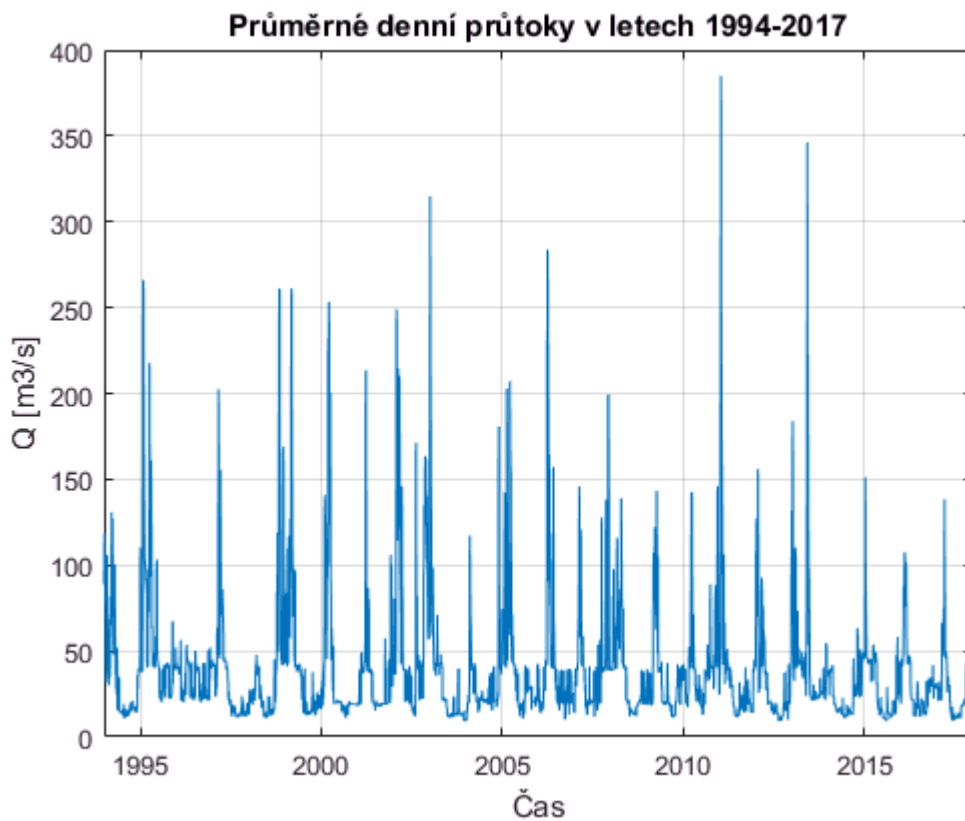
Následně byl sestaven také graf závislosti celkové účinnosti a výkonu elektrárny v závislosti na průtoku (Graf 3).



Graf 3 - Celá MVE - závislost účinnosti a výkonu na průtoku

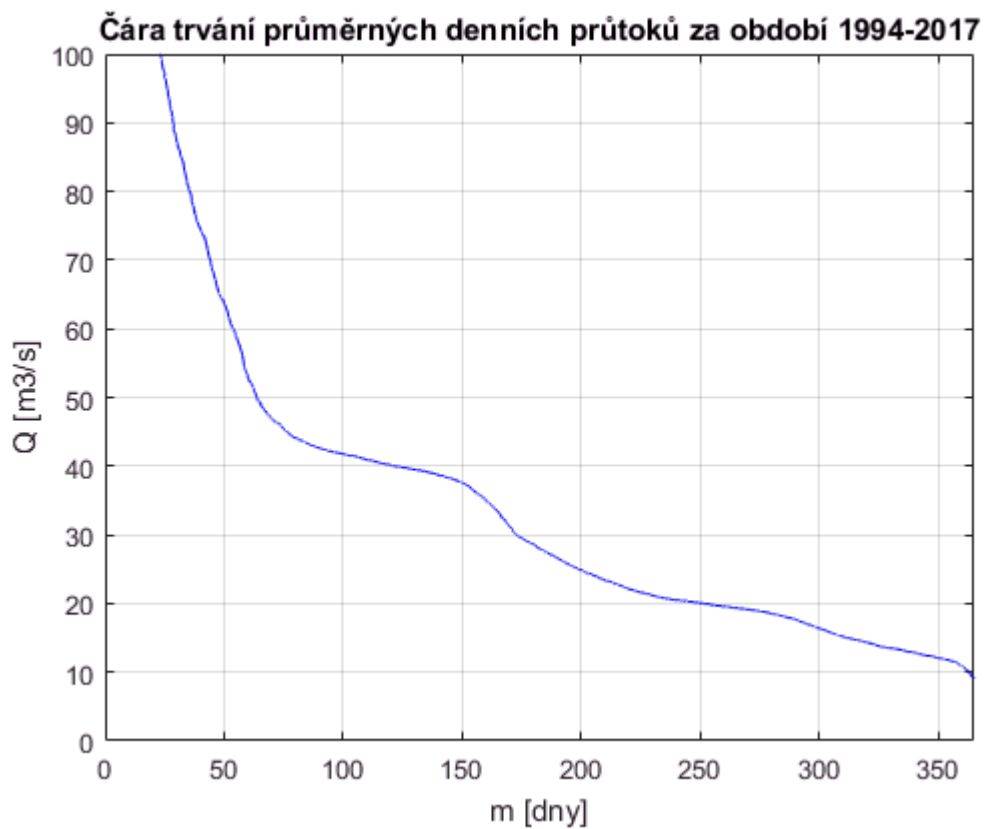
5.2 Průměrné denní průtoky

Podkladem pro sestavení čáry trvání průměrných denních průtoků byla řada průměrných denních průtoků za období 1994 – 2017, která byla dodána Povodím Ohře s.p. Tato řada byla vynesena do grafu níže (Graf 4).



Graf 4 - Průměrné denní průtoky v letech 1994 – 2017

Následně byla z průměrných denních průtoků za období 1994 – 2017 sestavena čára trvání průměrných denních průtoků (Graf 5).

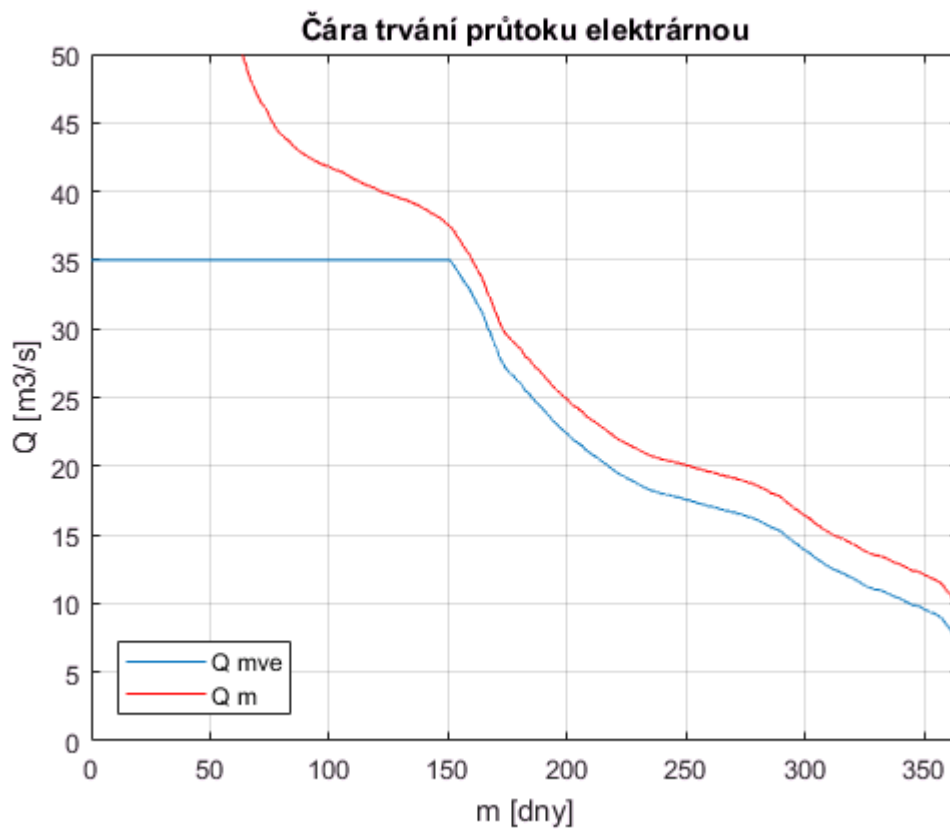


Graf 5 - Čára trvání průměrných denních průtoků

5.3 Průtoky elektrárnou

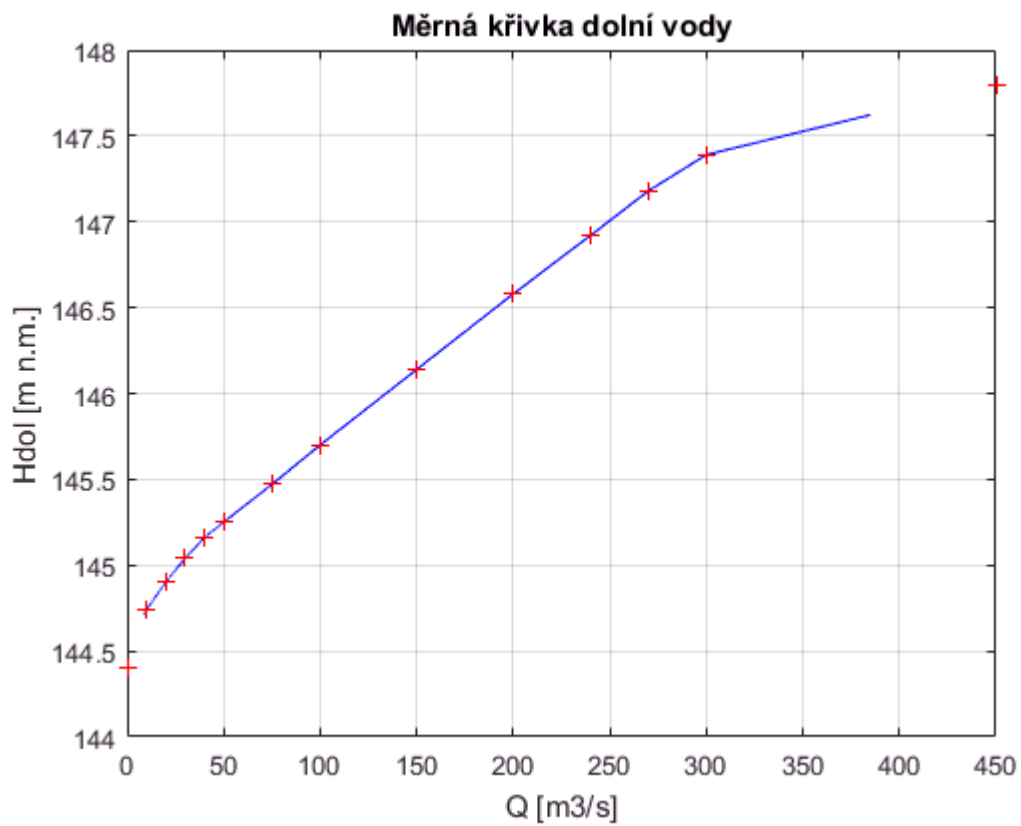
V rámci posouzení hydroenergetického potenciálu cílové lokality byla vykreslena čára trvání průtoku elektrárnou. Pro její sestavení byl uvažován minimální zůstatkový průtok $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá součtu průtoků stávajícím a novým rybím přechodem. Jako návrhový průtok elektrárnou byla využita hodnota z předchozí studie společnosti Aquatis a.s. z roku 2016, tedy $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$.

Výsledná čára trvání průtoku elektrárnou je vykreslena v následujícím grafu (Graf 6).



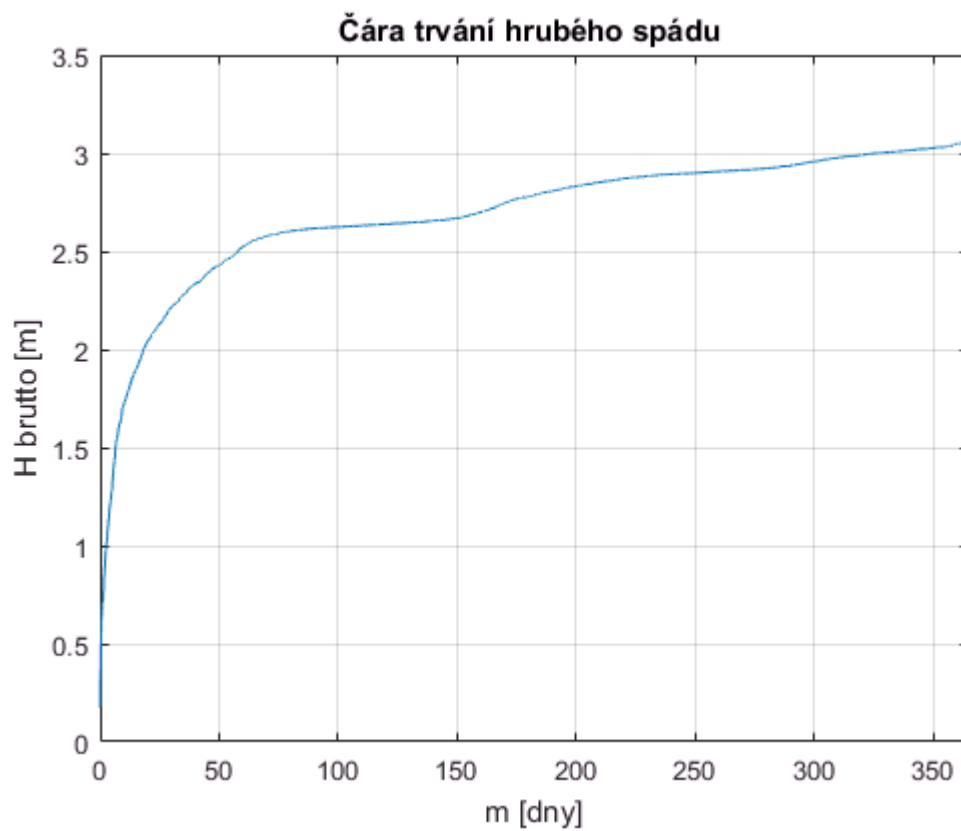
Graf 6 - Čára trvání průtoku elektrárnou

Graf výše (Graf 6) však neodpovídá skutečným využitelným průtokům elektrárnou, neboť s rostoucím průtokem klesá spád. To je zřejmé z měrné křivky dolní vody, která je zobrazena na grafu níže (Graf 7).



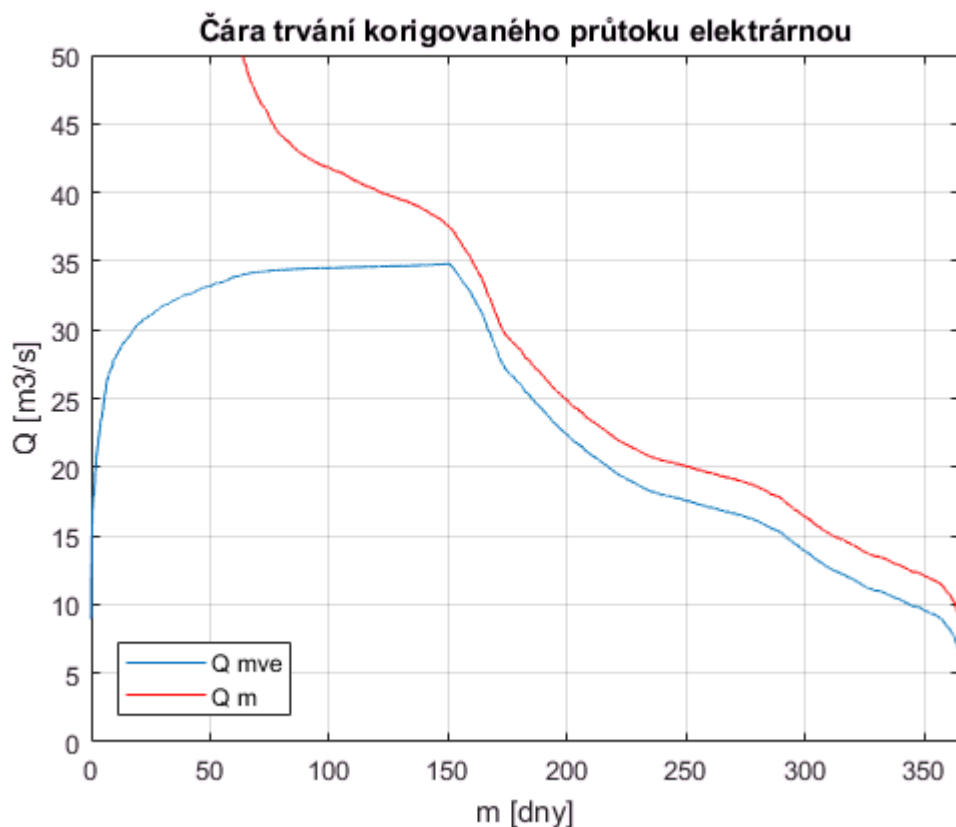
Graf 7 - Měrná křivka dolní vody

S využitím měrné křivky dolní vody a předpokladu, že hladina v jezové zdrži je držena na kótě 147,8 m n. m., což odpovídá provozní hladině, byla následně vykreslena čára trvání hrubého spádu (Graf 8).



Graf 8 - Čára trvání hrubého spádu

Pomocí čáry trvání hrubého spádu (Graf 8) byly průtoky elektrárnou při nízkých hodnotách spádu redukovány. Redukce byla provedena na základě volby středního spádu, který byl vypočten jako hodnota $H_{str} = 2,7$ m. Redukční součinitel spádu byl následně vypočten jako odmocnina podílu hrubého spádu a zvoleného středního spádu. Pro spády vyšší, než je zvolený střední spád je redukční součinitel roven jedné, tedy nemá na hodnotu průtoku elektrárnou vliv. Z čáry trvání průtoku elektrárnou (Graf 6) mohla být díky redukci sestrojena čára trvání korigovaného průtoku elektrárnou, která je zobrazena na obrázku níže (Graf 9).

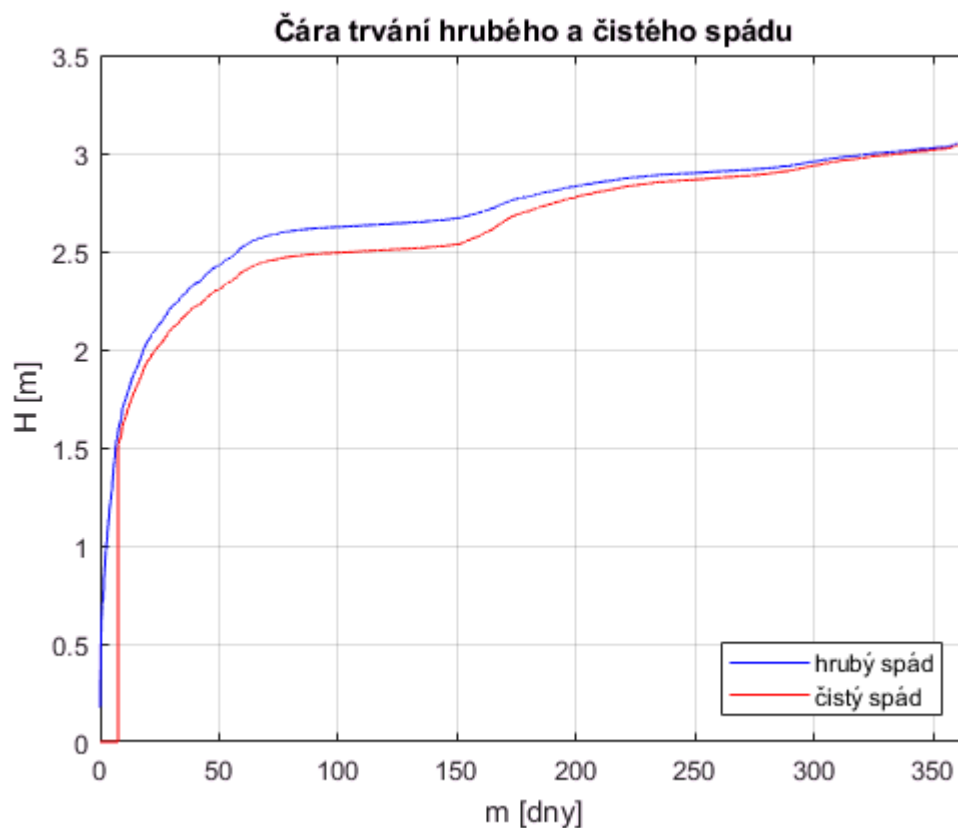


Graf 9 - Čára trvání korigovaného průtoku elektrárnou

5.4 Čistý spád

Pro výpočet čistého spádu bylo nutné nejprve provést odhad hydraulických ztrát na vtoku a na odtoku. Tyto ztráty byly odhadnuty hodnotou 5% středního hrubého spádu, což odpovídá 13,5 cm. Minimální čistý spád využitelný soustrojím TG1, tedy soustrojím s dvojitou regulací, je $H_{min} = 1,5$ m.

Výsledná čára trvání čistého spádu byla vykreslena společně s čarou trvání hrubého spádu v následujícím grafu (Graf 10).

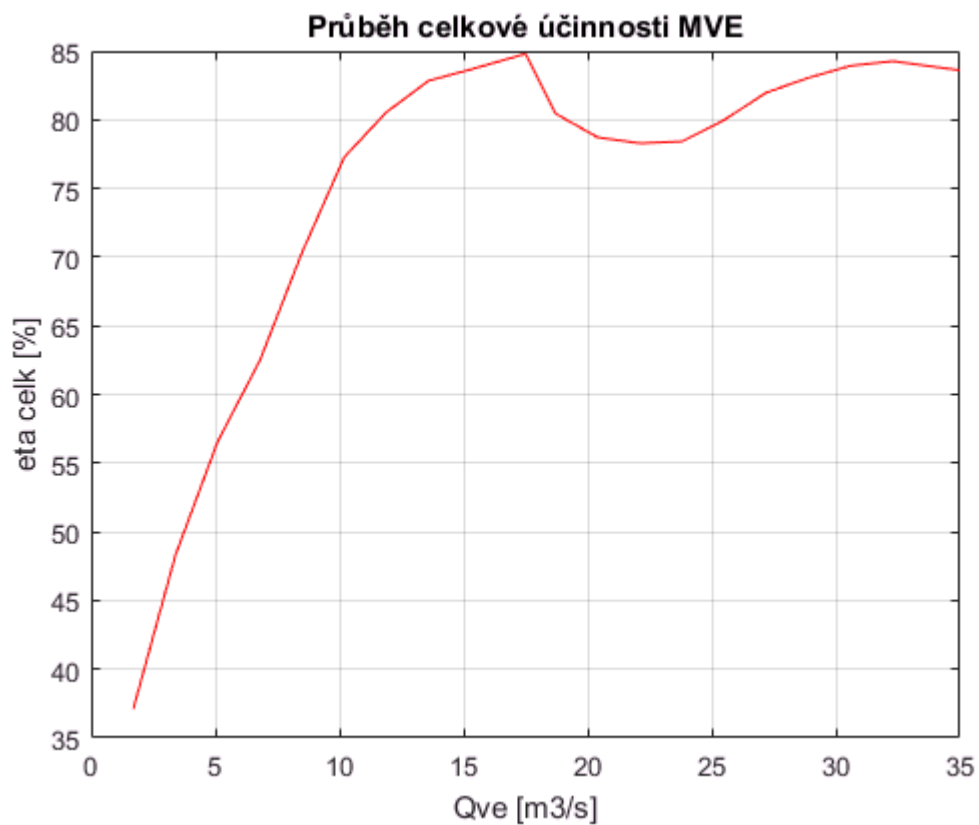


Graf 10 - Čára trvání hrubého a čistého spádu

5.5 Výkon a roční výroba

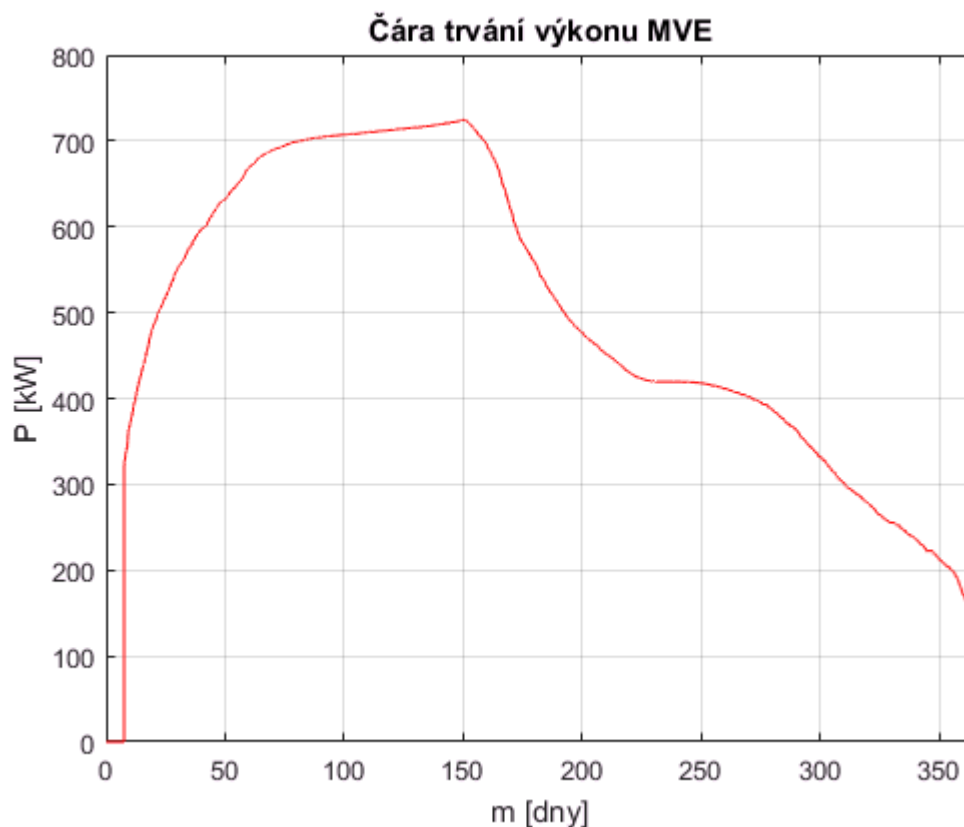
Následně mohl být s využitím účinnostní charakteristiky vyjádřen výkon elektrárny a mohla být vypočtena roční výroba.

Nejprve byl sestrojen graf průběhu celkové účinnosti celé elektrárny (Graf 11).



Graf 11 - Průběh celkové účinnosti MVE

Na základě této charakteristiky byla sestrojena také čára trvání výkonu elektrárny (Graf 12).



Graf 12 - Čára trvání výkonu MVE

Při výpočtu výkonu pro vyjádření čáry trvání výkonu (Graf 12) byl využit následující vztah:

$$P = Q \cdot H_{\text{netto}} \cdot g \cdot \eta \quad \text{Rovnice 1}$$

- Kde:
- Q je průtok elektrárnou [m^3/s]
 - H_{netto} je čistý spád [m]
 - g je gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 - η je celková účinnost elektrárny [-]

Následně mohla být vypočtena také teoretická roční výroba, která činí $E = 4,3 \text{ GWh}$.

6. Prostorové řešení

Pro optimalizaci tvarového řešení MVE Terežín byl vytvořen zjednodušený 2D model kontur konstrukcí. Pomocí tohoto modelu je možné najít ideální tvarové řešení z hlediska možných kolizí nových a stávajících konstrukcí. Zároveň je potřeba brát ohled na rozlohu stavebních prací.

Snahou tedy je vytvořit co nejpříznivější podmínky pro nátok a odtok vody do a z elektrárny při minimalizaci stavebních zásahů do břehu a zabránění kolize se stávajícími objekty.

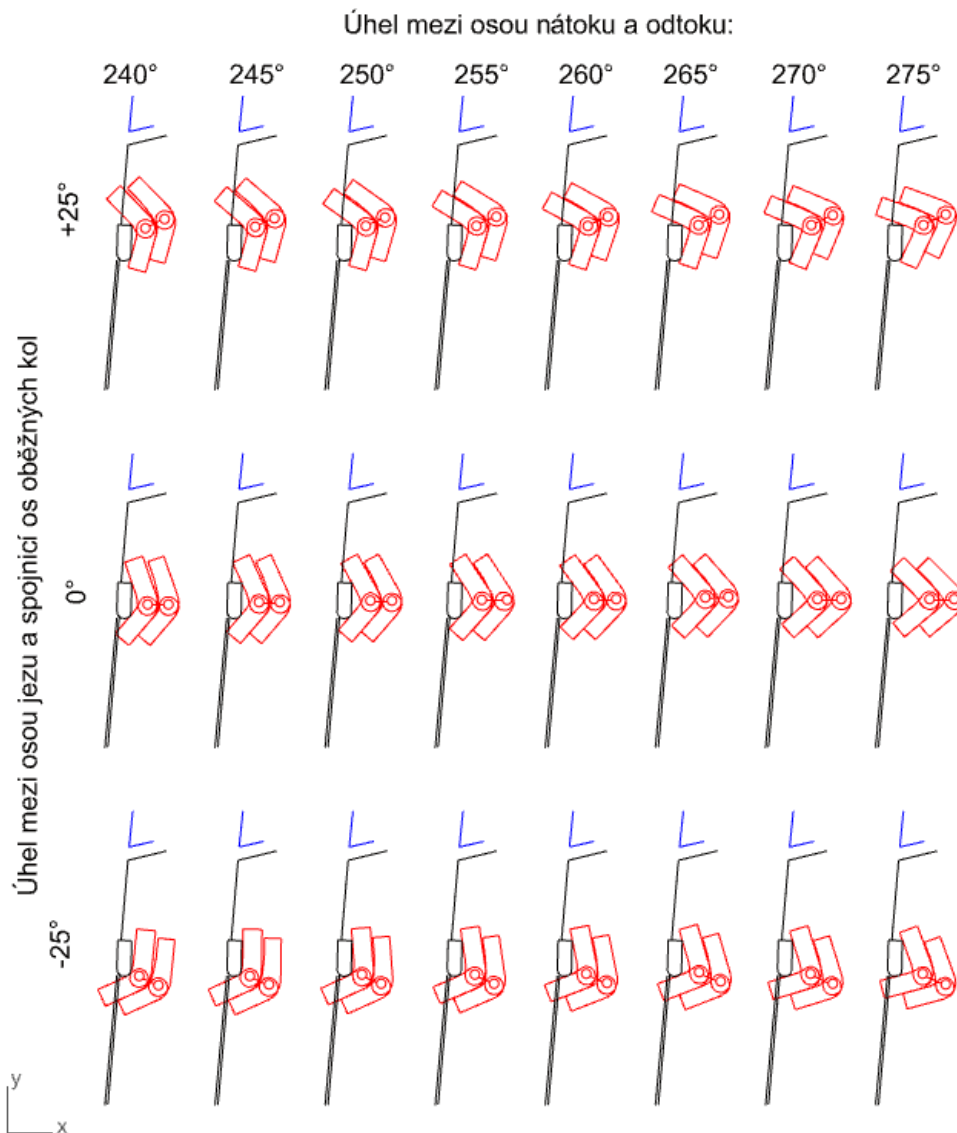
6.1 Stavební omezení

Při řešení půdorysného tvaru bylo nutné brát ohled na stávající konstrukce, do kterých nesmí být zasaženo. Mezi tyto konstrukce patří stávající jezový velín, nacházející se na pravém břehovém pilíři jezu. Další omezení tvoří nábrežní zeď, která je památkově chráněna a musí být při stavbě MVE Terežín zachována. Je tedy nutné provést nátok i odtok do a z elektrárny pomocí otvoru, který nebude zasahovat do této stěny nad úrovní hladiny vody v jezové zdrži a v podjezí. Pod úrovní hladiny může být tato zeď přerušena. Je však nutné tento nátok a výtok otvorem řešit za pomoci průvlaku, který bude zeď nad úrovní hladiny podpírat.

6.2 Optimalizace půdorysného uspořádání

Optimalizace tvaru probíhala pomocí změn úhlů v půdorysném schématu konstrukcí. Jedním z měněných úhlů je úhel, který svírá osa nátoků s osou odtoku MVE Terežín. Tento úhel byl měněn s krokem 5° od hodnoty 240° po hodnotu 275° . Následně byl pro každou variantu úhlu mezi osou nátoků a výtoku měněn úhel, jež svírá spojnice os oběžných kol s osou jezu. Tento úhel byl měněn opět s krokem 5° .

Na následujícím obrázku (Obrázek 12) jsou zobrazeny některé varianty půdorysného uspořádání.

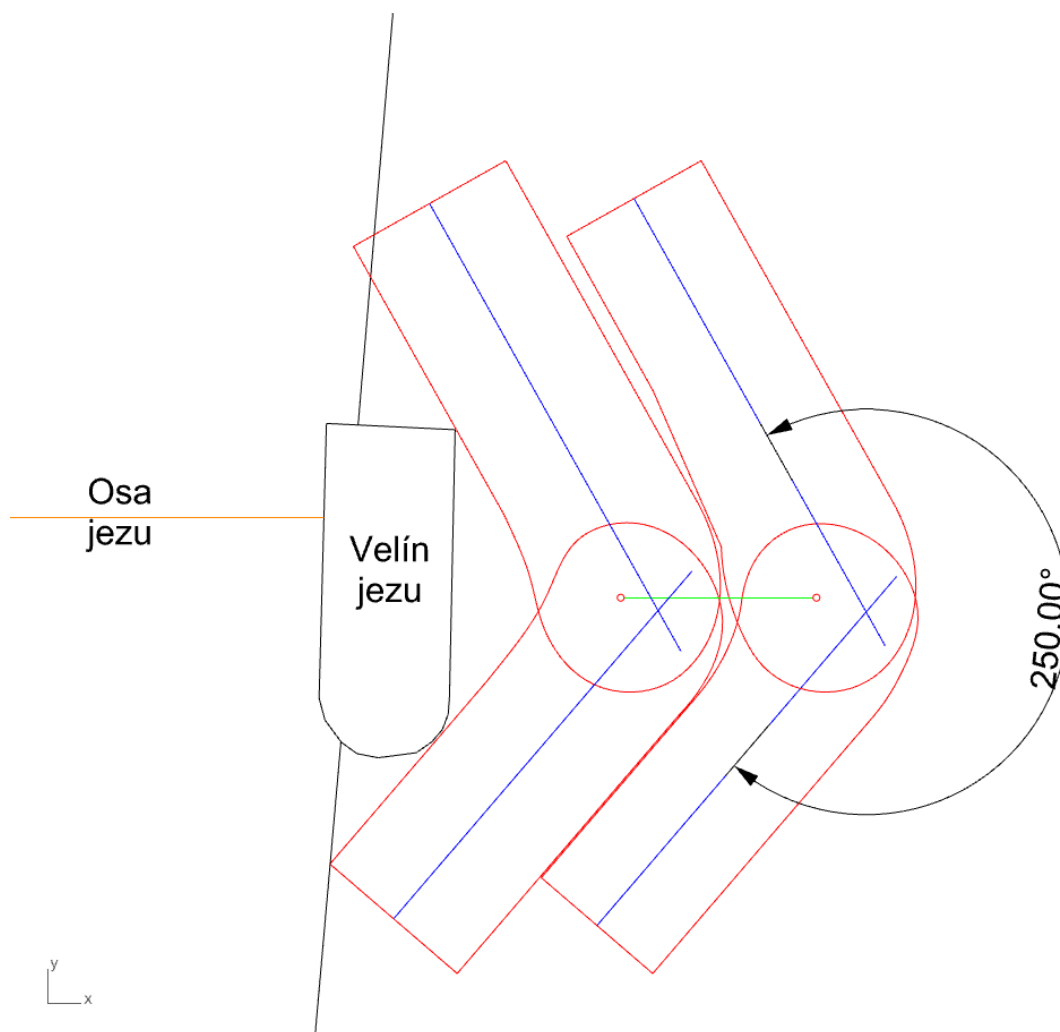


Obrázek 12 - Varianty půdorysného uspořádání

Z obrázku výše (Obrázek 12) je zřejmé, že při zvyšování úhlu mezi osou nátoku a odtoku dochází k posunu soustrojí elektrárny hlouběji do břehu, a tím se zvyšuje množství stavebních prací a náklady. Zvýšením úhlu mezi osou jezu a spojnicí os oběžných kol do kladných hodnot se zkracuje odtoková část. Naopak jeho snížením do hodnot záporných se zkracuje část nátoková.

Bylo tedy zvoleno řešení, které nejlépe kopíruje stávající konstrukci velínu jezu, minimalizuje zásah do břehu a umožňuje co nejkompaktnější konstrukci nátoky a odtoku za účelem zkrácení délky průvlastku, jež bude podírat opěrnou zeď. Jako nejvhodnější řešení byla vybrána varianta s úhlem mezi osou nátoky a odtoku 250° a se spojnicí os oběžných kol ve směru osy jezu. Tato varianta je blízká půdorysnému uspořádání břehové MVE Terežín ve studii společnosti Aquatis a.s. z roku 2016.

Zvolená varianta je zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 13).



Obrázek 13- Půdorysné uspořádání

Modře jsou na obrázku výše (Obrázek 13) znázorněny osy nátoky a odtoku, oranžově osa jezu, zeleně spojnice os oběžných kol a červeně obvodová hrana konstrukce MVE Terežín s minimální délkou nátokové a odtokové části elektrárny.

6.3 Průtočné profily

Výrobce stanovené charakteristické průtočné plochy byly respektovány. Jedná se o profil přechodu proudění s volnou hladinou v proudění tlakové a profil vyústění savky.

Profil přechodu proudění s volnou hladinou na proudění tlakové má šířku 5 m a výšku 3,5 m. Průtočná plocha je tedy rovna 17,5 m². Profil vyústění savky je široký 5,28 m a vysoký 2,71 m. Jeho průtočná plocha je 14,31 m².

Za účelem možnosti posouzení optimalizace byly v daných průtočných profilech vypočteny odpovídající rychlosti (Tabulka 4).

Přechod na tlakové			Savka		
h=	3.50	m	h=	2.71	m
b=	5.00	m	b=	5.28	m
S=	17.50	m ²	S=	14.31	m ²
Q=	17.50	m ³ /s	Q=	17.50	m ³ /s
v=	1.00	m/s	v=	1.22	m/s

Tabulka 4 - Průtočné profily – rychlosti

Rychlost byla počítána pomocí rovnice kontinuity:

$$Q = v \cdot S \quad \text{Rovnice 2}$$

Kde: Q je průtok [m³/s]

v je rychlost [m/s]

S je průtočná plocha [m²]

Prostorové řešení nátokové i odtokové části vychází z těchto vypočtených rychlostí. Cílem je, aby rychlost vody po délce nátokové ani odtokové části příliš nekolísala. Za tímto účelem byla zvolena hraniční rychlost pro obě části, a to 1,5 m³/s. Tuto hodnotu by rychlost vody v nátoce ani odtoku neměla překročit a podle ní bude simulace proudění vody vyhodnocována.

7. Tvorba 3D modelu

Pro posouzení vhodnosti tvarového řešení MVE Terežín byly vytvořeny oddělené prostorové modely pro vtok a výtok do a z elektrárny. Na těchto modelech byl proveden výpočet proudění tekutin za účelem provedení analýzy průtočných podmínek. Na základě jednotlivých výpočtů byly modely dále modifikovány tak, aby měly co nejvhodnější podmínky pro nátok a výtok do a z MVE Terežín.

7.1 Výpočetní software

Pro výpočty na prostorových modelech byl využit výpočetní software Ansys CFX. Jedná se o nástroj pro prostorové modelování proudění tekutin, pracující na principu metody konečných objemů. Díky tomuto softwaru je možné podrobné zjištění rychlostního pole v modelu. Pro vymodelování prostorové geometrie nátokové a odtokové části MVE Terežín byl použit program Rhinoceros 3D. Následná tvorba výpočetní sítě byla provedena v programu ICEM, jež je zahrnut v balíčku produktů Ansys.

7.2 Výpočetní síť

Pro všechny prostorové modely tvaru nátokové i odtokové části byla nejprve sestrojena povrchová síť. Ta byla zvolena jako „All Tri – Patch Independent“. Tato metoda sestrojuje povrchovou síť pouze za pomoci trojúhelníkových elementů a dokáže tak nejlépe kopírovat veškeré plochy modelu. Následně byla vypočtena také síť objemová. Objemová síť byla vypočtena metodou „Tetra/Mixed – Quick (Delunay)“. Tato volba umožňuje vytvoření objemové sítě z již vypočtené sítě povrchové. Poté byla sestrojena také síť prizmatická, která vytváří obdélníkové elementy v okolí stěn.

Výpočetní síť byla rozdělena do jednotlivých částí („PARTS“) dle velikosti elementů. Toto rozdělení se pro nátok a odtok liší a je detailně popsáno v následujících kapitolách věnujících se jednotlivým modelům (7.4 Model nátok, str.33 a 7.5 Model odtok, str.48).

Dále byly ve všech modelech sestrojeny hustoty („DENSITY“), definující lokální zjemnění výpočetní sítě. První hustota byla nastavena na úroveň hladiny vody v modelu. Byly jí definovány elementy o maximální velikosti 0,03 m a tloušťka 3 elementy. Druhá hustota byla vytvořena v celém prostoru modelu pod hladinou vody. Tato hustota má nastavenou maximální velikost elementů 1 m.

Velikost elementů výpočetní sítě byla nastavena globálně pro celý model na 32 m. Průběh tvorby výpočetní sítě je tedy takový, že jsou nejprve vytvořeny hrubé elementy podle globálního nastavení, které jsou následně děleny na elementy menší podle nastavení jednotlivých částí („PARTS“) a hustot („DENSITY“). Tímto je proces tvorby sítě značně urychlen. Všechny sítě (povrchová, objemová i prizmatická) byly po dokončení jejich tvorby vyhlazeny, čímž byla celkově zlepšena kvalita elementů. Celkový počet elementů každé výpočetní sítě se pohybuje okolo 6 milionů elementů.

7.3 Fyzikální parametry modelu

Úloha je řešena jako dvoufázové proudění vody a vzduchu s vlastnostmi, které odpovídají konstantní teplotě 10°C. Rychlostní pole odpovídá homogennímu modelu v celém rozsahu. Tepelná výměna a přeměna energie na teplo není uvažována. Referenční tlak je 1 atm.

Proudění bylo řešeno metodou RANS („Reynolds Avaraged Navier Stokes“). Jako model turbulence byl zvolen model „Shear Stress Transport“. Proudění v blízkosti stěny je řešeno pomocí stěnové funkce.

S ohledem na typ úlohy a výpočetní náročnost byla provedena pouze stacionární analýza. Z tohoto důvodu nebudou postiženy případné dynamické jevy.

Tíhové zrychlení je zadáno hodnotou $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ a je orientováno proti směru osy z, tedy svrchu dolů.

7.4 Model nátokové části

Model jezové zdrže byl sestrojen na základě výkresů stávajících konstrukcí a dodaného zaměření dna v nadjezí. Vstup do modelu je umístěn 55 m nad osou jezu. Model je bočně ohraničen nábrežními zdmi a kopíruje tvar nadjezí v tomto úseku. Model nadjezí je ukončen samotnou konstrukcí jezu se vztyčenou klapkou.

Samotný nátok byl následně připojen k modelu nadjezí a je ukončen profilem, ve kterém je pomocí betonového převisu způsoben přechod režimu proudění vody z proudění o volné hladině na proudění tlakové. Tvar nátoku na MVE byl sestrojen na základě doporučení výrobce technologie „DIVE-Turbine“ a byl dále modifikován pro umožnění co nejvhodnějších vtokových podmínek.

Vrchní část modelu je umístěna 1 m nad úrovní provozní hladiny v jezové zdrži, tedy na kótě 148,8 m n. m. V modelu jsou sestrojeny také vstupní otvory obou rybích přechodů - stávajícího i plánovaného.

7.4.1 Rozdělení výpočetní sítě

Výpočetní síť pro model nátoky je rozdělena do 19 částí v závislosti na velikosti elementů. Těmto částem byly následně přiřazovány jednotlivé okrajové podmínky. Jedná se o části „TOP_COARSE“ pro vrchní část modelu v oblasti, kde není potřeba příliš jemná síť, „TOP_SMOOTH“ pro vrchní část modelu v detailní oblasti okolí vtoku, „INLET“ pro vstup do modelu, „OUTLET1“ a „OUTLET2“ pro výstupy z modelu, tedy nátoky na jednotlivá soustrojí, „DNO_COARSE“ pro dno ve zdrži v oblasti hrubší výpočetní sítě, „DNO_SMOOTH“ pro detailnější část dna ve zdrži v blízkosti nátoky na MVE Terežín, „JEZ“, „KLAPKA“ a „PILÍŘ“ pro jednotlivé části stávajícího jezu, „ZÍDKA_LEVÁ“ a „ZÍDKA_PRAVÁ“ pro levobřežní i pravobřežní kamennou zeď tvořící svahy koryta, „RP_LEVÝ“ a „RP_PRAVÝ“ pro stávající a nový rybí přechod, „NÁTOK_WALL“ a „NÁTOK_DNO“ pro stěny a dno samotného nátoky na MVE Terežín, „NÁTOK_PRŮVLAK“ pro průvlak držící nábrežní zeď nad oknem nátoky, „NÁTOK_TLAK“ pro převis způsobující přechod proudění s volnou hladinou na proudění tlakové a „NÁTOK_TOP“ pro vrchní část modelu v oblasti nátoky na MVE Terežín.

Některým z výše uvedených částí byly definovány maximální velikosti elementů tak, aby byla v jejich okolí výpočetní síť jemnější. Maximální definované velikosti elementů jsou zobrazeny v následující tabulce (Tabulka 5).

Part ▲	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio
BODY	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
DNO_COARSE	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
DNO_SMOOTH	<input checked="" type="checkbox"/>		0.35	0.002	1.2
GEOM					
INLET	<input type="checkbox"/>		0	0	0
JEZ	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
KLAPKA	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
NATOK_DNO	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2
NATOK_PRUVLAK	<input checked="" type="checkbox"/>		0.15	0.002	1.2
NATOK_TLAK	<input checked="" type="checkbox"/>		0.15	0.002	1.2
NATOK_TOP	<input type="checkbox"/>		0.25	0	0
NATOK_WALL	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2
OUTLET1	<input type="checkbox"/>		0.15	0	0
OUTLET2	<input type="checkbox"/>		0.15	0	0
PILIR	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
RP_LEVY	<input type="checkbox"/>		0.4	0	0
RP_PRAVY	<input type="checkbox"/>		0.25	0	0
TOP_COARSE	<input type="checkbox"/>		0	0	0
TOP_SMOOTH	<input type="checkbox"/>		0.25	0	0
ZIDKA_LEVA	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
ZIDKA_PRAVA	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2

Tabulka 5 - Nátok - rozdělení maximální velikosti elementů pro jednotlivé části výpočetní sítě

Velikost elementů těch částí, které mají jako maximální hodnotu uvedeno 0 m se budou řídit globálním nastavením a nastavením hustot. Tedy v úrovni hladiny budou elementy o velikosti maximálně 0,03 m a pod hladinou maximálně 1 m.

7.4.2 Stanovení horní okrajové podmínky

Horní okrajová podmínka byla zvolena na základě známé provozní hladiny v jezové zdrži, tedy na kótu 147,8 m n. m. Byla definována jako známé trojúhelníkové rozložení tlaku při této výšce hladiny.

7.4.3 Stanovení dolní okrajové podmínky

Dolní okrajová podmínka byla zvolena na základě návrhového průtoku pro obě soustrojí MVE Terezín. Zadána byla pomocí volby homogenního rychlostního pole na výtoku („Outlet1“ a „Outlet2“).

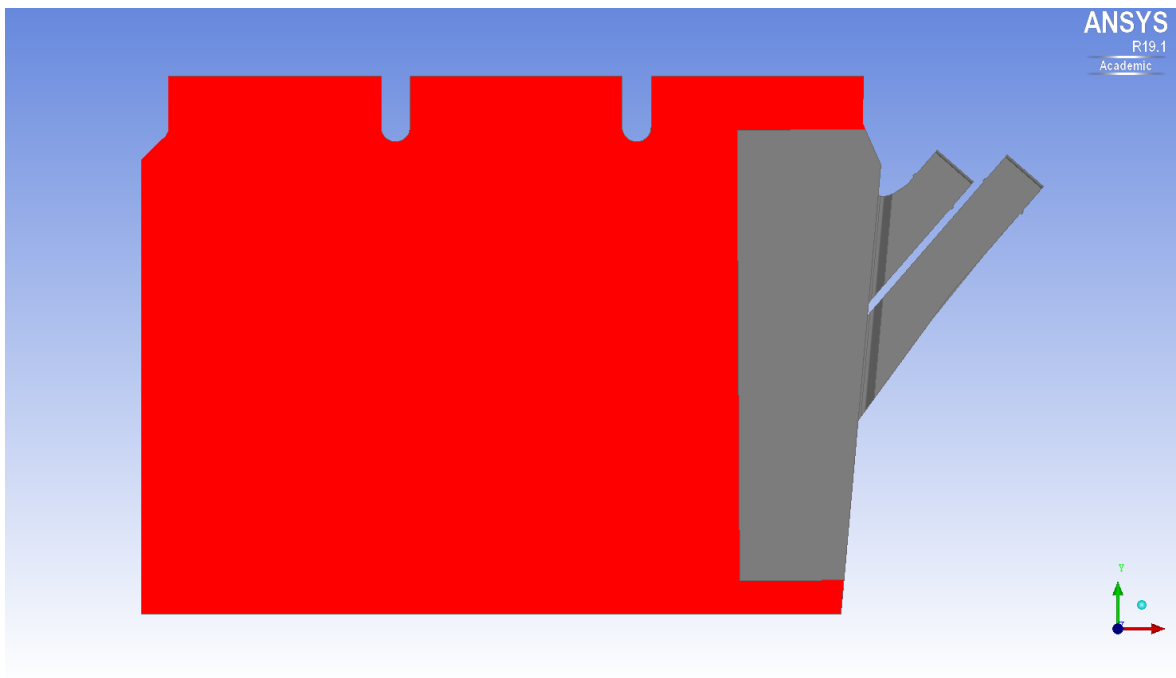
7.4.4 Okrajové podmínky

Pro definování okrajových podmínek prostorového modelu nátoky byly využity části, na něž byla rozdělena výpočetní síť pro tento model (viz. 7.4.1 str. 34). Těmto částem byly přiřazovány takové podmínky, aby model co nejlépe odpovídal reálnému proudění vody.

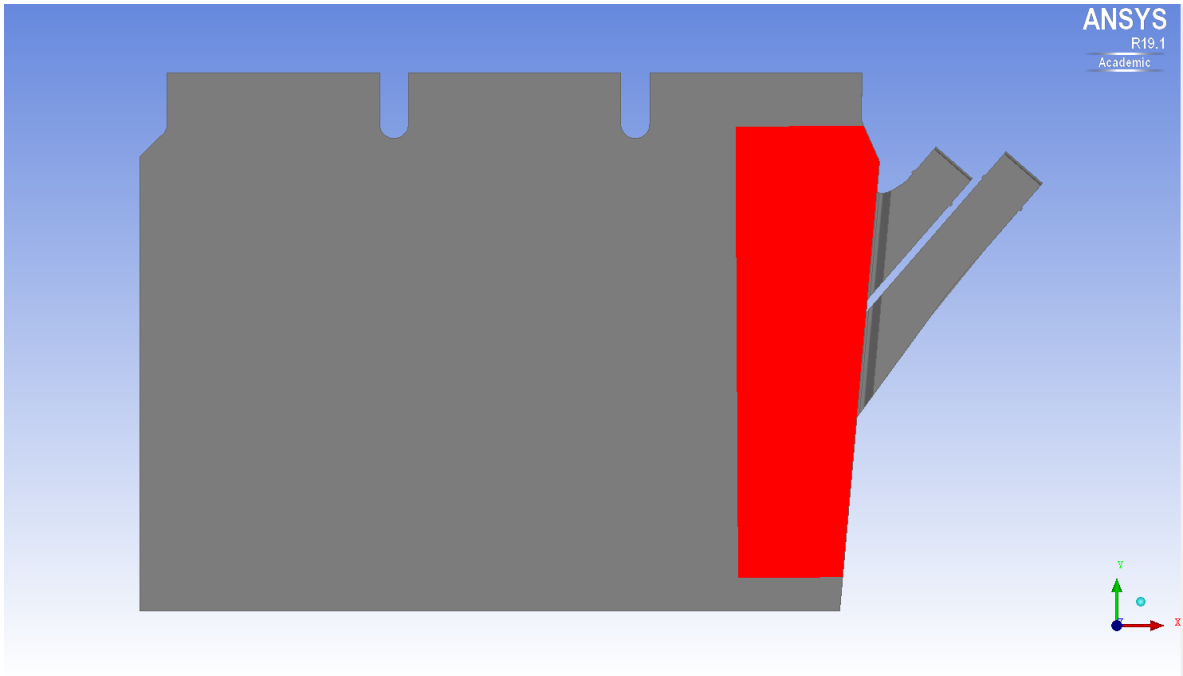
7.4.4.1 Volná hladina

Podmínka volné hladiny je simulována pomocí podmínky „Opening – Opening Pressure“ s definovaným průměrným relativním tlakem 0 kPa. Podmínka umožňuje vstup i výstup z modelu při atmosférickém tlaku. Tím je umožněno kolísání hladiny vody v modelu.

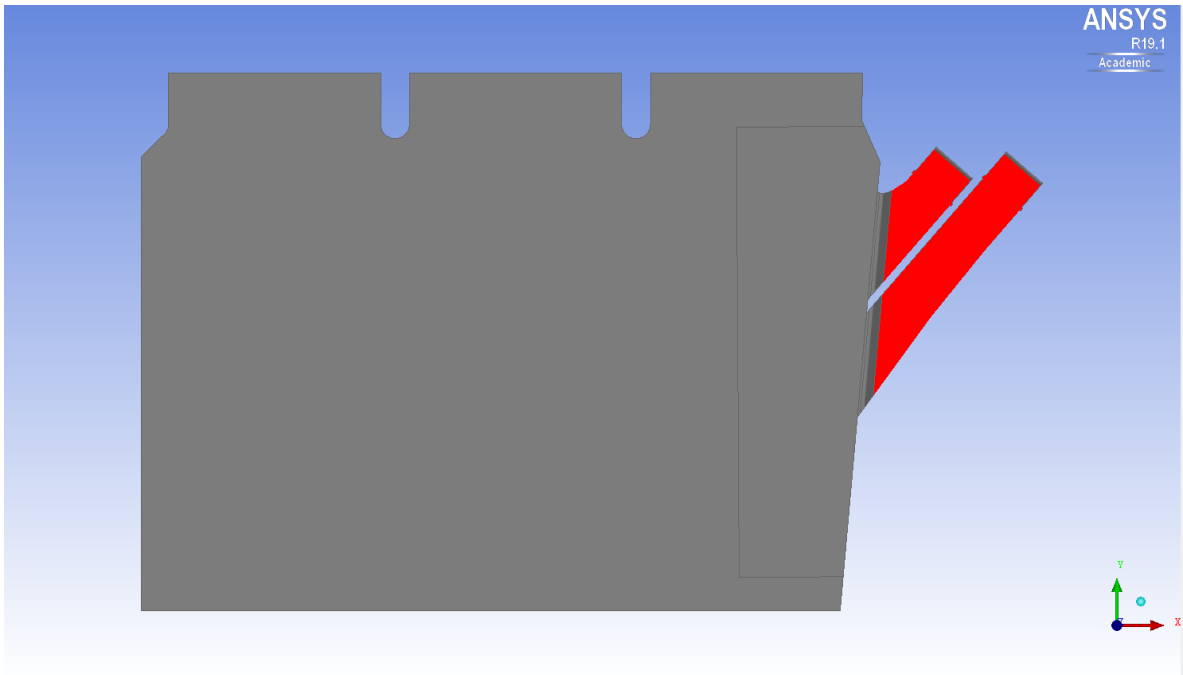
Tato podmínka byla přiřazena částem „TOP_COARSE“, „TOP_SMOOTH“ a „NATOK_TOP“. Tyto části jsou červeně zobrazeny na následujících obrázcích (Obrázek 14, Obrázek 15 a Obrázek 16).



Obrázek 14 – Nátok - „TOP_COARSE“



Obrázek 15 – Nátok - „TOP_SMOOTH”

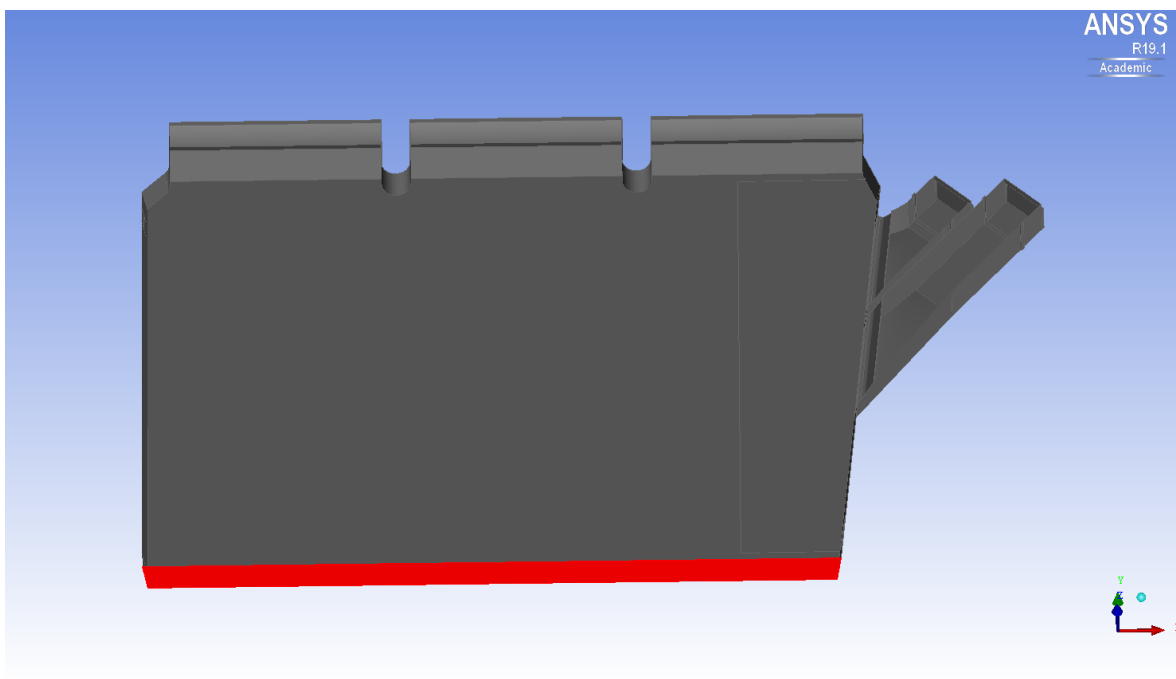


Obrázek 16 – Nátok - „NATOK_TOP”

7.4.4.2 Vstup do modelu

Přítok vody do modelu byl taktéž simulován pomocí podmínky „Opening – Opening Pressure” s hodnotou tlaku nastavenou pomocí trojúhelníkového rozdělení tlaku při známé úrovni hladiny vody ve zdrži, tedy na kótě 147,8 m n. m. Tato podmínka umožňuje vstup i výstup z modelu a nedojde tak k odražení vody od tohoto okraje a k následnému rozkolísání výpočtu.

Tato podmínka byla přidělena části „INLET”, která je zobrazena červeně na obrázku níže (Obrázek 17).

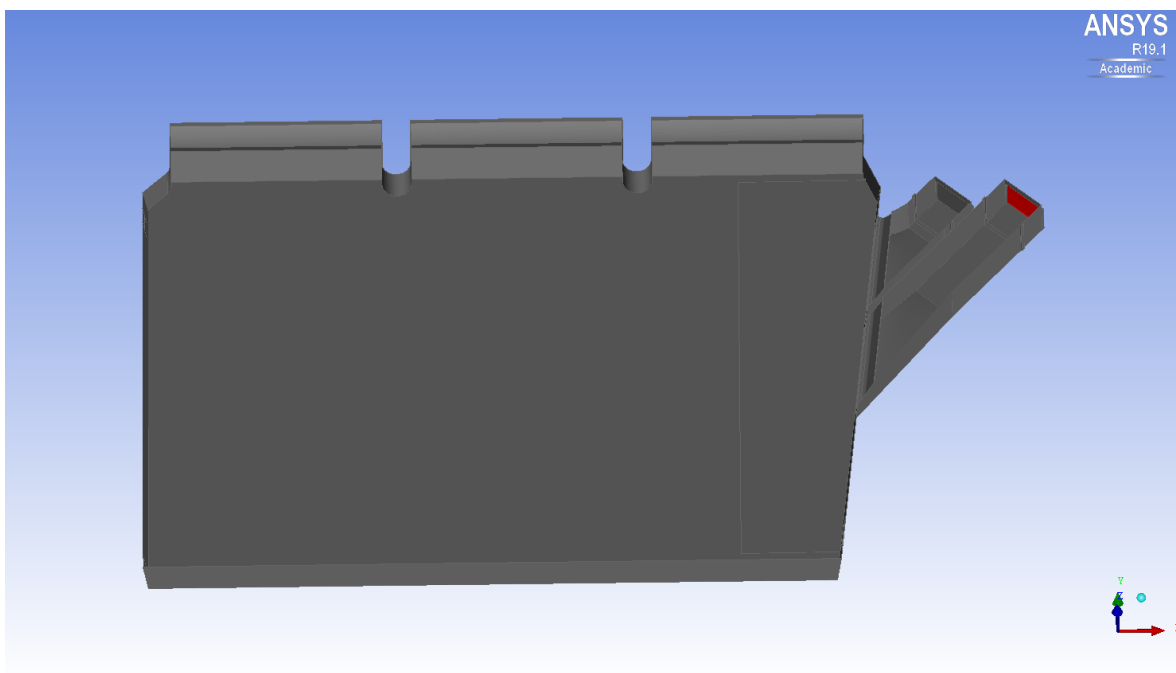


Obrázek 17 – Nátok - „INLET”

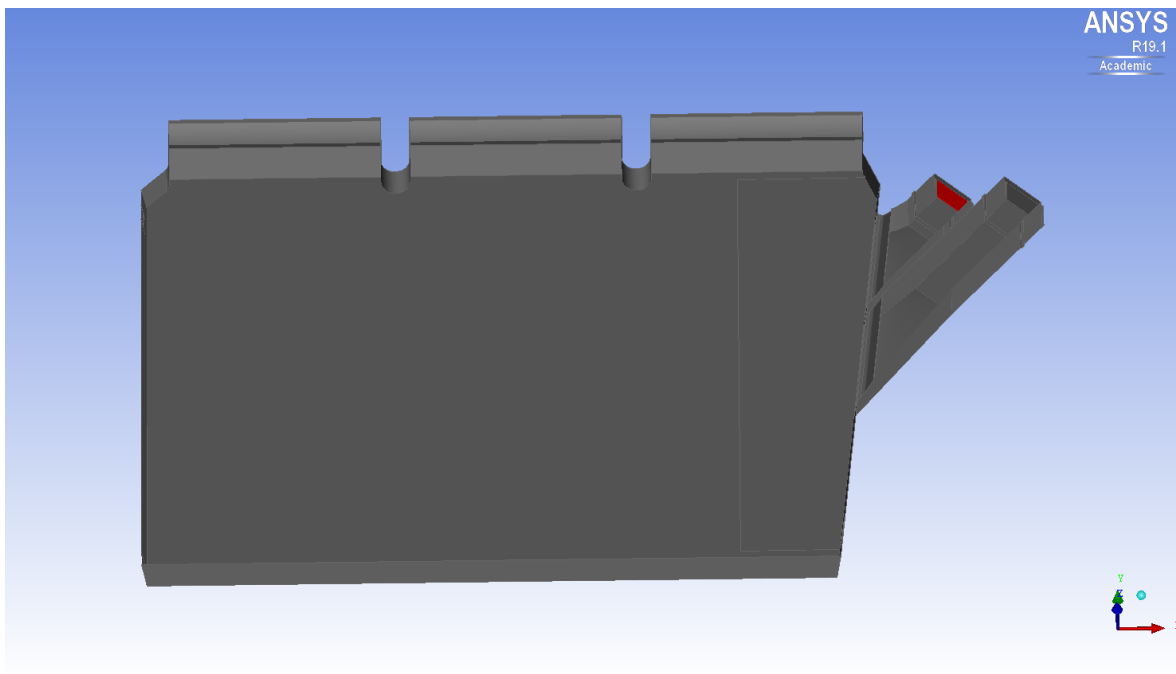
7.4.4.3 Výtok z modelu - Outlet

Odtok vody z modelu byl simulován podmínkou „Outlet – Water Velocity”. Tato podmínka umožňuje definovat rychlostní pole na zvoleném povrchu a umožňuje pouze výstup vody z modelu. Při zvolení konstantní rychlosti je simulováno rovnoměrné rozdělení rychlostí v koncovém profile způsobené jemnými česlemi. Rychlost byla vypočtena pomocí rovnice kontinuity (Rovnice 2) z návrhového průtoku, který činí $Q_{n,1/2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro obě soustrojí. Výsledná zadaná rychlost je $v_{n,1/2} = 1 \text{ m/s}$.

Takto definovaná okrajová podmínka byla využita pro části „OUTLET1” a „OUTLET2”, jež jsou červeně zobrazeny na následujících obrázcích (Obrázek 18 a Obrázek 19).



Obrázek 18 – Nátok - „OUTLET1”

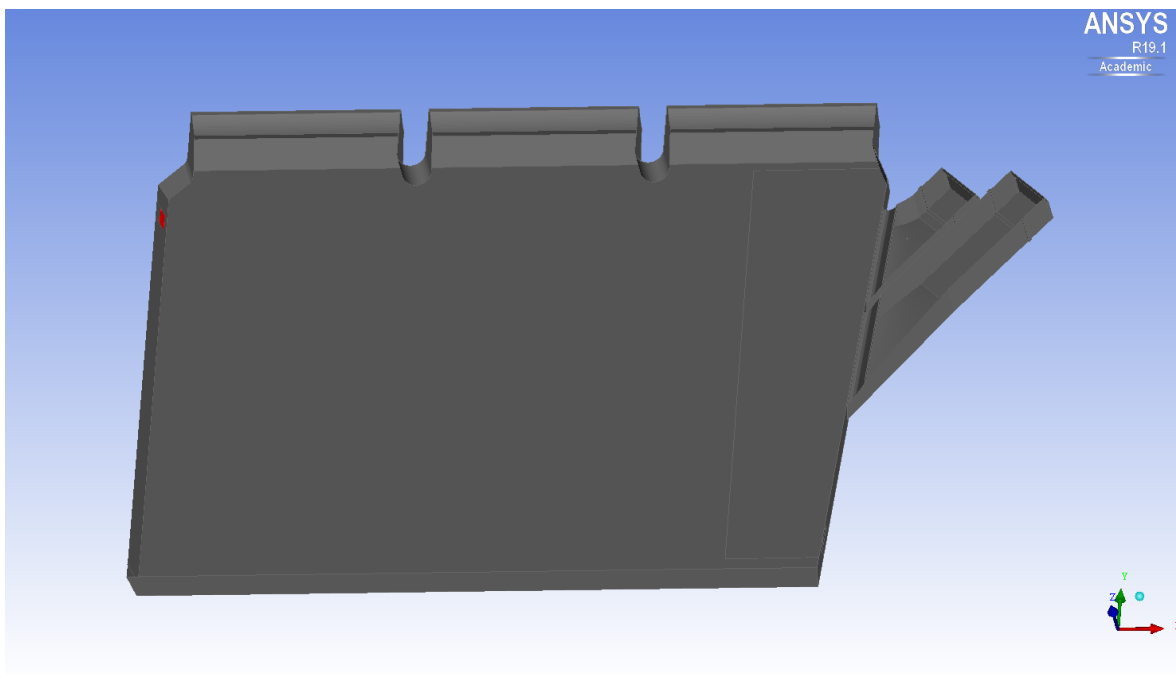


Obrázek 19 – Nátok - „OUTLET2”

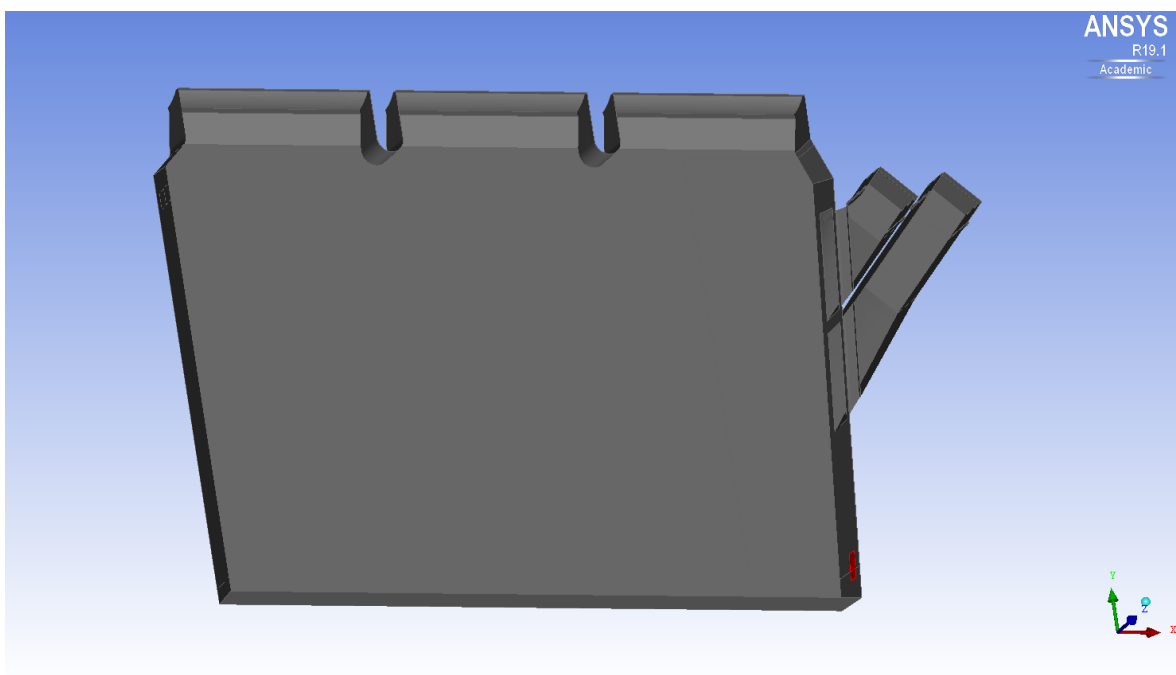
7.4.4.4 Výtok z modelu – rybí přechod

Simulace nátku do rybích přechodů byla vytvořena pomocí podmínky „Outlet – Water Mass Flow”. Tato podmínka taktéž umožňuje pouze výstup z modelu, neurčuje však přesné rychlostní pole. Umožňuje zadat objemový průtok zvolenou plochou a tím napodobit nátok na rybí přechody i bez známého rozdělení rychlostního pole. Okrajové podmínky na obou rybích přechodech byly nastaveny jako hodnoty návrhových průtoků. Pro stávající rybí přechod byla zadána hodnota průtoku $Q_{RP,L} = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a pro nový rybí přechod $Q_{RP,P} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tato podmínka byla nastavena u částí „RP_LEVY” a „RP_PRAVY”. Na následujících obrázcích (Obrázek 20 a Obrázek 21) jsou tyto části zobrazeny červeně.



Obrázek 20 – Nátok - „RP_LEVY”



Obrázek 21 – Nátok - „RP_PRAVY”

7.4.4.5 Stěny

Pevná ohraničení modelu, jimiž nemá proudit voda byly simulovány podmínkou „Wall – Rough Wall“. Těmto podmínkám byly následně přiřazeny drsnosti dle materiálu, ze kterého jsou konstruovány. Veškeré drsnostní poměry bylo nutné zadat pomocí hodnoty ekvivalentní pískové drsnosti („Sand Grain Roughness“). Tyto hodnoty byly vypočteny z Manningova drsnostního součinitele pomocí vztahu podle Sticklera (Rovnice 3).^[7]

$$n = \frac{1}{a} d^{\frac{1}{6}} \quad \text{Rovnice 3}$$

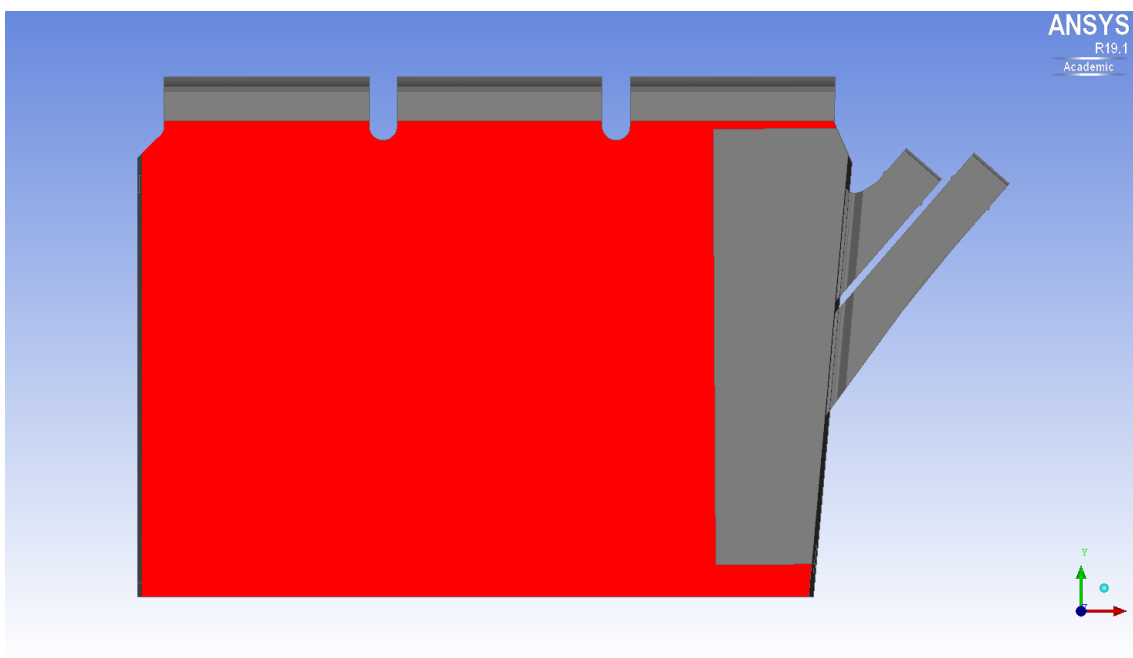
Kde je: n Manningův drsnostní součinitel [-]

a konstanta a = 21,1 [-]

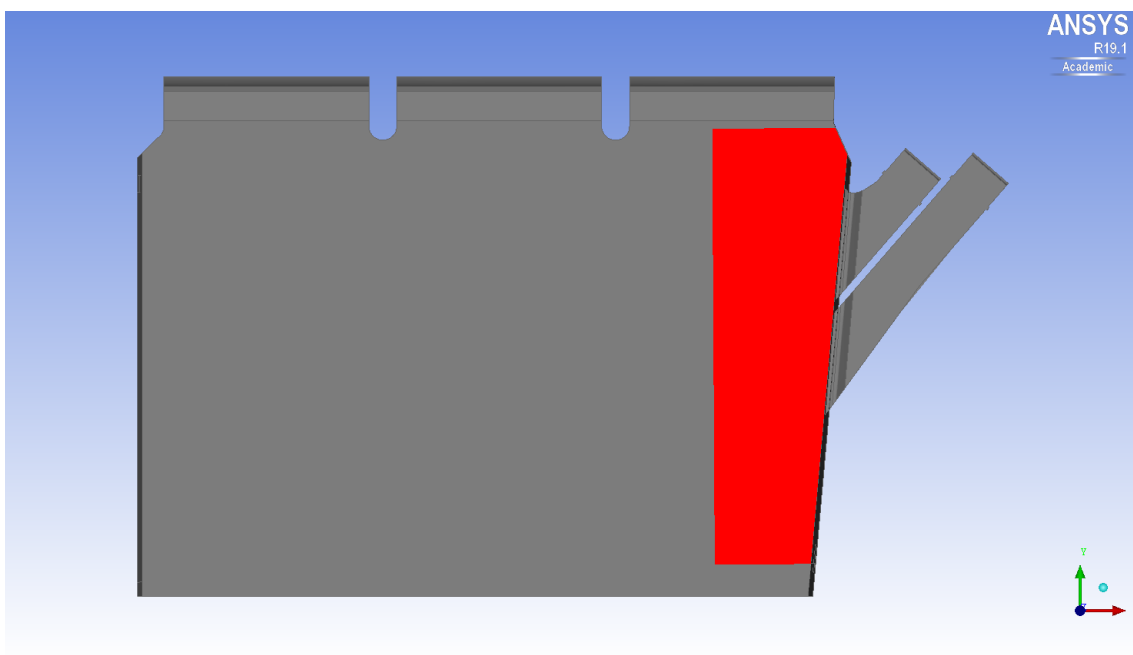
d ekvivalentní písková drsnost [m]

Tato okrajová podmínka byla přiřazena částem „DNO_COARSE“, „DNO_SMOOTH“, „ZIDKA_LEVA“, „ZIDKA_PRAVA“, „JEZ“, „KLAPKA“, „PILIR“, „NATOK_DNO“, „NATOK_PRUVLAK“, „NATOK_WALL“ a „NATOK_TLAK“.

Na následujících obrázcích (Obrázek 22, Obrázek 23, Obrázek 24, Obrázek 25, Obrázek 26, Obrázek 27, Obrázek 28, Obrázek 29, Obrázek 30, Obrázek 31 a Obrázek 32) jsou červeně zobrazeny jednotlivé části, jimž byla přiřazena podmínka „Wall – Rough Wall“.

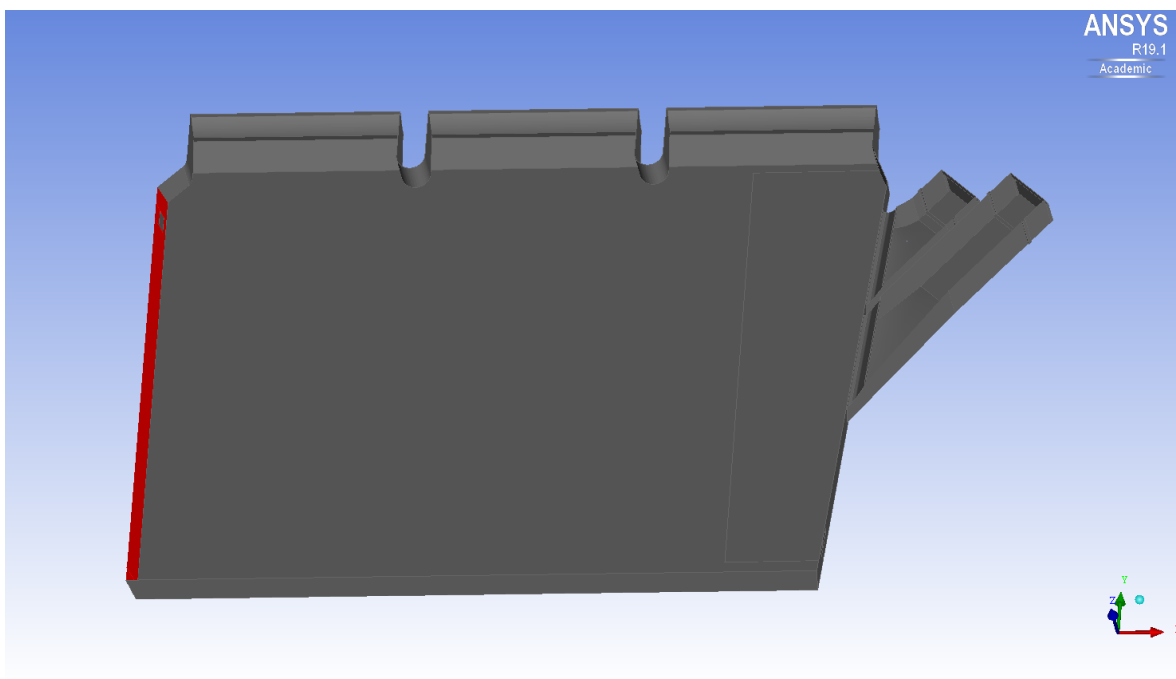


Obrázek 22 – Nátok - „DNO_COARSE“

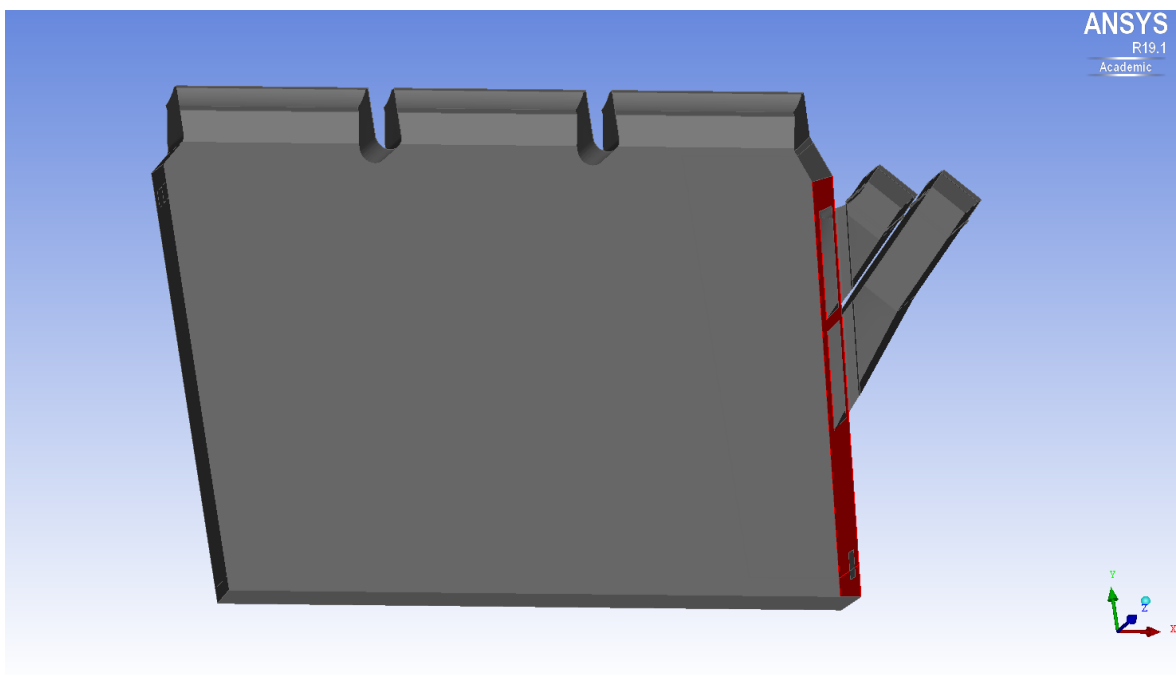


Obrázek 23 – Nátok - „DNO_SMOOTH“

Částem „DNO_COARSE“ a „DNO_SMOOTH“ byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,04$.^[7]

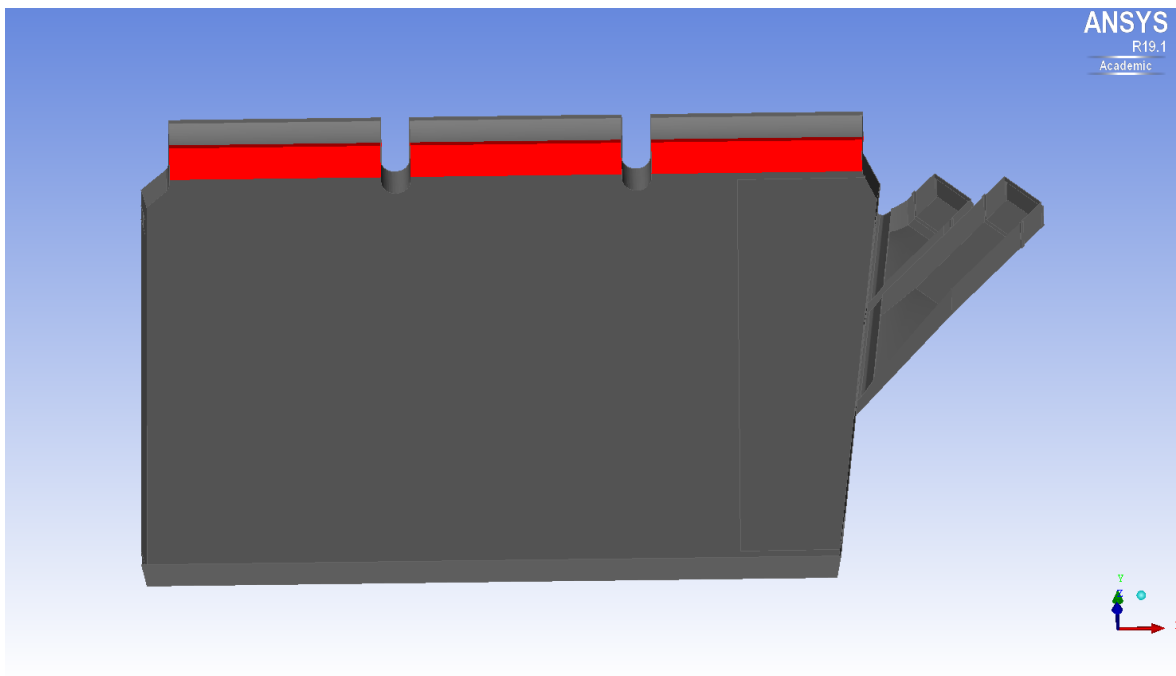


Obrázek 24 – Nátok - „ZIDKA_LEVA”

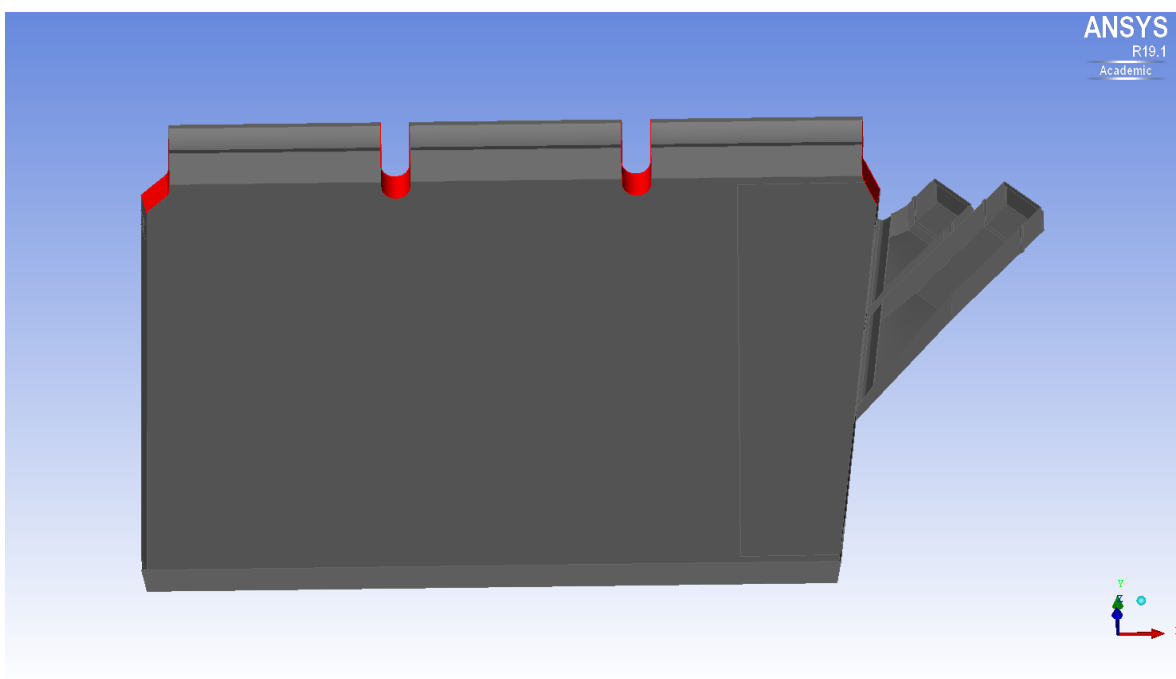


Obrázek 25 – Nátok - „ZIDKA_PRAVA”

Částem „ZIDKA_LEVA” a „ZIDKA_PRAVA” byla přidělena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,025$. [7]

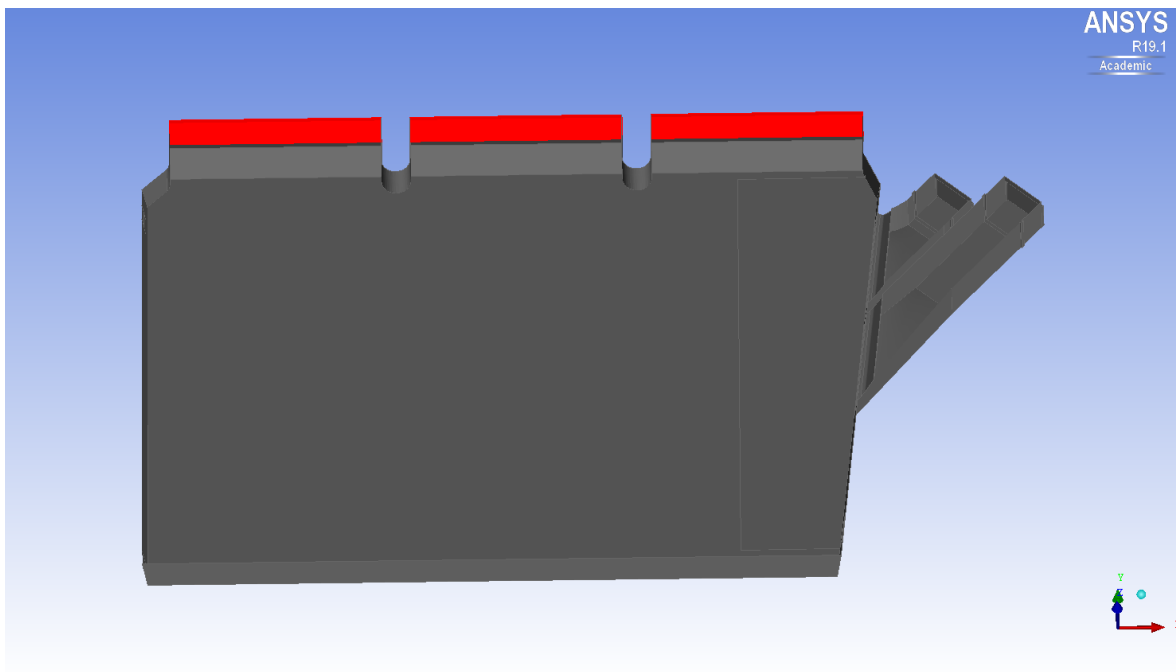


Obrázek 26 – Nátok - „JEZ”



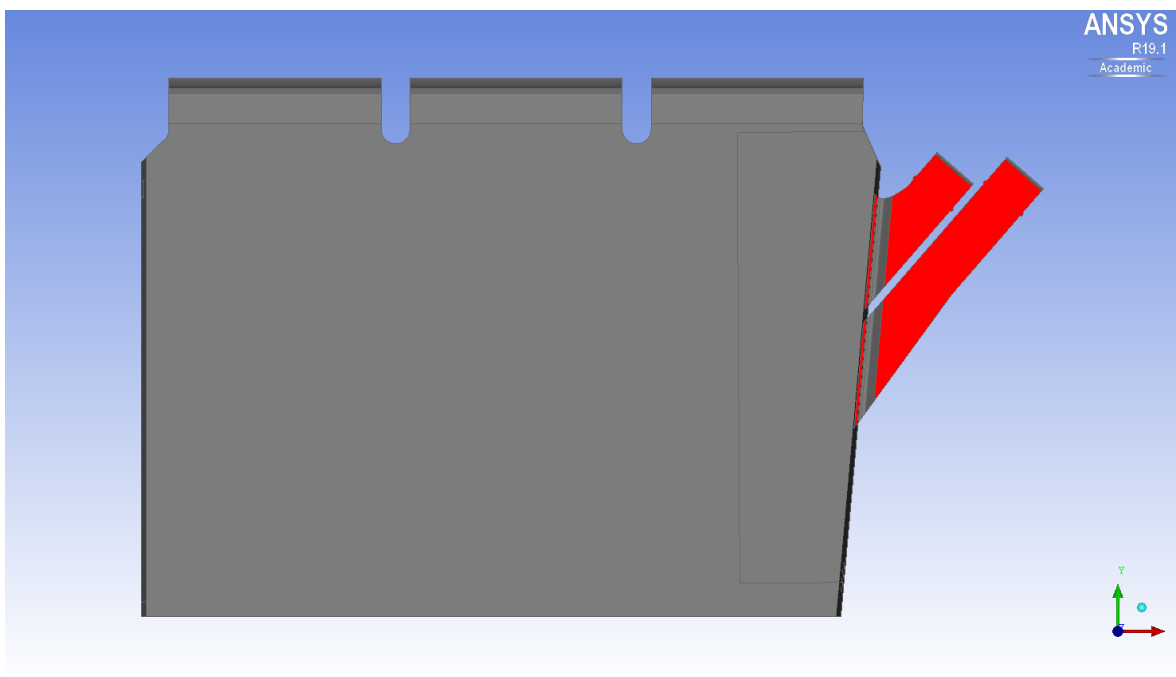
Obrázek 27 - Odtok - „PILIR”

Částem „JEZ” a „PILIR” byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele odpovídající betonu, tedy $n = 0,02$.^[7]

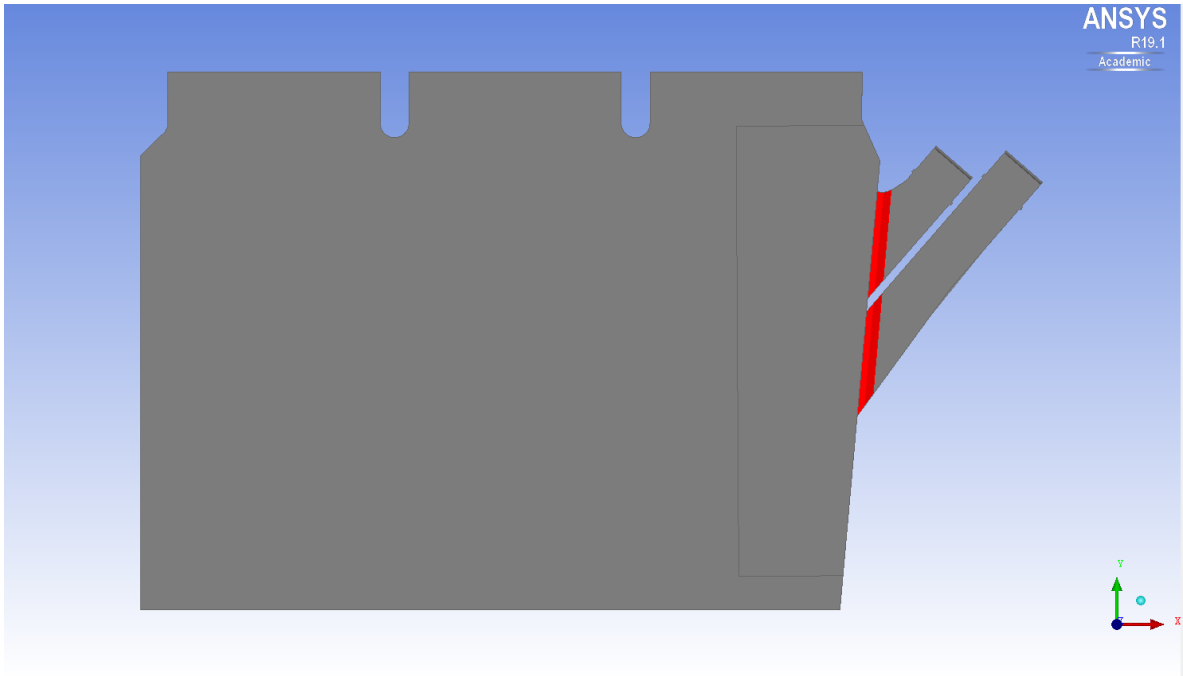


Obrázek 28 – Nátok - „KLAPKA”

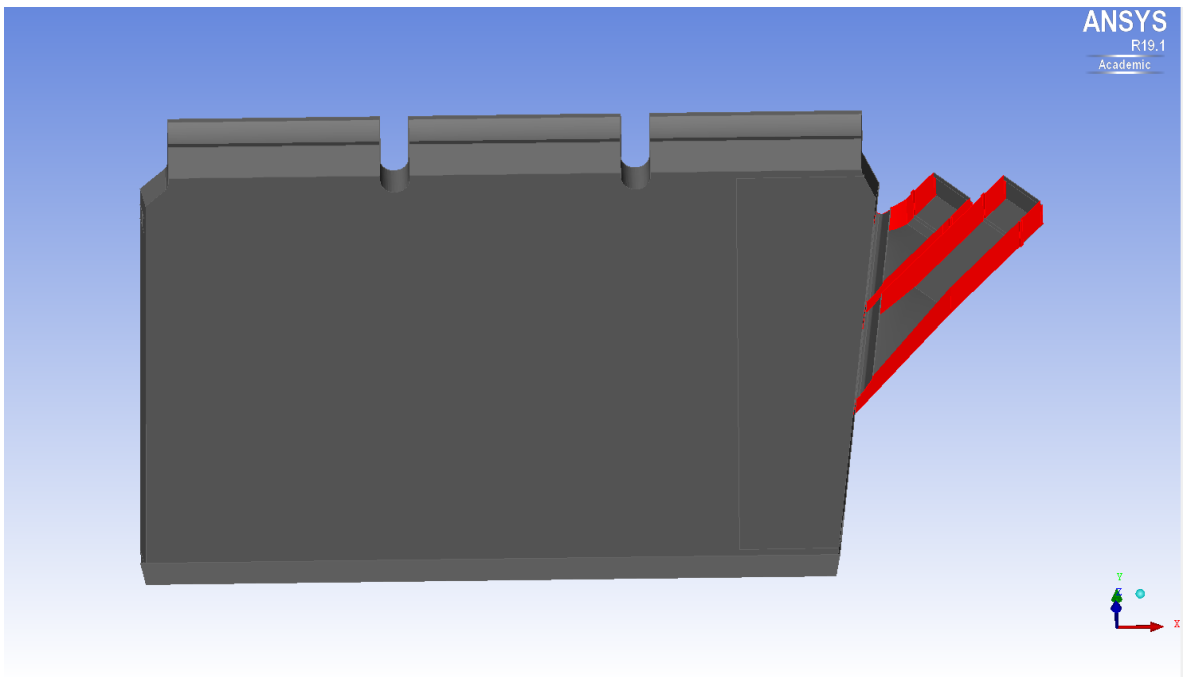
Části „KLAPKA” byla přidělena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,013$. [7]



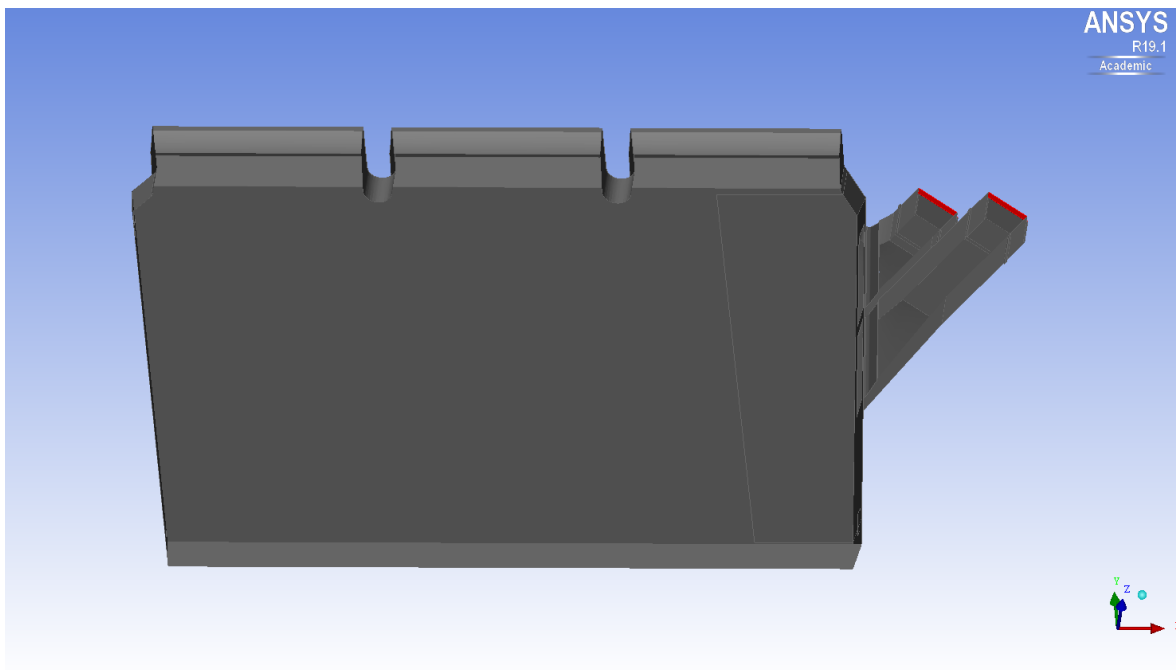
Obrázek 29 - „NATOK_DNO”



Obrázek 30 - „NATOK_PRUVLAK”



Obrázek 31 - „NATOK_WALL”



Obrázek 32 - „NATOK_TLAK“

Všem betonovým částem nátoky, tedy „NATOK_DNO“, „NATOK_PRUVLAK“, „NATOK_WALL“ a „NATOK_TLAK“ byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,02$.^[7]

7.5 Model odtokové části

Model podjezí začíná konstrukcí stávajícího jezu a končí šikmou plochou o středové vzdálenosti od jezu 62 m. Tento koncový profil byl zvolen na základě dodaného zaměření dna v podjezí s ohledem na výtok ze stávajícího rybího přechodu, který pro výpočet odtoku z MVE Terežín není potřeba simulovat. Bočně je model ohraničen patou nábřežních zdí, která dosahuje při průtoku $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ nad úroveň hladiny.

K modelu podjezí byl následně připojen model odtoku z MVE Terežín. Tento model byl sestaven na základě doporučení výrobce technologie „DIVE-Turbine“ s ohledem na místní omezení. Z důvodu velké šířky výtoku pod nábřežní zdí, kterou je nutno zachovat, je model opatřen podpěrným sloupem v polovině světlé šířky nátoky v tomto profilu. Model nátoky začíná v místě koncového profilu savek obou soustrojí. Výtok je dále opatřen koncovým profilem nového rybího přechodu.

Horní ohraničení modelu je umístěno 1 m nad hladinou při průtoku $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy na kótě 146,1 m n. m.

7.5.1 Rozdělení výpočetní sítě

Výpočetní síť pro model nátoky je rozdělena do 17 částí v závislosti na velikosti elementů. Stejně jako u modelu nátoky byly těmto částem následně přiřazeny jednotlivé okrajové podmínky definující hranice modelu. Jedná se o části „TOP_COARSE“ a „TOP_SMOOTH“ pro horní okraj modelu, „DNO_COARSE“ a „DNO_SMOOTH“ pro oblasti simulující dno v podjezí, „JEZ“, „PODJEZÍ“ a „PILIR“ pro jednotlivé části jezu, „ODTOK_DNO“ a „ODTOK_WALL“ pro části samotného odtoku z MVE Terežín, „SLOUP“ pro sloup umístěný pod nábrežní zdí sloužící k jejímu podepření v místě vyústění odtoku do stávajícího koryta, „INLET1“ a „INLET2“ pro vtoky do modelu, jež jsou umístěny na konci savek obou soustrojí, „OUTLET“ pro výtok z modelu do navazujícího koryta řeky Ohře, „ZIDKA_PRAVA“ a „ZIDKA_LEVA“ pro nábrežní zdi na obou březích, „RP“ pro vyústění z nového rybního přechodu na pravém břehu a „ODTOK_NAPOJENI“ pro prohrádku, kterou je napojeno dno odtoku na stávající dno v podjezí.

V následující tabulce (Tabulka 6) jsou zobrazeny maximální velikosti elementů definované jednotlivým částem.

Part ▲	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio
BODY	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
DNO_COARSE	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
DNO_SMOOTH	<input checked="" type="checkbox"/>		0.35	0.002	1.2
GEOM	<input type="checkbox"/>		0		
INLET1	<input type="checkbox"/>		0.15	0	0
INLET2	<input type="checkbox"/>		0.15	0	0
JEZ	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
ODTOK_DNO	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2
ODTOK_NAPOJENI	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2
ODTOK_SLOUP	<input checked="" type="checkbox"/>		0.1	0.002	1.2
ODTOK_WALL	<input checked="" type="checkbox"/>		0.25	0.002	1.2
OUTLET	<input type="checkbox"/>		0	0	0
PILIR	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
PODJEZI	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
RP	<input type="checkbox"/>		0.15	0	0
TOP_COARSE	<input type="checkbox"/>		0	0	0
TOP_SMOOTH	<input type="checkbox"/>		0	0	0
ZIDKA_LEVA	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0.002	1.2
ZIDKA_PRAVA	<input checked="" type="checkbox"/>		0.35	0.002	1.2

Tabulka 6 - Nátok - rozdělení maximální velikosti elementů pro jednotlivé části výpočetní sítě

7.5.2 Stanovení horní okrajové podmínky

Horní okrajová podmínka byla zvolena na základě návrhového průtoku. Pro každé soustrojí je tedy stanovena hodnotou $Q_{n,1;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a pro rybí přechod $Q_{n,RP} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.5.3 Stanovení dolní okrajové podmínky

Dolní okrajová podmínka byla stanovena na základě známé hladiny v podjezí při návrhovém průtoku $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$. Byla zadána pomocí trojúhelníkového rozložení tlaku pro hladinu ve výšce 145,1 m n. m.

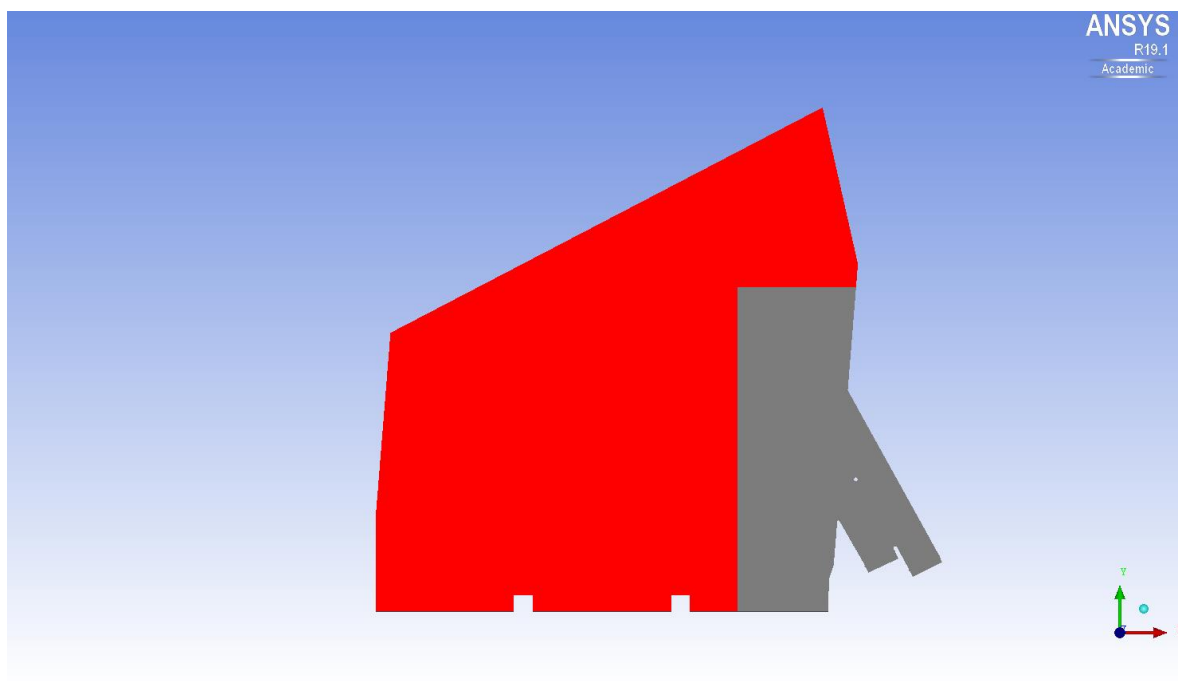
7.5.4 Okrajové podmínky

Pro definování okrajových podmínek prostorového modelu odtoku byly využity části, na něž byla rozdělena výpočetní síť pro tento model (viz. 7.5.1 str. 49). Těmto částem byly přiřazovány takové podmínky, aby model co nejlépe odpovídal reálnému proudění vody.

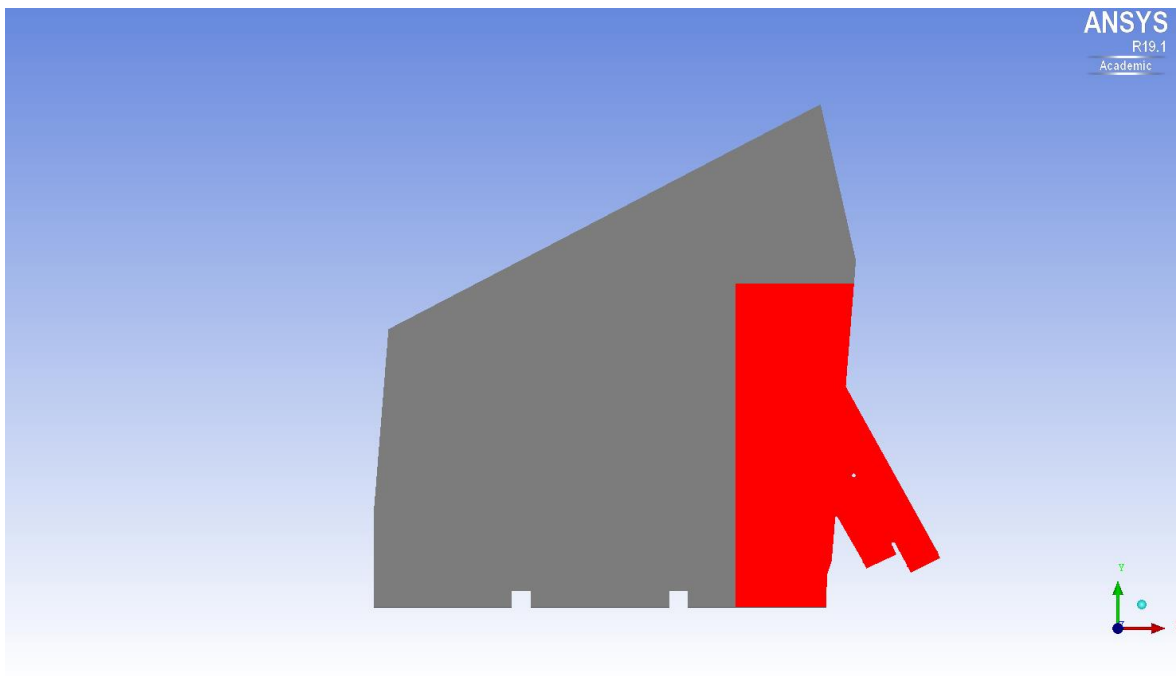
7.4.4.1 Volná hladina

Podmínka volné hladiny je, stejně jako u nátoky, simulována pomocí podmínky „Opening – Opening Pressure“ s definovaným průměrným relativním tlakem 0 kPa.

Tato podmínka byla přiřazena částem „TOP_COARSE“ a „TOP_SMOOTH“. Tyto části jsou červeně zobrazeny na následujících obrázcích (Obrázek 33 a Obrázek 34).



Obrázek 33 – Odtok - „TOP_COARSE“



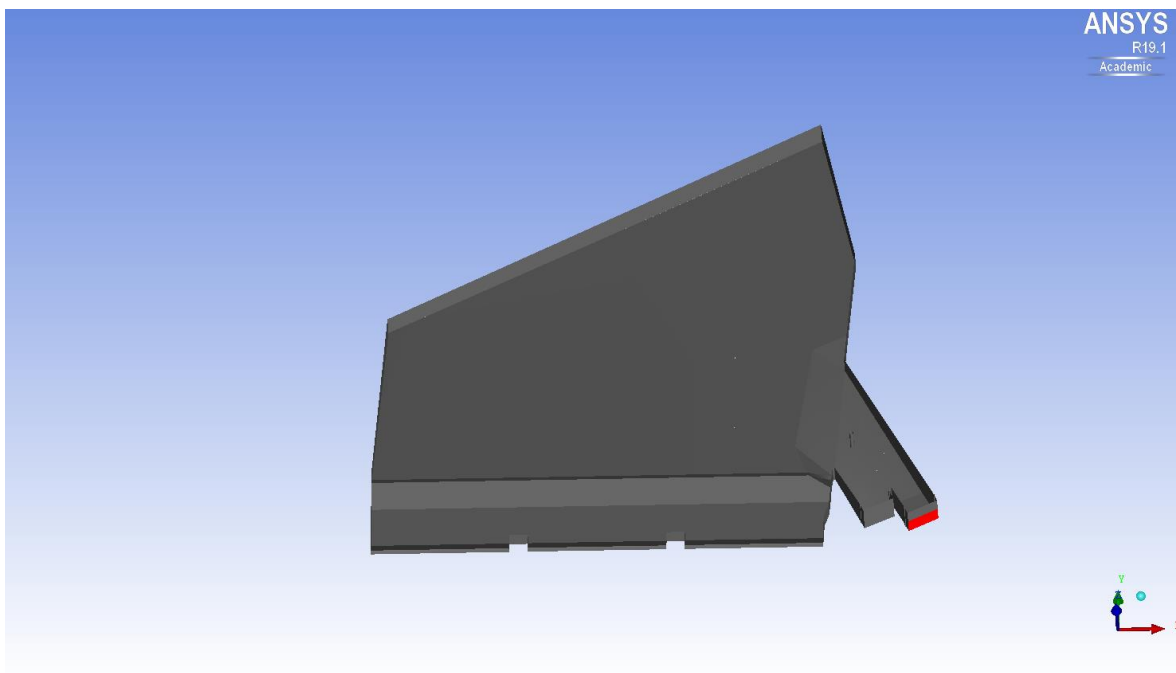
Obrázek 34 – Odtok - „TOP_SMOOTH“

7.4.4.2 Vstup do modelu

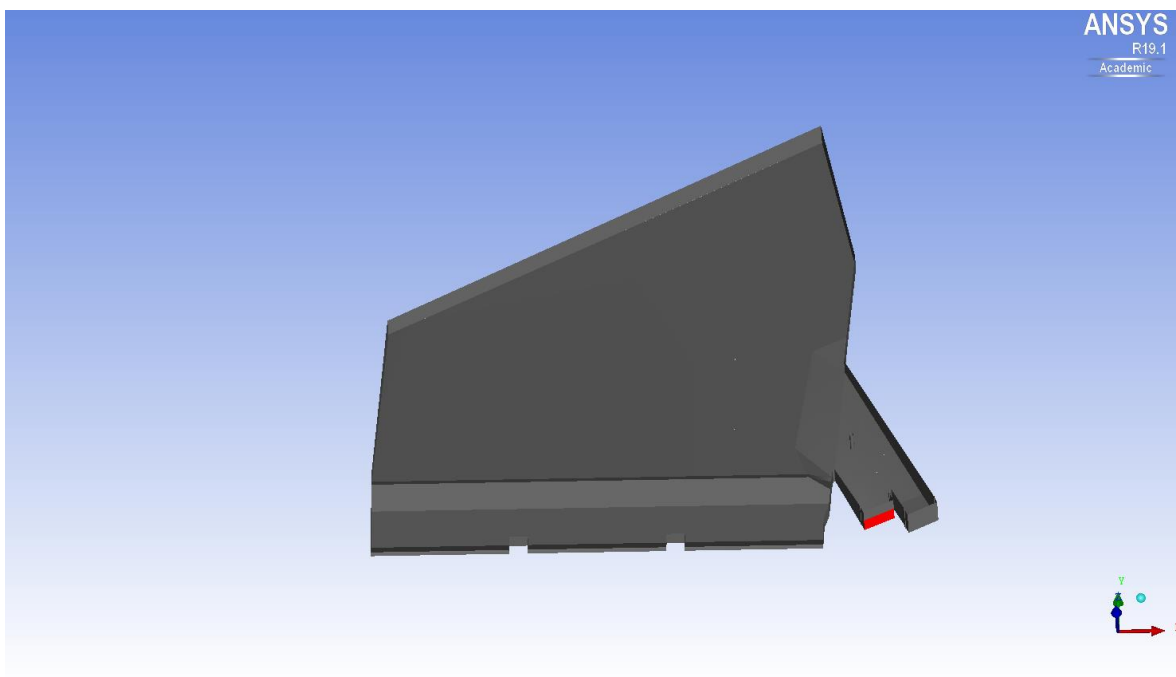
Přítok vody do modelu byl taktéž simulován pomocí podmínky „Inlet – Bulk Mass Flow Rate“. Tato podmínka umožňuje zadat hodnotu průtoku na vstupu a určit, kterou částí plochy bude tento průtok protékat. Pro tento případ, kdy je vstup do modelu situován v místě výtoku ze savek turbín, byla jako průtočná zvolena celá plocha výtoku ze savky.

Průtok byl pro obě soustrojí zadán hodnotou návrhového průtoku $Q_{n,1;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tato podmínka byla přidělena částem „INLET1“ a „INLET2“, které jsou zobrazeny červeně na obrázku níže (Obrázek 35 a Obrázek 36).



Obrázek 35 – Odtok - „INLET1“

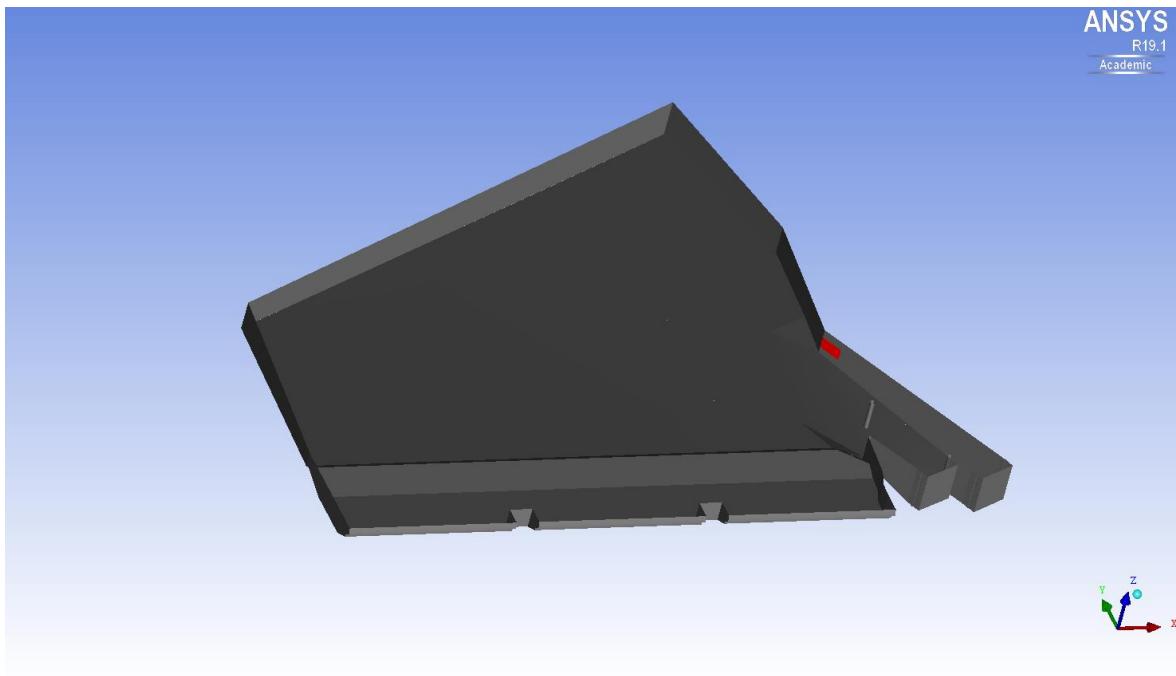


Obrázek 36 - Odtok - „INLET2“

7.4.4.3 Vstup do modelu – rybí přechod

Přítok vody do modelu znázorňující nový rybí přechod byl opět simulován pomocí podmínky „Inlet – Bulk Mass Flow Rate“. Průtok byl nastaven na hodnotu návrhového průtoku pro pravý rybí přechod, tedy $Q_{RP,P} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ a je taktéž veden celou plochou simulující tento rybí přechod.

Tato okrajová podmínka byla přidělena části „RP“, která znázorňuje nový rybí přechod, a je červeně zobrazena na obrázku níže (Obrázek 37).

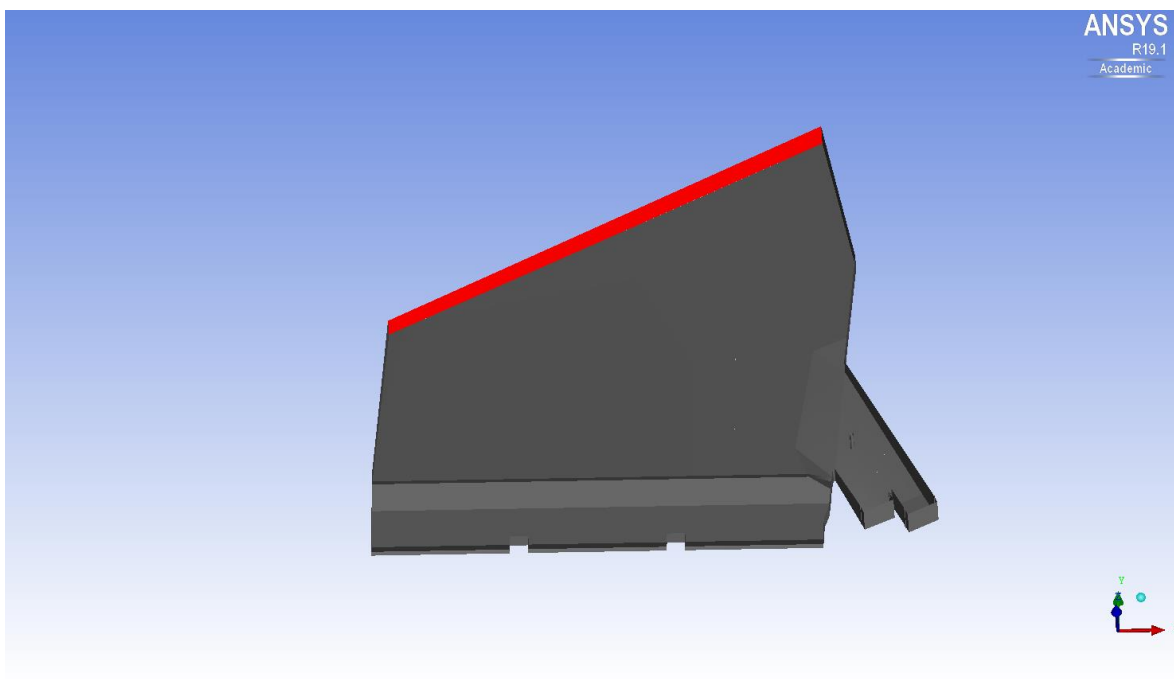


Obrázek 37 - Odtok - „RP“

7.4.4.4 Výtok z modelu

Odtok vody z modelu byl simulován pomocí podmínky „Opening – Opening Pressure” s hodnotou tlaku nastavenou pomocí trojúhelníkového rozdělení tlaku při známé úrovni hladiny spodní vody při návrhovém průtoku $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy na kótě 145,1 m n. m. Tato podmínka umožňuje vstup i výstup do a z modelu a nedojde tak k odražení vody od tohoto okraje a k následnému rozkolísání výpočtu.

Takto definovaná okrajová podmínka byla využita pro část „OUTLET”, jež je červeně zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 38).



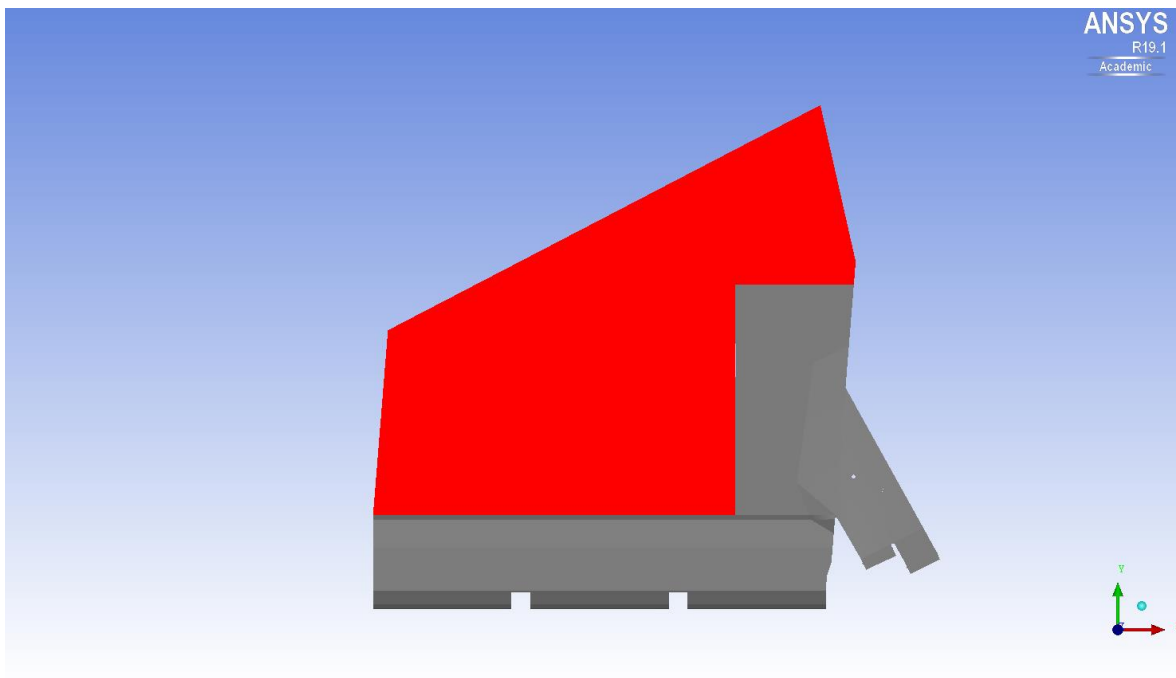
Obrázek 38 – Odtok - „OUTLET”

7.4.4.5 Stěny

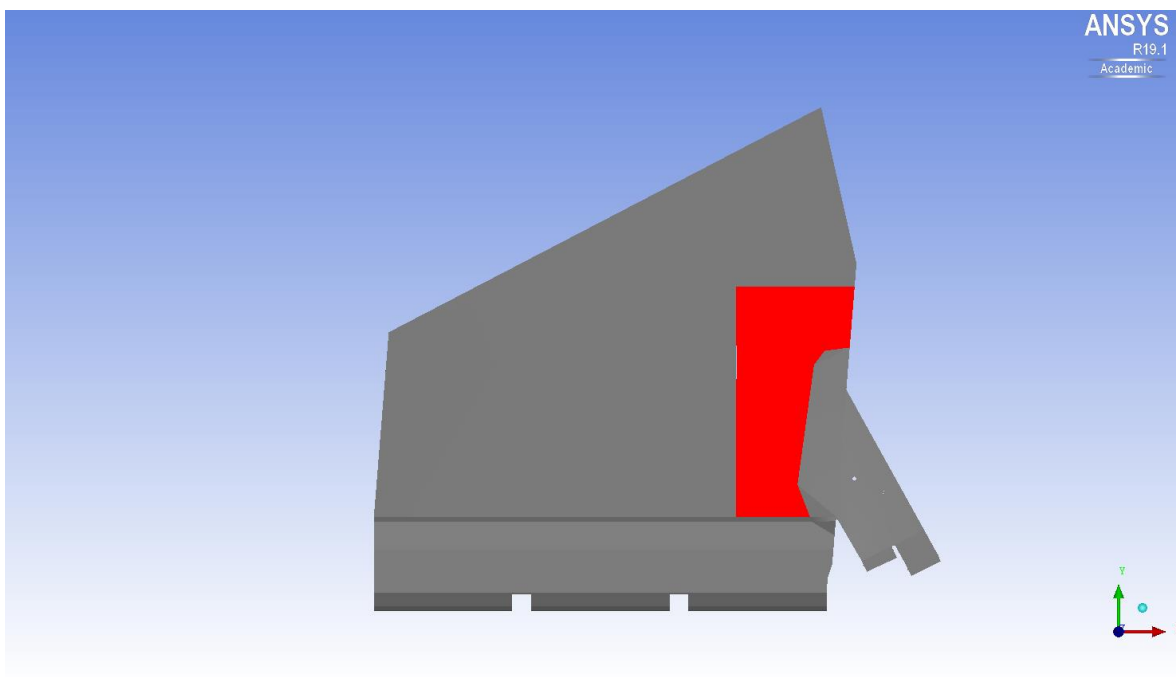
Stěny modelu byly, stejně jako u modelu nátokové části, simulovány podmínkou „Wall – Rough Wall“. Hodnoty drsnosti byly opět zadávány pomocí hodnoty ekvivalentní pískové drsnosti vypočtené z Manningova drsnostního součinitele podle Sticklera (Rovnice 3).

Tato okrajová podmínka byla přiřazena částem „DNO_COARSE“, „DNO_SMOOTH“, „ZIDKA_LEVA“, „ZIDKA_PRAVA“, „JEZ“, „PODJEZI“, „ODTOK_DNO“, „ODTOK_NAPOJENI“, „ODTOK_WALL“ a „SLOUP“.

Na následujících obrázcích (Obrázek 39, Obrázek 40, Obrázek 41, Obrázek 42, Obrázek 43, Obrázek 44, Obrázek 45, Obrázek 46, Obrázek 47 a Obrázek 48) jsou červeně zobrazeny jednotlivé části modelu odtoku, jimž byla přiřazena podmínka „Wall – Rough Wall“.

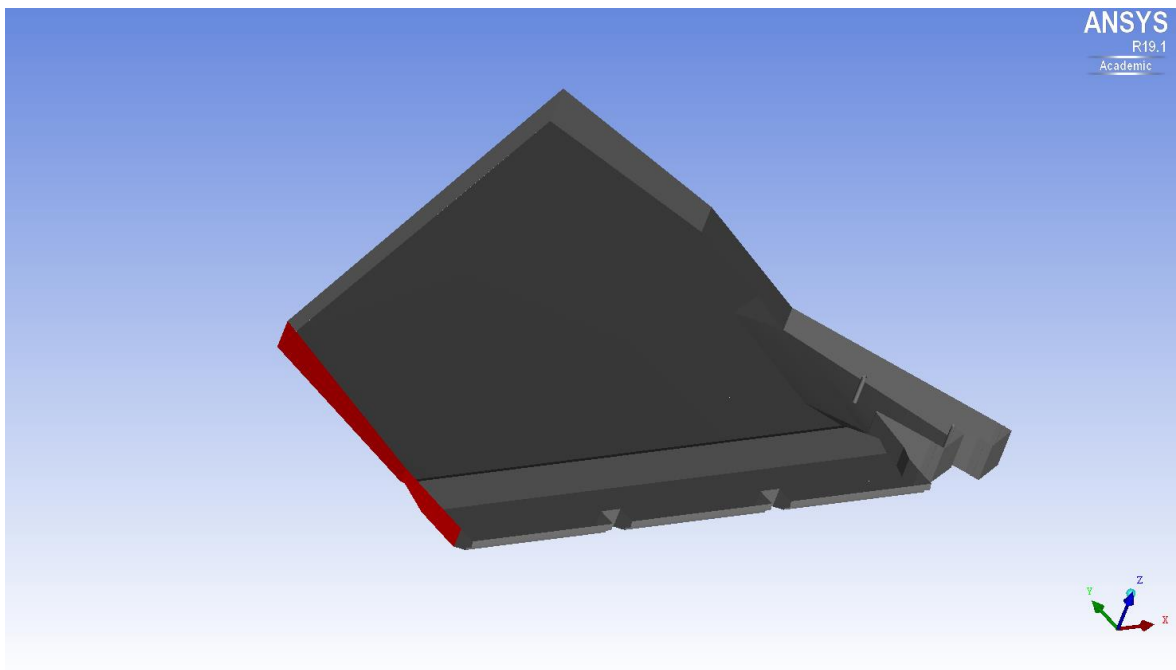


Obrázek 39 – Odtok - „DNO_COARSE”

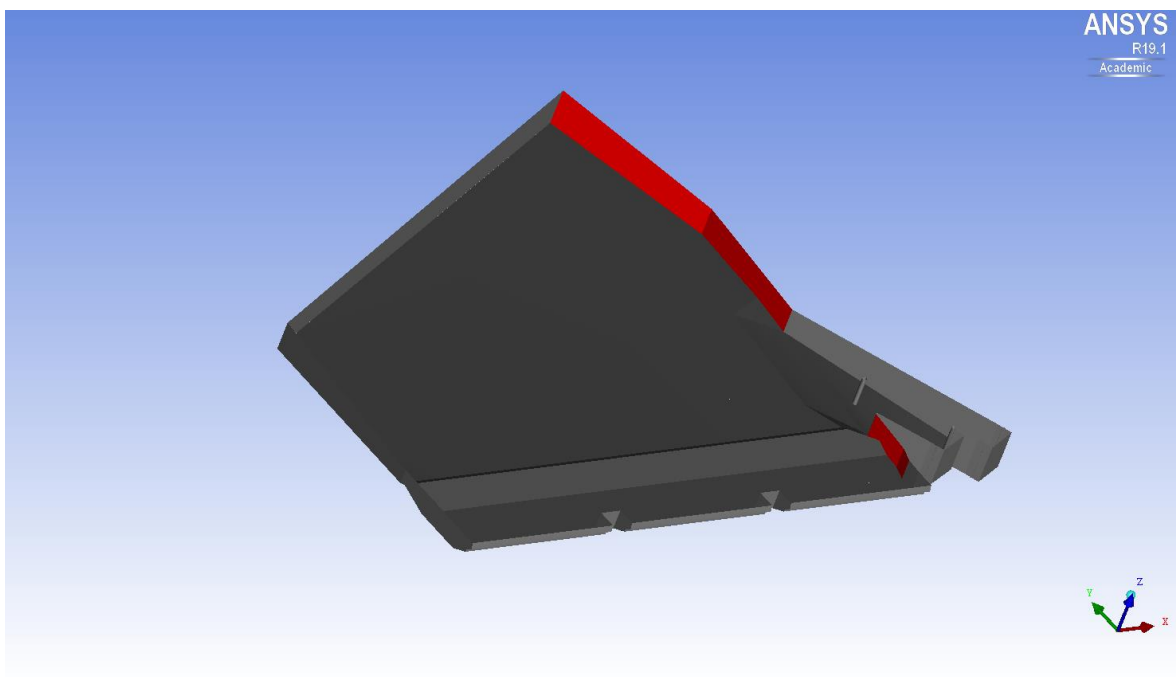


Obrázek 40 – Odtok - „DNO_SMOOTH”

Částem „DNO_COARSE” a „DNO_SMOOTH” byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele stejně jako u modelu nátoku $n = 0,04$.^[7]

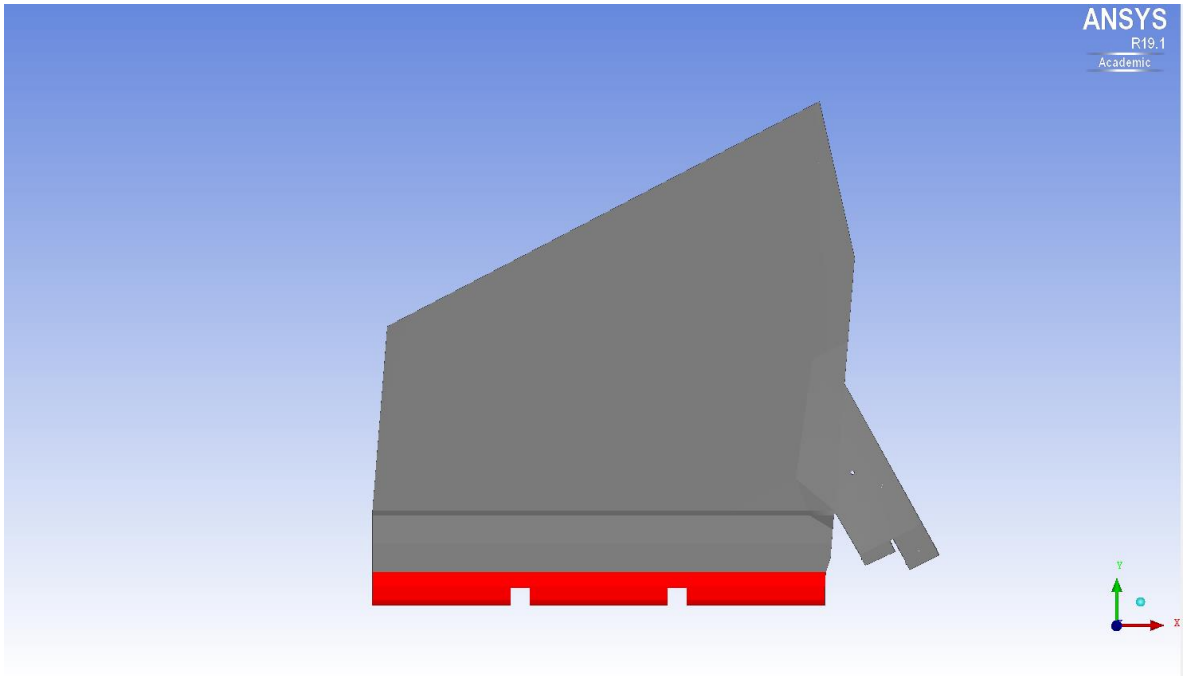


Obrázek 41 – Odtok - „ZIDKA_LEVA”

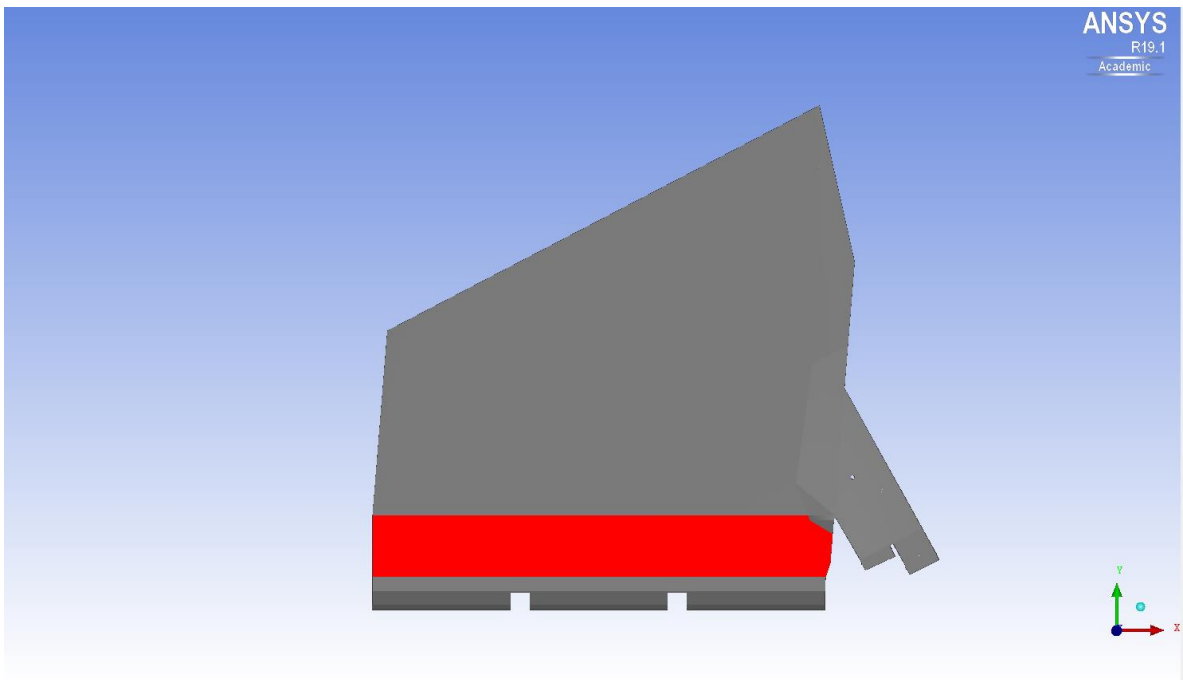


Obrázek 42 – Odtok - „ZIDKA_PRAVA”

Částem „ZIDKA_LEVA” a „ZIDKA_PRAVA” byla přidělena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,025$.^[7]

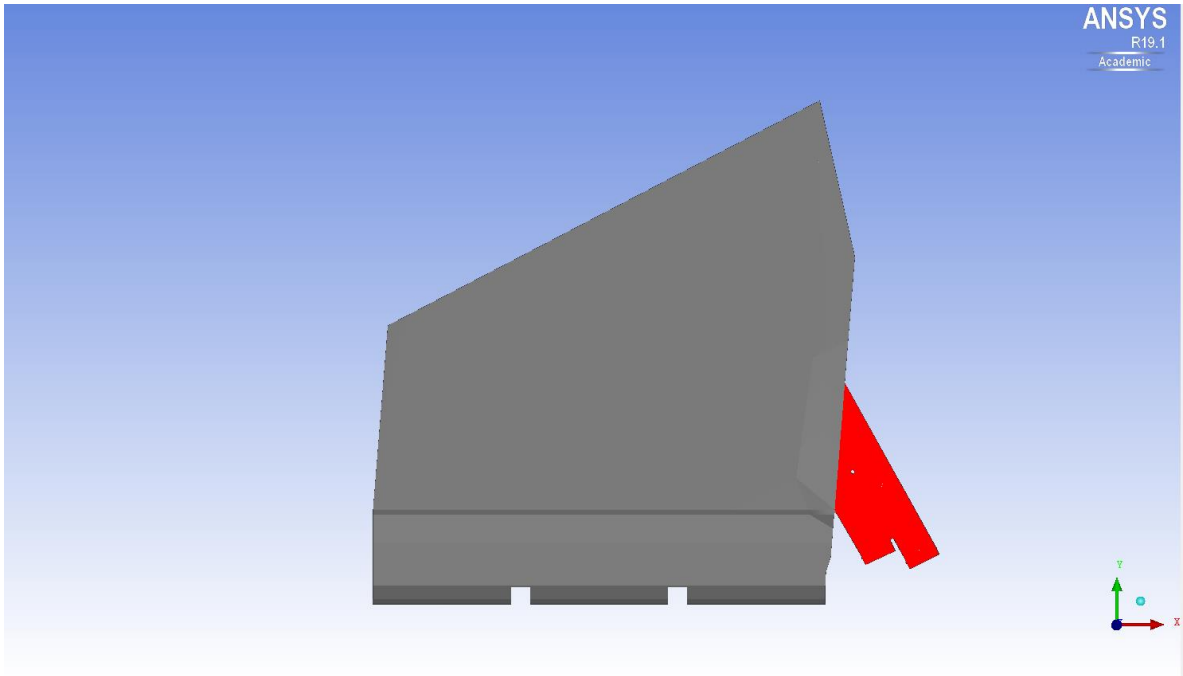


Obrázek 43 – Odtok - „JEZ”

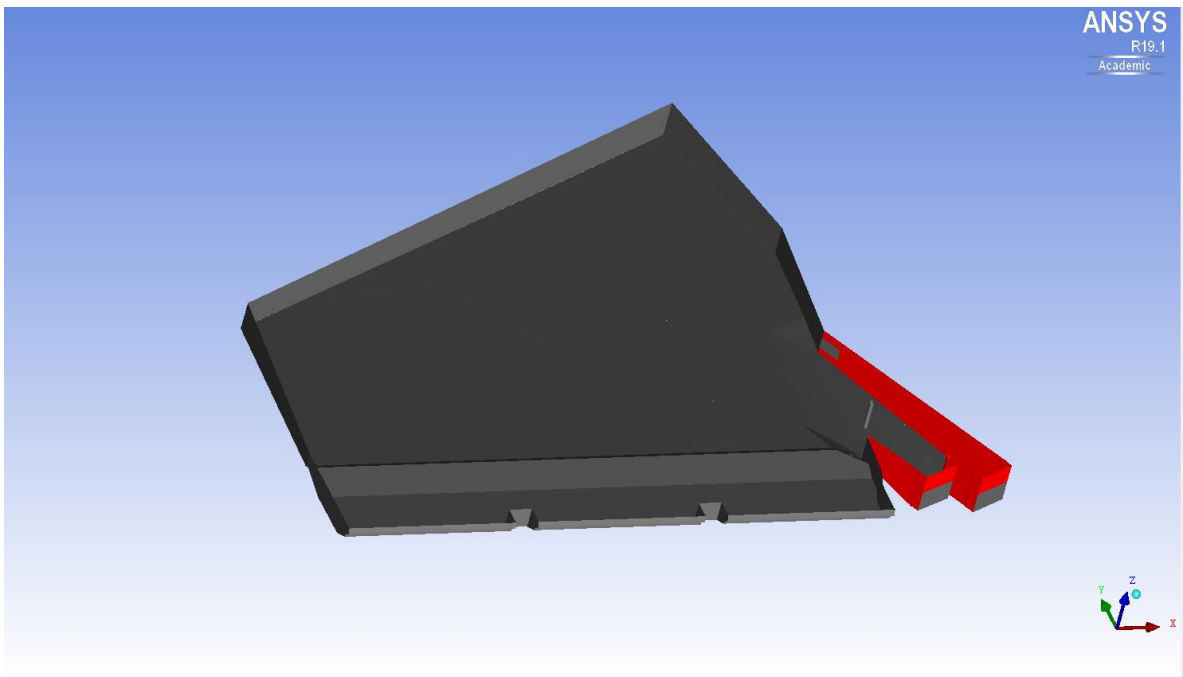


Obrázek 44 – Odtok - „PODJEZI”

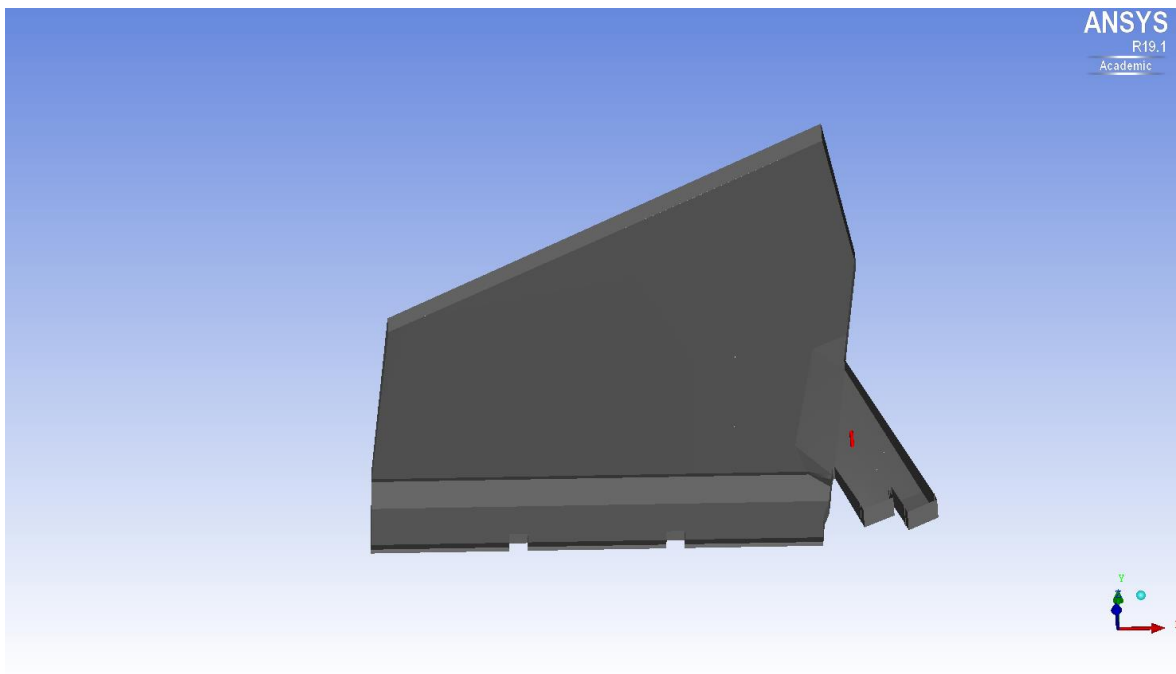
Částem „JEZ” a „PODJEZI” byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele odpovídající betonu $n = 0,02$.^[7]



Obrázek 45 – Odtok - „ODTOK_DNO”

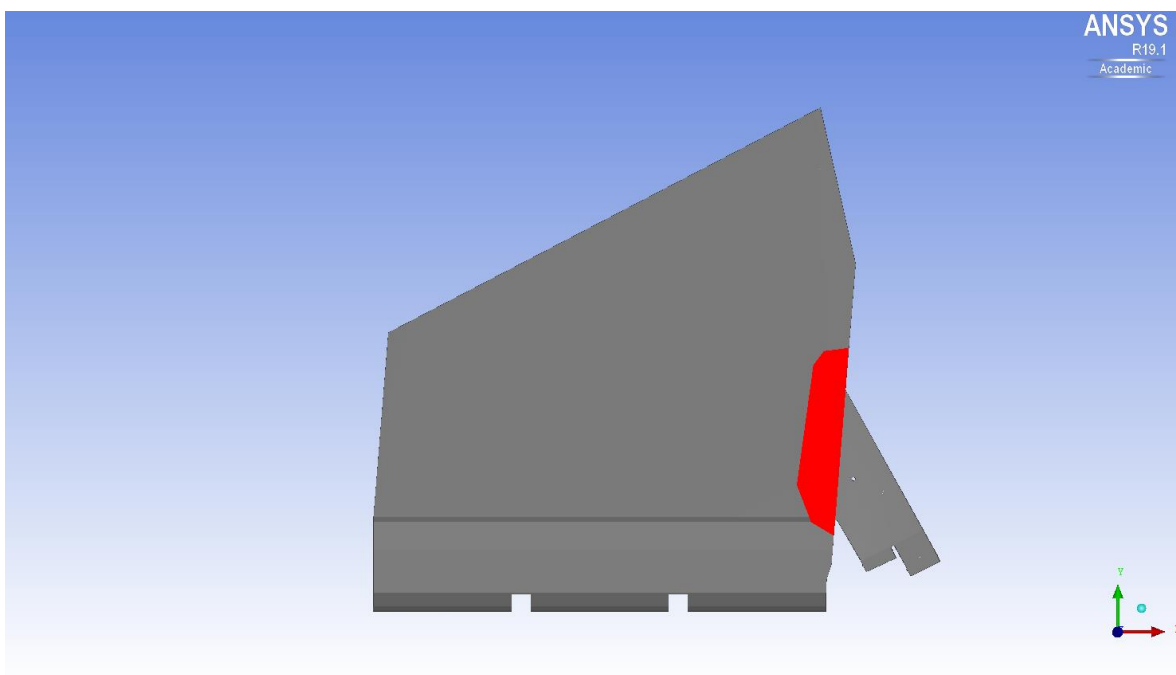


Obrázek 46 – Odtok - „ODTOK_WALL”



Obrázek 47 – Odtok - „SLOUP”

Všem betonovým částem nátoku, tedy „ODTOK_DNO”, „ODTOK_WALL” a „SLOUP” byla přiřazena hodnota Manningova drsnostního součinitele $n = 0,02$. [7]



Obrázek 48 - Odtok - „ODTOK_NAPOJENI”

Části „ODTOK_NAPOJENI” byla přiřazena drsnost odpovídající dnu koryta, tedy stejná jako u částí „DNO_COARSE“ a „DNO_SMOOTH“, a to $n = 0,04$. [7]

7.6 Počáteční podmínka

Jako počáteční podmínka pro všechny varianty modelu nátoku i odtoku bylo stanoveno celkové zaplavení modelu do úrovně horního okraje modelu „TOP“ z důvodu zajištění lepší stability výpočtu.

8. Vyhodnocení výstupů z modelu

V rámci vyhodnocení výsledků matematické simulace byly pro všechny modely sestrojeny vizualizace, díky nimž je možné zobrazit proudění v těchto modelech. Následně byly na základě těchto vizualizací modely upravovány tak, aby se předešlo případným problémům v proudění a maximalizovala se tak účinnost využití spádu vzniklého jezovým stupněm v cílové lokalitě.

Základní tvarové řešení půdorysu MVE Terežín, které bylo popisováno v kapitole 6.2 Optimalizace půdorysného uspořádání na straně 28, již měněno nebylo. Všechny modely tedy odpovídají variantě, kdy osa nátoku svírá s osou odtoku úhel 250° a spojnice os oběžných kol je ve směru osy jezu.

V rámci vizualizace proudění byla u všech modelů zobrazena hladina s vykreslením nadmořských výšek. Dále byly sestrojeny proudnice na hladině a prostorové proudnice, zobrazující na barevné škále rychlostní pole. Rychlostní pole bylo také zobrazeno na hladině a ve zvolených vyhodnocovacích řezech pro všechny varianty nátokové i odtokové části. Umístění těchto řezů je popsáno v následujících kapitolách (8.1 Model nátokové části, str. 61 a 8.2 Model odtokové části, str. 88), věnujících se odděleně simulacím proudění na nátoku a odtoku do a z MVE Terežín. Všechny vizualizace jsou doplněny legendou popisující barevnou škálu a jí odpovídající hodnoty zobrazené veličiny.

Pomocí tabulkového editoru v programu pro post processing softwarového balíčku Ansys byly dále vypočteny ztráty nátokovou a odtokovou částí MVE Terežín.

8.1 Model nátokové části

Tvarové řešení nátokové části MVE Terezín vychází z konceptu navrženého výrobcem technologie „DIVE-Turbine“ a z místních prostorových omezení.

Kvůli stavebnímu omezení, které se týká nařízení o neporušení opěrné stěny nad hladinou vody v jezové zdrži, byl volen tvar vtokového okna v této stěně tak, že je stěna zanořena pod hladinu vody o 0,5 m, je tedy na kótě 147,3 m n. m. Výška okna byla zvolena 2 m. Tím došlo na vstupní hraně nátokové části k vytvoření dnového prahu, jehož účelem je zachytávání splavenin. Spodní hrana vtokového okna je tedy na kótě 145,3 m n. m. Minimální šířka okna byla zvolena 10 m s ohledem na průměrnou průřezovou rychlost v tomto profilu. Vzhledem k velké světlé šířce průvlaku, který bude podpírat opěrnou stěnu nad vtokovým oknem, bude prodloužen dělicí pilíř mezi nátoky na TG1 a TG2 až do profilu opěrné stěny. Nátoky na TG1 a TG2 tedy budou po celé délce stavebně odděleny. Dělicí pilíř mezi nátoky bude široký 0,8 m a bude zároveň působit jako podpora tohoto průvlaku.

Pro optimalizaci tvarového řešení nátokové části MVE Terezín byly sestaveny tři různé varianty modelu, které jsou označeny A1, A2 a A3.

V následující tabulce (Tabulka 7) je sestaven stručný přehled jednotlivých modelů nátokové části MVE Terezín. Detailnější popis jednotlivých variant je uveden v následujících kapitolách.

Varianta	Popis geometrie	Výpočetní stav	Návrhový průtok [m^3/s]		
			TG1	TG2	celkový
			$Q_{n,1}$	$Q_{n,2}$	Q_n
A1	přímé stěny		17.5	17.5	35.0
A2	rozevření stěn posun dna		17.5	17.5	35.0
A3	přidány usměrňovací křídla	VS1	17.5	17.5	35.0
		VS2	0.0	17.5	17.5
		VS3	17.5	0.0	17.5

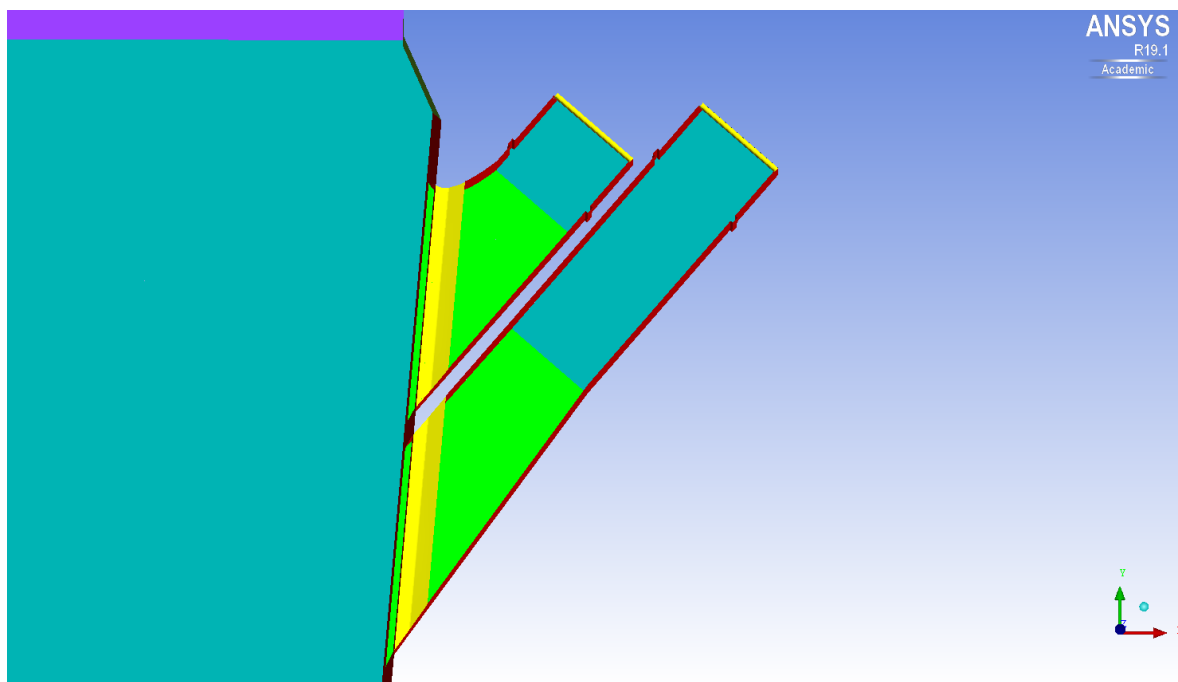
Tabulka 7 - Přehled variant vtokové části

8.1.1 Varianta A1

První varianta tvarového řešení nátokové části MVE Terezín je uspořádána tak, že všechny stěny nátoky mají stejný směr, jako jeho osa, vyjma levé stěny nátoky na TG2 (levý), která je mírně otevřena tak, aby umožnila nátok vody ze směru pravého jezového pole.

Napojení úrovně dna nátoky do jezové zdrže je v této variantě provedeno plochou, začínající v nátoky na TG1 ve vzdálenosti 14,25 m a v nátoky na TG2 4,5 m od profilu, ve kterém je umístěna konstrukce k převedení proudění s volnou hladinou na tlakové. Dno nátoky je na kótě 143,8 m n. m. a napojuje se na jezovou zdrž v úrovni kóty 145,3 m n. m. Hranice přímého dna nátoky a napojení je kolmá na osu nátoky.

Tato tvarová varianta je zobrazena na obrázku níže (Obrázek 49). Stěny nátoky jsou zobrazeny červeně a úsek napojení dna nátoky na jezovou zdrž zeleně.

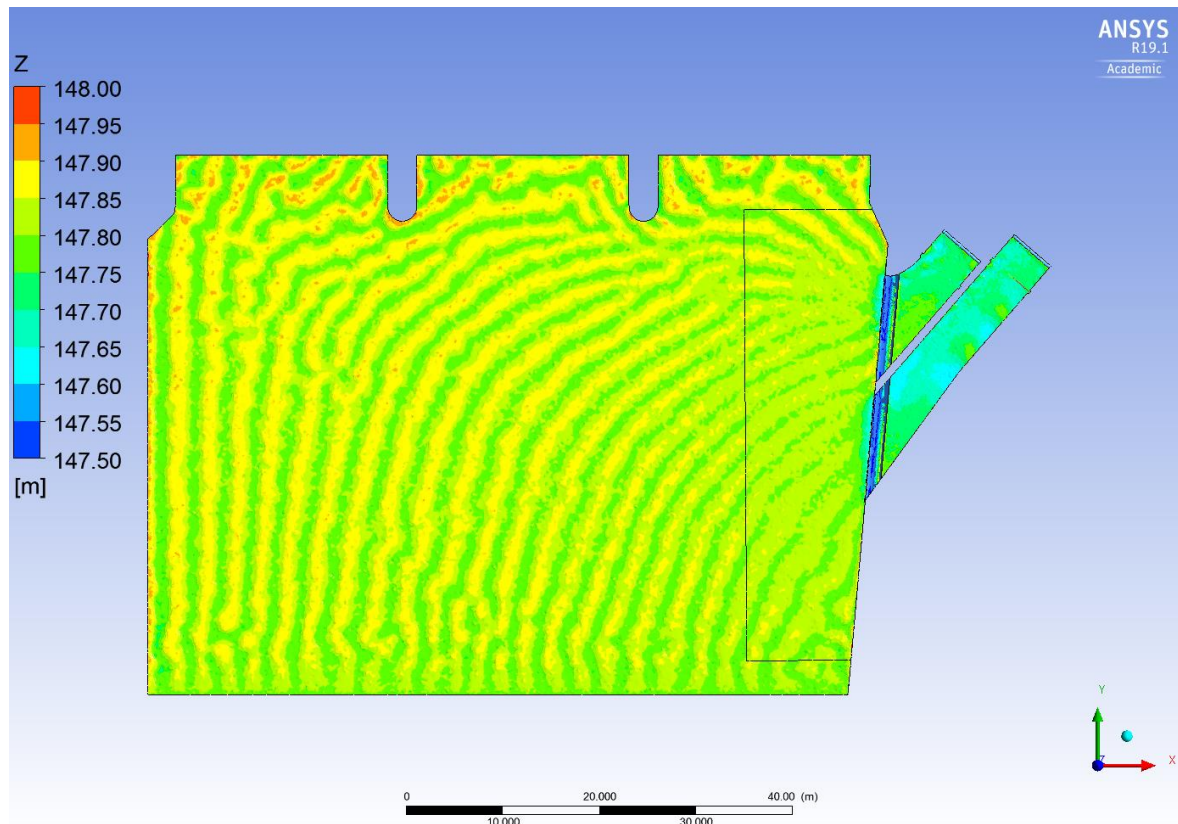


Obrázek 49 – Varianta A1 - tvarové řešení

Pro tuto variantu byl počítán jeden výpočetní stav, a to souběh obou soustrojí při návrhovém průtoku. Tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n,1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n,2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Celkový průtok elektrárnou tedy činí $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.1.1 Hladina

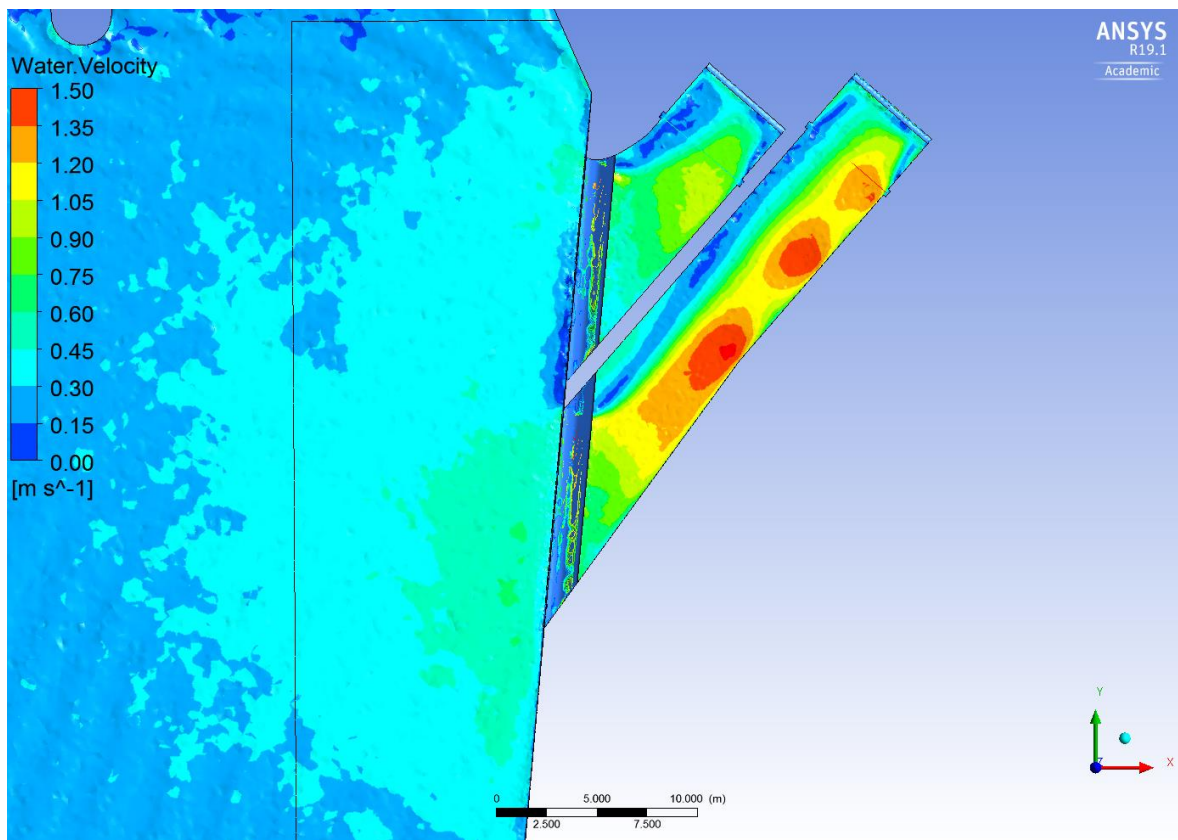
V rámci vizualizace výsledků simulace tvarové varianty A1 byla zobrazena hladina vody v modelu s barevně vyznačenými konturami nadmořské výšky (Obrázek 50). Díky tomu je možné pozorovat průběh výšky hladiny v jezové zdrži a v nátoku na MVE Terežín.



Obrázek 50 - A1 - Hladina - nadmořské výšky

Hladina vody se v jezové zdrži nachází přibližně na kótě 147,8 m n. m., což odpovídá výšce provozní hladiny při vztyčené klapce. Na obrázku výše (Obrázek 50) je možné pozorovat vlnění hladiny ve směru proudění vody a snížení hladiny v oblasti samotného nátoku na elektrárnu, které je způsobeno zvýšením průtočných rychlostí. Rozkolísání hladiny je způsobeno nedostatečnou konvergencí výpočtu. Výpočet byl zastaven z důvodu výpadku licenčního serveru. Vzhledem k výsledkům simulace tohoto modelu (viz. dále) již nebylo nutné v konvergenci pokračovat, neboť bylo zřejmé, že geometrie modelu bude muset být upravena.

Na následujícím obrázku (Obrázek 51) je zobrazena hladina vody v nátoku na MVE Terežín a jeho blízkém okolí s barevně vyznačenými konturami rychlostí.

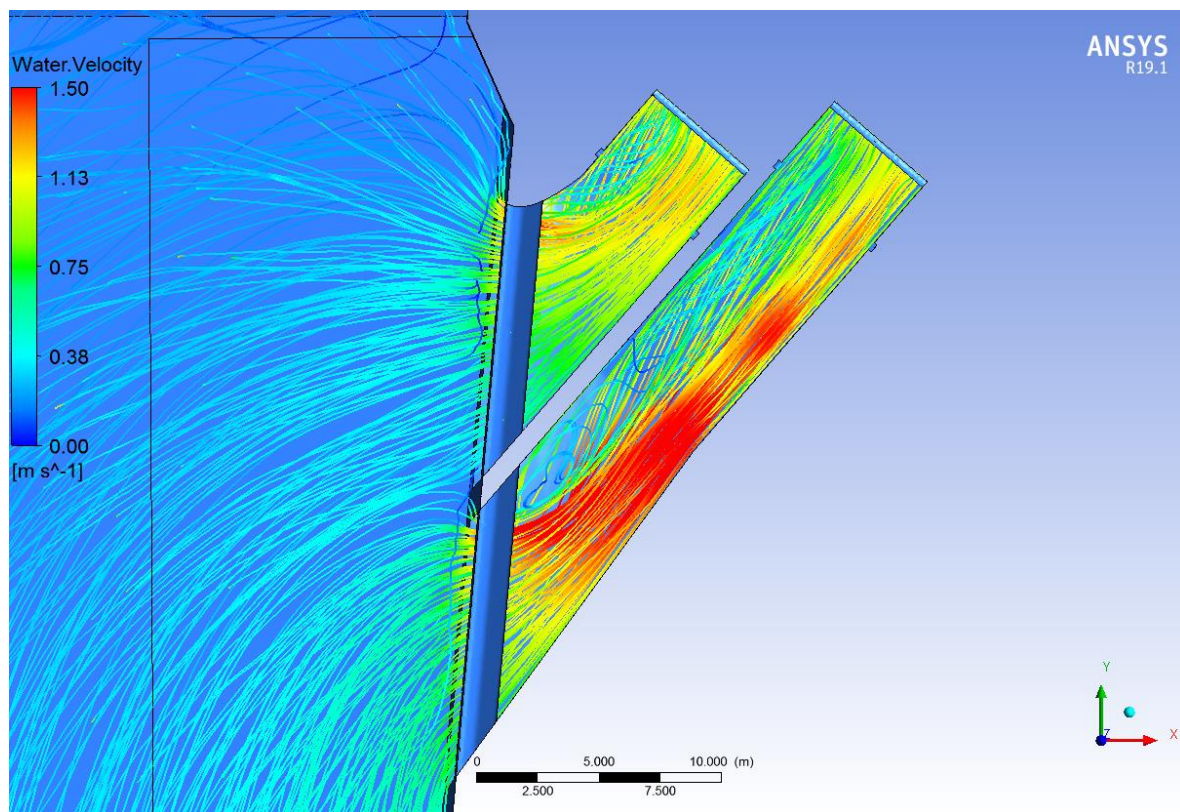


Obrázek 51 - A1 - Hladina – rychlosti

Na obrázku výše (Obrázek 51) je možné sledovat rozložení rychlostí na hladině vody v jezové zdrži a v nátoku na MVE Terežín. Je zřejmé, že více problematický je v tomto případě nátok pravý, tedy nátok na TG1, kde hladinové rychlosti dosahují hodnoty 1,5 m/s. Jsou zde také zřejmé úplavy na levých stěnách obou nátoků.

8.1.1.2 Proudnice

Pro lepší zobrazení rozložení rychlostí v nátoku byly sestrojeny 3D proudnice s barevně vyznačenou rychlostní škálou (Obrázek 52).

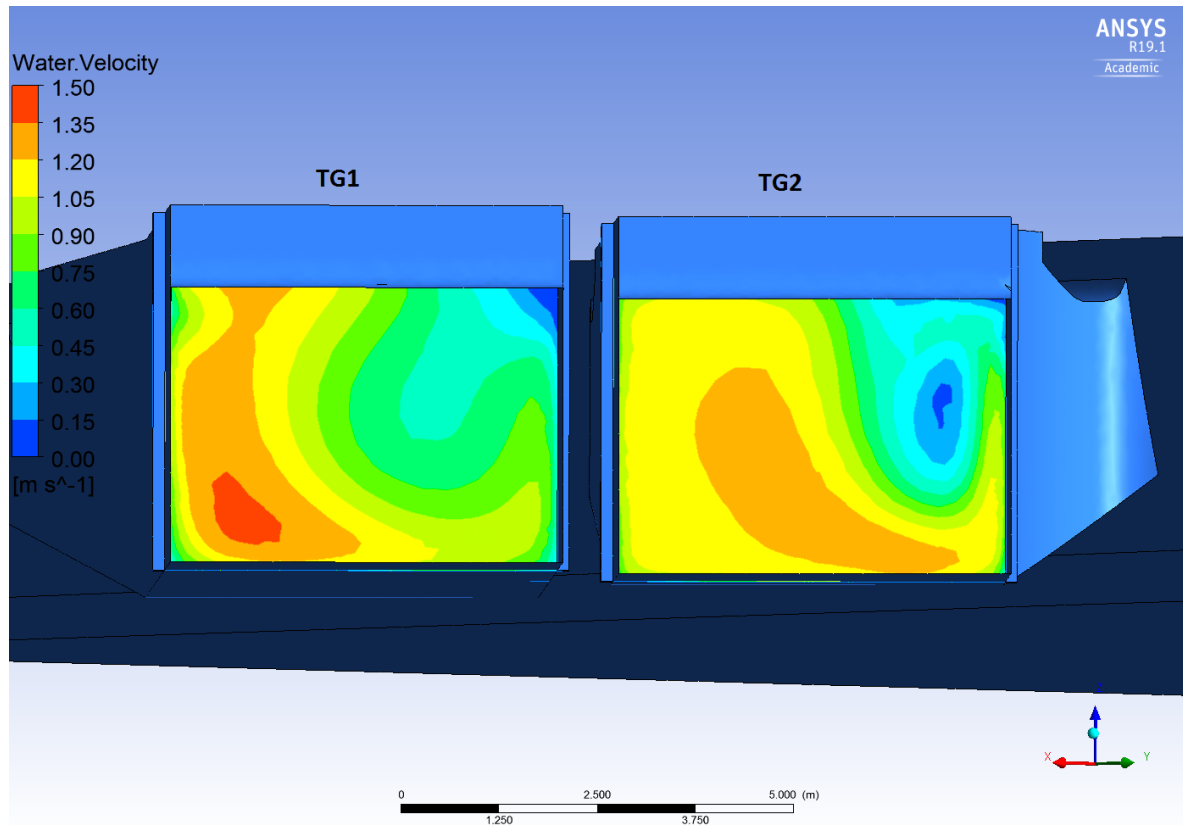


Obrázek 52 - Varianta A1 – proudnice

Na obrázku výše (Obrázek 52) můžeme lépe pozorovat úplav za vtokem do nátoku na TG1. Také se v tomto nátoku vyskytují vysoké rychlosti, ke kterým dochází kvůli malé průtočné ploše způsobené napojením úrovně dna v nátoku do jezové zdrže. Je tedy nutné upravit geometrii nátoku tak, aby se předešlo těmto vysokým rychlostem, které dosahují hodnoty 1,5 m/s a zároveň se zamezilo tvorbě úplavů.

8.1.1.3 Řezy

Pro lepší zobrazení rozložení rychlostí v profilu nátoku byly sestrojeny vyhodnocovací řezy v profilu stavidla obou nátoků, tedy 3,5 m od umístění konstrukce pro přechod proudění s volnou hladinou na proudění tlakové. V těchto řezech bylo barevně zobrazeno rozložení rychlostí. Na následujícím obrázku (Obrázek 53) je zobrazen pohled na tyto řezy proti směru toku vody.



Obrázek 53 - Varianta A1 - rychlosti v řezech

Na obrázku výše (Obrázek 53) je zřejmé nerovnoměrné rozložení rychlostí v nátokích na jednotlivá soustrojí. V pravé straně obou nátoků (po vodě levé) je možné pozorovat pomalejší proudění, než na druhém okraji nátoků. Tento problém bude řešen změnou geometrie.

8.1.1.4 Ztráta

Pro usnadnění porovnání jednotlivých variant byla vypočtena energetická ztráta způsobená nátokem. Ztráta byla vypočtena pomocí rozdílu energetické výšky v jezové zdrži a na konci nátoku na elektrárnu.

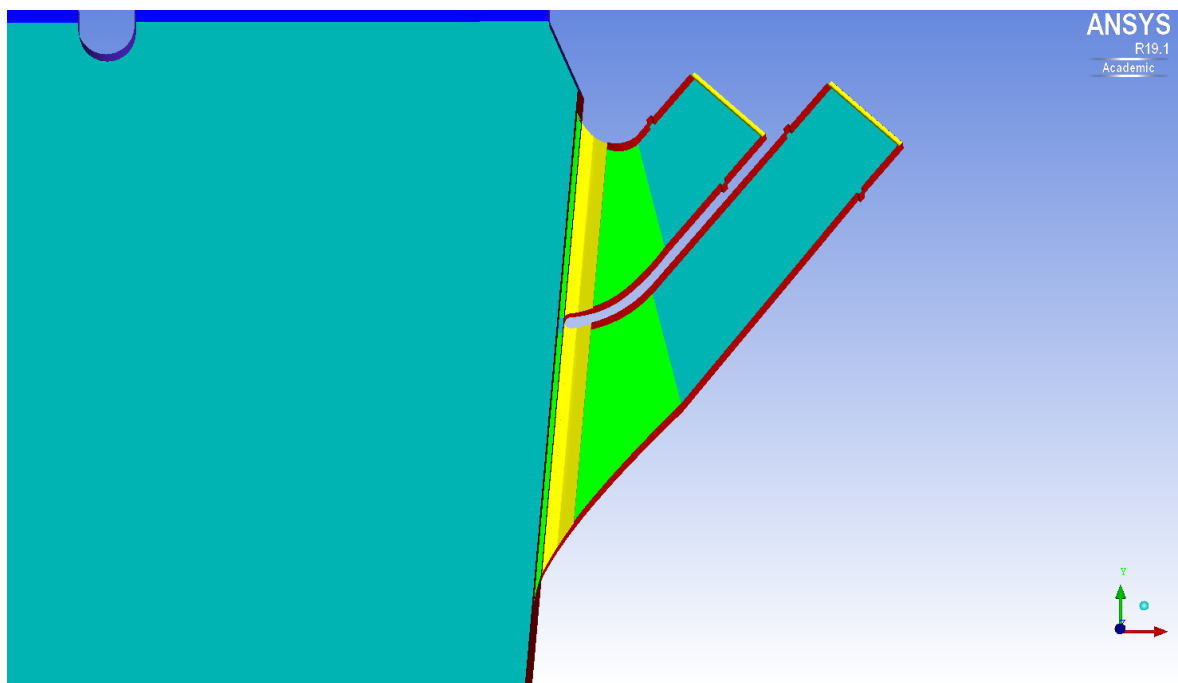
Výsledná energetická ztráta nátoku na soustrojí TG1 je $Z_1 = 0,056$ m a TG2 $Z_2 = 0,047$ m.

8.1.2 Varianta A2

Pro vyřešení problémů, vyskytujících se ve variantě A1 bylo nutné změnit geometrii. Varianta A2 se od předchozí varianty liší zakřivením stěn nátoků a navázáním dna nátoků do jezové zdrže.

Stěny nátoků byly zaobleny tak, aby jejich tvar lépe odpovídal proudnicím u vtoku a umožnil tak lepší natékání vody na elektrárnu. Tímto by se měly eliminovat úplavy vzniklé za okrajem nátoků. Dále bylo upraveno dno tak, aby byly zajištěny větší průtočné plochy a snížily se tak rychlosti v nátoku na obě soustrojí. Hranice rovného dna a šikmého napojení byla posunuta směrem k jezové zdrži a není kolmá na osu nátoků. Tím dojde k prudšímu klesání této plochy a ke zvětšení průtočných ploch v nátoku.

Nový tvar nátoků, využitý ve variantě A2, je zobrazen na obrázku níže (Obrázek 54). Červeně jsou zobrazeny stěny nátoků a zeleně napojení dna nátoků na jezovou zdrž.

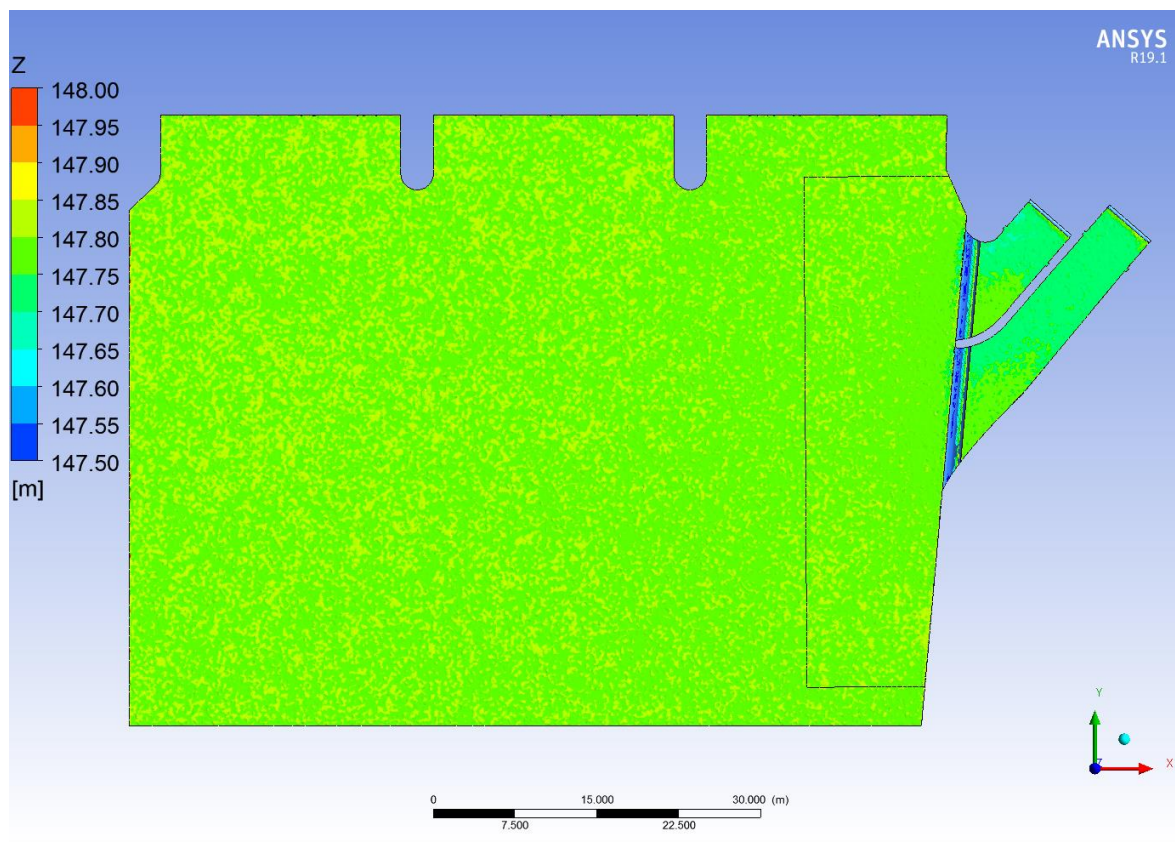


Obrázek 54 - Varianta A2 – tvarové řešení

Pro tuto variantu byl taktéž počítán jeden výpočetní stav při návrhovém průtoku elektrárnou, tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n,1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n,2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Celkový průtok elektrárnou tedy opět činí $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.2.1 Hladina

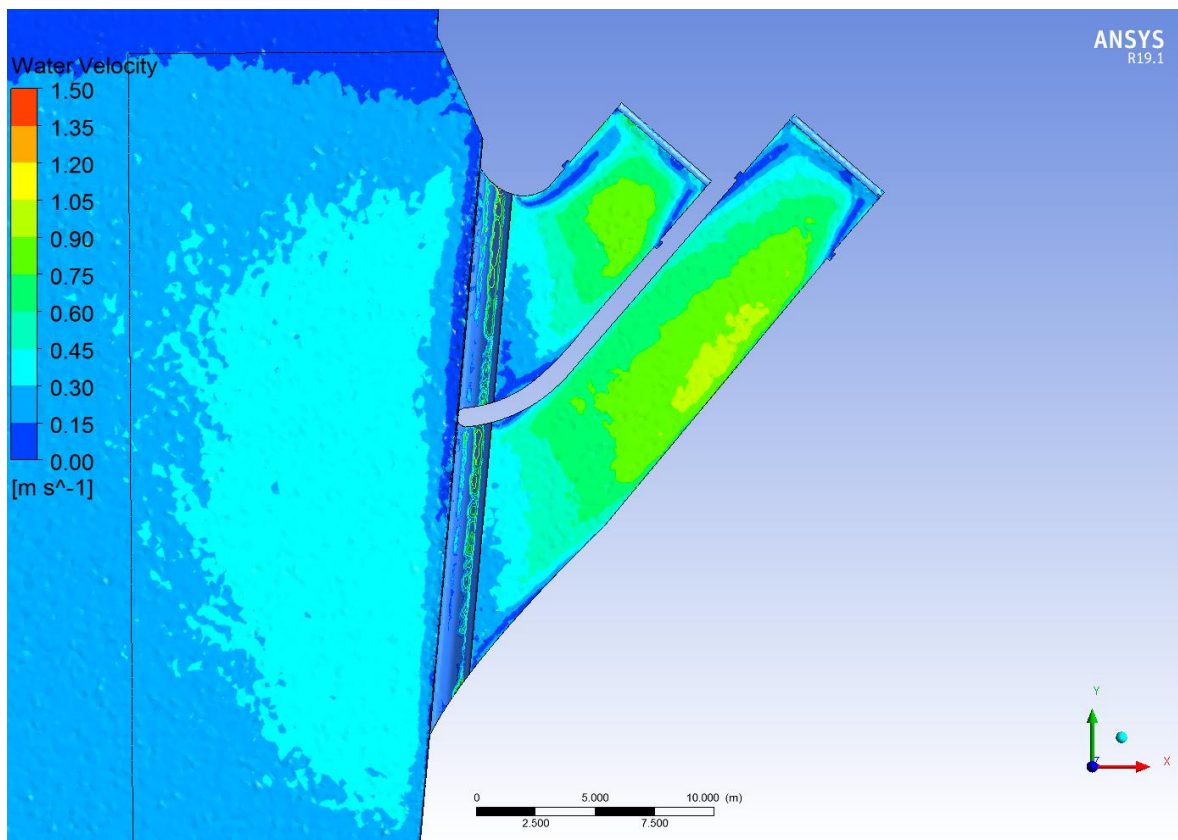
Stejně jako u předchozí varianty byla v rámci vizualizace výsledků zobrazena hladina s konturami nadmořských výšek (Obrázek 55).



Obrázek 55 - Varianta A2 – Hladina – nadmořské výšky

Na obrázku výše (Obrázek 55) můžeme pozorovat vymizení rozkolísání hladiny a jejího vlnění. Výpočet této varianty proběhl bez přerušení a jeho konvergence proběhla v pořádku. Výška hladiny je na kótě 147,8 m n. m., což odpovídá skutečné provozní hladině v jezové zdrži. Opět je zde možné vidět mírné snížení hladiny v nátoce, způsobené zvýšením průtočné rychlosti.

Opět byly zobrazeny také rychlosti na hladině v nátoku na elektrárnu a jeho okolí (Obrázek 56).

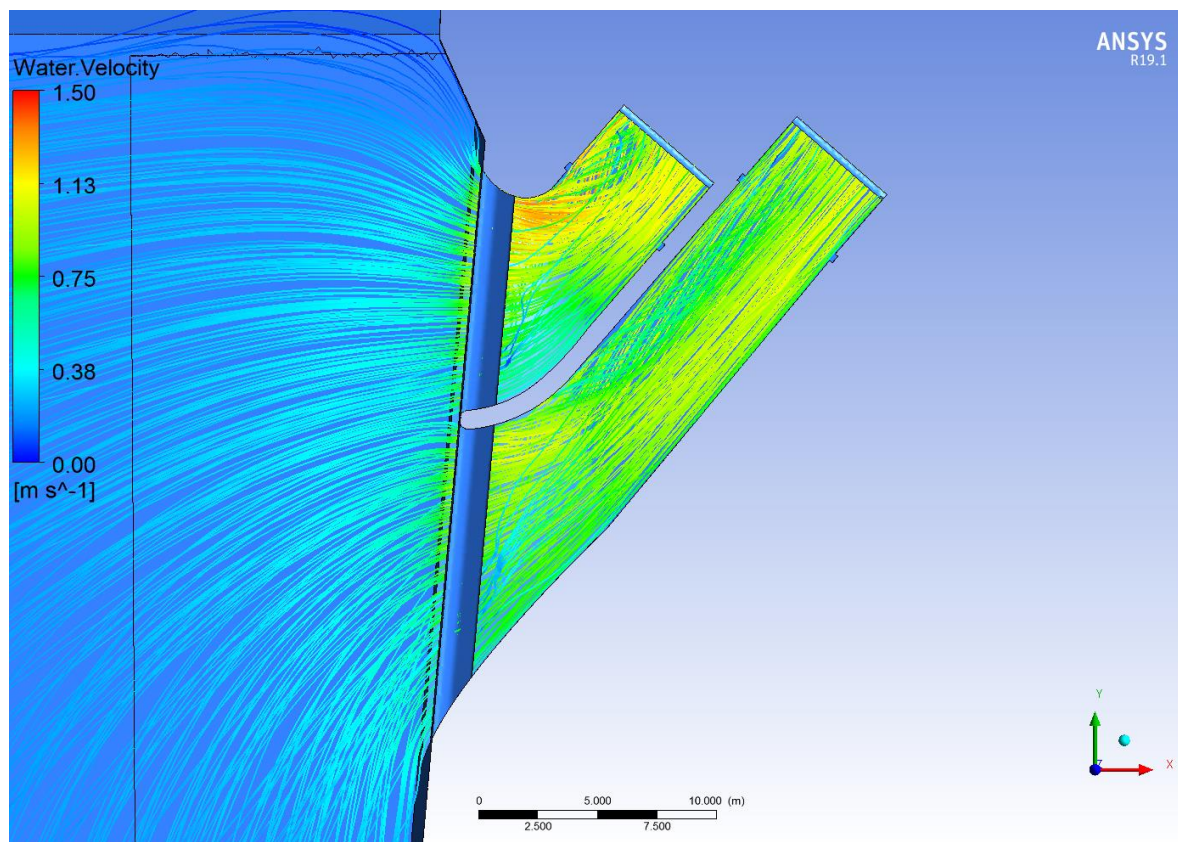


Obrázek 56 - Varianta A2 – Hladina - rychlosti

Na obrázku výše (Obrázek 56) vidíme, že se rychlosti vlivem změny geometrie oproti předchozí variantě značně snížily a dosahují hodnot maximálně 1,2 m/s. Změna geometrie tedy pozitivně přispěla průtočným podmínkám v nátoku.

8.1.2.2 Proudnice

Pro lepší zobrazení proudění vody v nátoku byly opět sestrojeny prostorové proudnice v modelu nátokové části MVE Terežín (Obrázek 57).

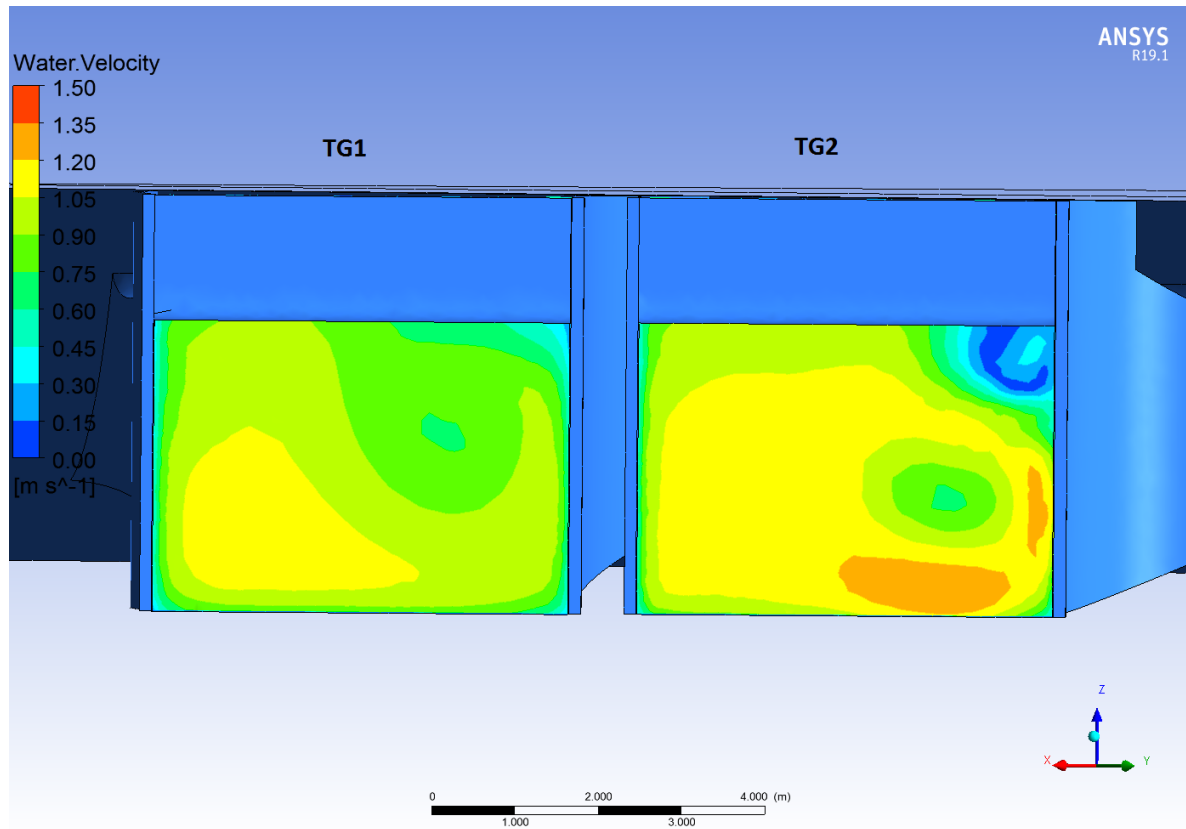


Obrázek 57 - Varianta A2 – proudnice

Z obrázku výše (Obrázek 57) je zřejmé, že změna geometrie nátoku přispěla k eliminaci úplavů za vtokem a ke snížení průtočných rychlostí. Dochází zde však k mírným turbulencím a křížení proudnic. Bylo by tedy vhodné do této tvarové varianty připojit usměrňovací křídla, jež by tyto turbulence eliminovaly.

8.1.2.3 Řezy

Dále bylo zobrazeno rychlostní pole ve vyhodnocovacích řezech, jež jsou totožné s variantou nátoku A1 ,viz.8.1.1.3 Řezy, str. 66 (Obrázek 58).



Obrázek 58 - Varianta A2 – rychlosti v řezech

Na obrázku výše (Obrázek 58) je patrné snížení průtočných rychlostí v nátoku na TG1. Rychlosti již nedosahují hodnot 1,5 m/s. Rychlostní pole tohoto nátoku je také značně zhomogenizováno. Rozptyl rychlostí je 0,5 - 1,2 m/s. V nátoku na TG2 stále vzniká menší úplav, avšak další rozšíření tohoto nátoku směrem k pravému jezovému poli není možné, protože by již konstrukce nátoku zasahovala do břehového pilíře jezu. Tento úplav byl však oproti variantě A1 značně eliminován. Můžeme tedy tuto tvarovou variantu stěn a dna nátoku považovat za vhodnou.

8.1.2.4 Ztráta

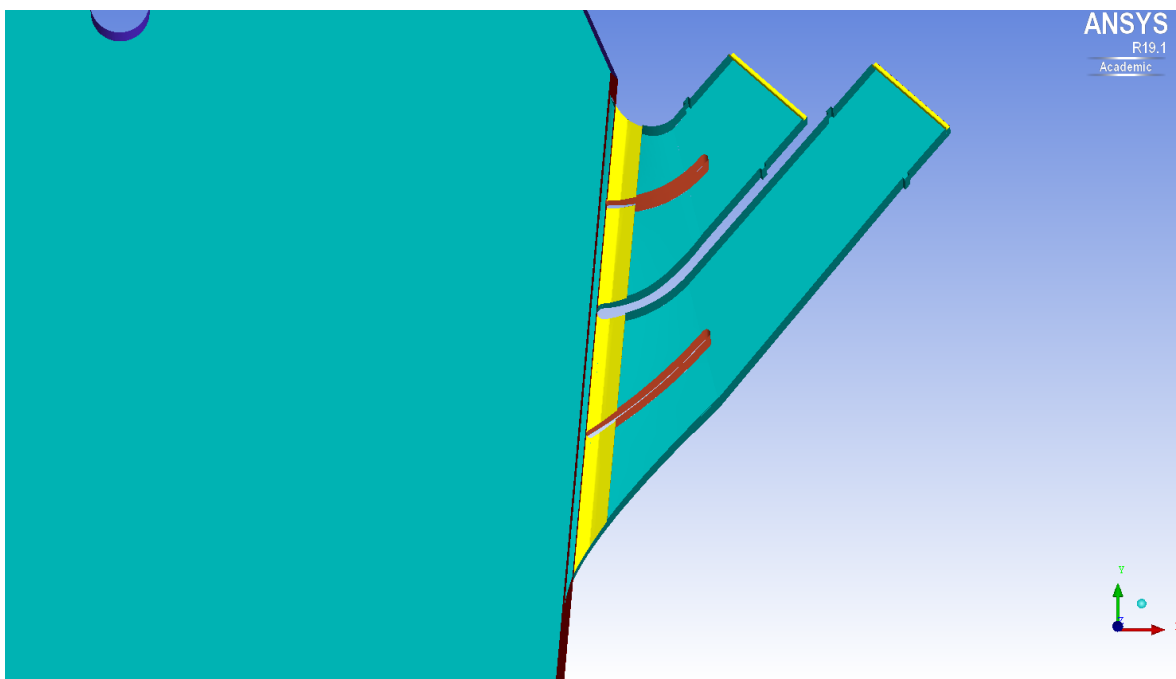
Opět byla u této tvarové varianty nátoku vypočtena energetická ztráta. Byla vypočtena stejnou metodou jako u varianty A1.

Ztráta při využití varianty nátoku A2 činí pro nátok na TG1 $Z_1 = 0,033$ m a pro nátok na TG2 $Z_2 = 0,043$ m.

8.1.3 Varianta A3

Tvarové řešení varianty A3 vychází z předchozí varianty. Geometrie nátoky je stejná, pouze byla přidána usměrňovací křídla do obou nátoků. Tvar křídel vychází z tvaru proudnic ze simulace varianty A2. Umístění usměrňovacích křídel je provedeno se snahou vyrovnat průtok na obou stranách těchto křídel. Usměrňovací křídla budou zároveň sloužit k podpoře průvlaku, na kterém je umístěna opěrná stěna. Díky tomu se zmenší šířka průvlaku mezi podporami.

Na následujícím obrázku (Obrázek 59) je znázorněno tvarové řešení varianty A3 s červeně zvýrazněnými usměrňovacími křídly.



Obrázek 59 - Varianta A3 - tvarové řešení

Pro tuto variantu byly počítány tři výpočetní stavy. První výpočetní stav – VS1 - při návrhovém průtoku oběma soustrojími, tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n;1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Druhý výpočetní stav – VS2 - při odstávce TG1, tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n;1} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. A třetí výpočetní stav – VS3 - při odstávce TG2, tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n;1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n;2} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$.

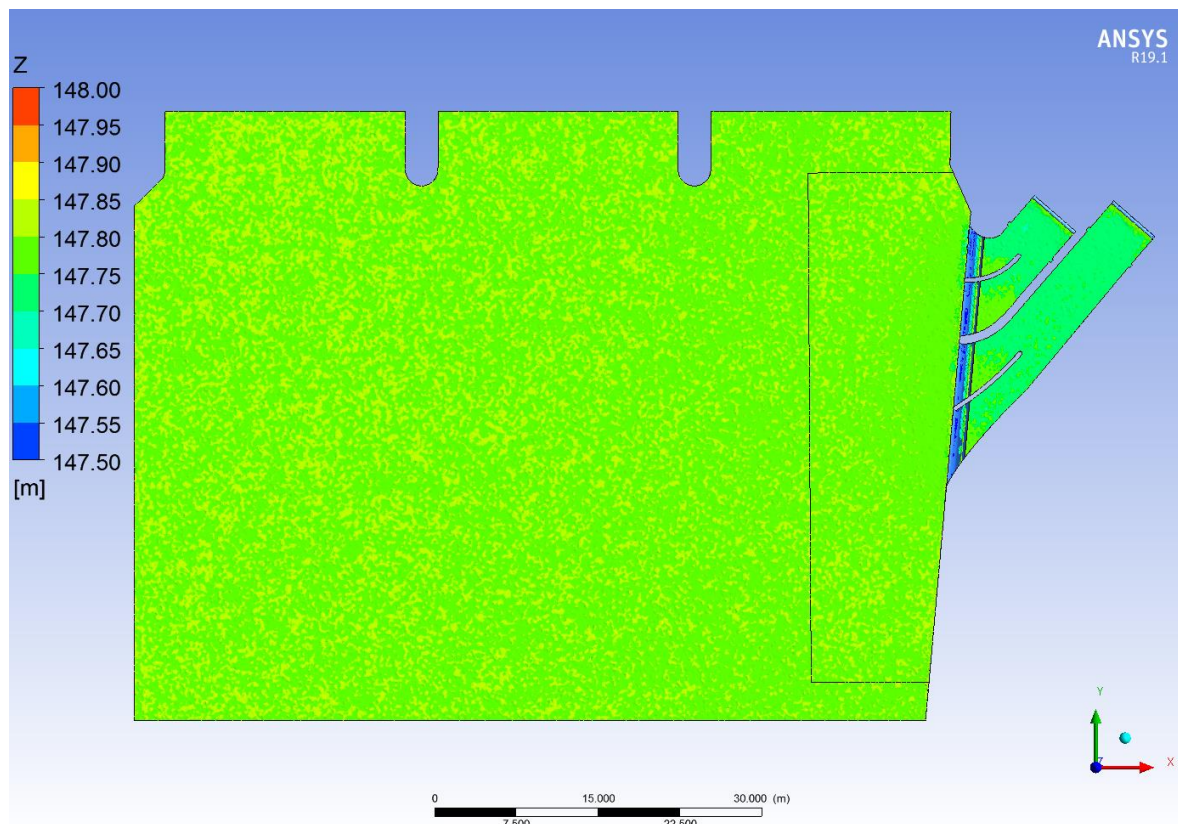
Okrajová podmínka vtoky na soustrojí, které má v daném výpočetním stavu nulovou hodnotu průtoku je simulováno podmínkou „Wall – Rough wall“.

8.1.3.1 Výpočetní stav VS1

Nejprve byl vyhodnocen první výpočetní stav (VS1), který je totožný s výpočetním stavem v předchozích simulacích. Jedná se o stav, kdy jsou v souběhu obě soustrojí a oběma protéká návrhový průtok $Q_{n;1/2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.3.1.1 Hladina – VS1

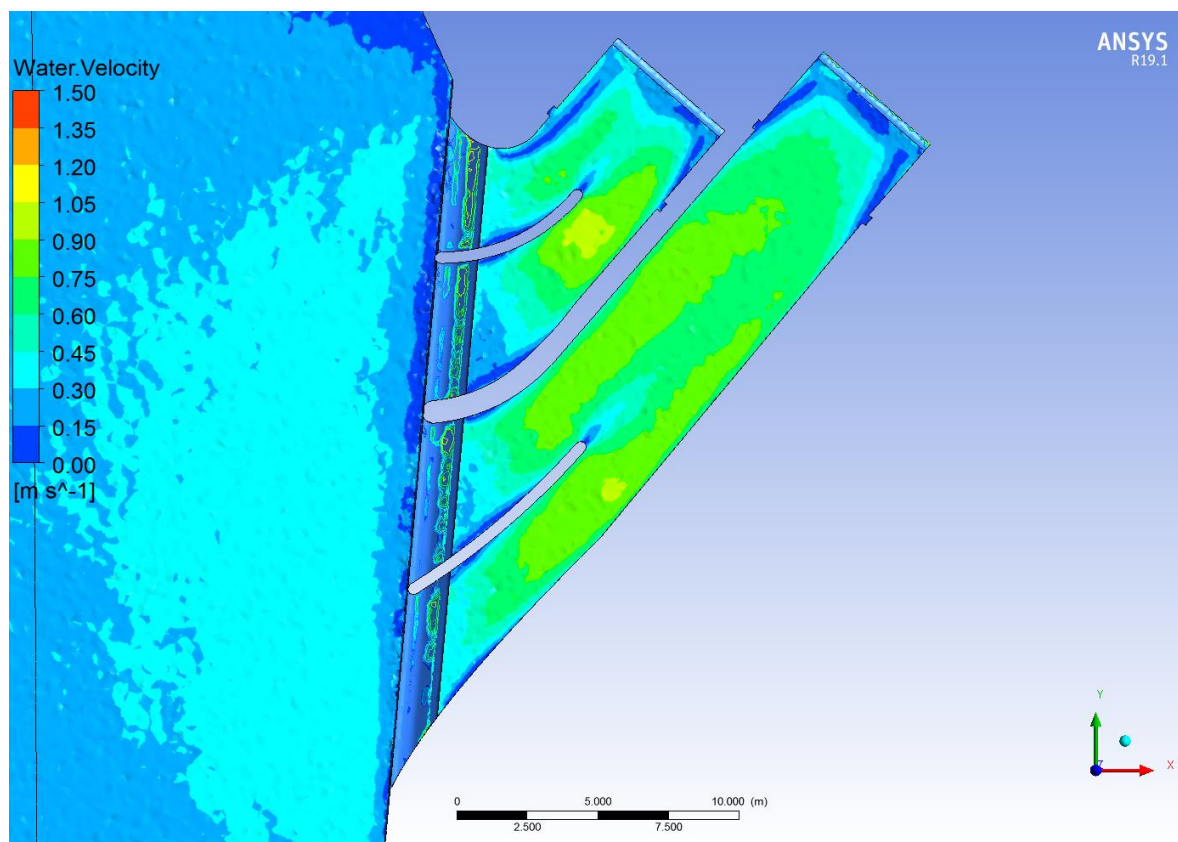
Vykreslení hladiny s konturami nadmořských výšek při výpočetním stavu VS1 je zobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 60).



Obrázek 60 - Varianta A3 - Hladina - nadmořské výšky

Z obrázku výše (Obrázek 60) je zřejmé, že se nadmořské výšky hladiny oproti přechodí variantě nezměnily. Stále je hladina v jezové zdrži ustálena ve výšce 147,8 m n. m., což odpovídá skutečné provozní hladině.

Na následujícím obrázku (Obrázek 61) jsou opět zobrazeny rychlosti na hladině v nátoku na MVE Terežín při výpočetním stavu VS1.

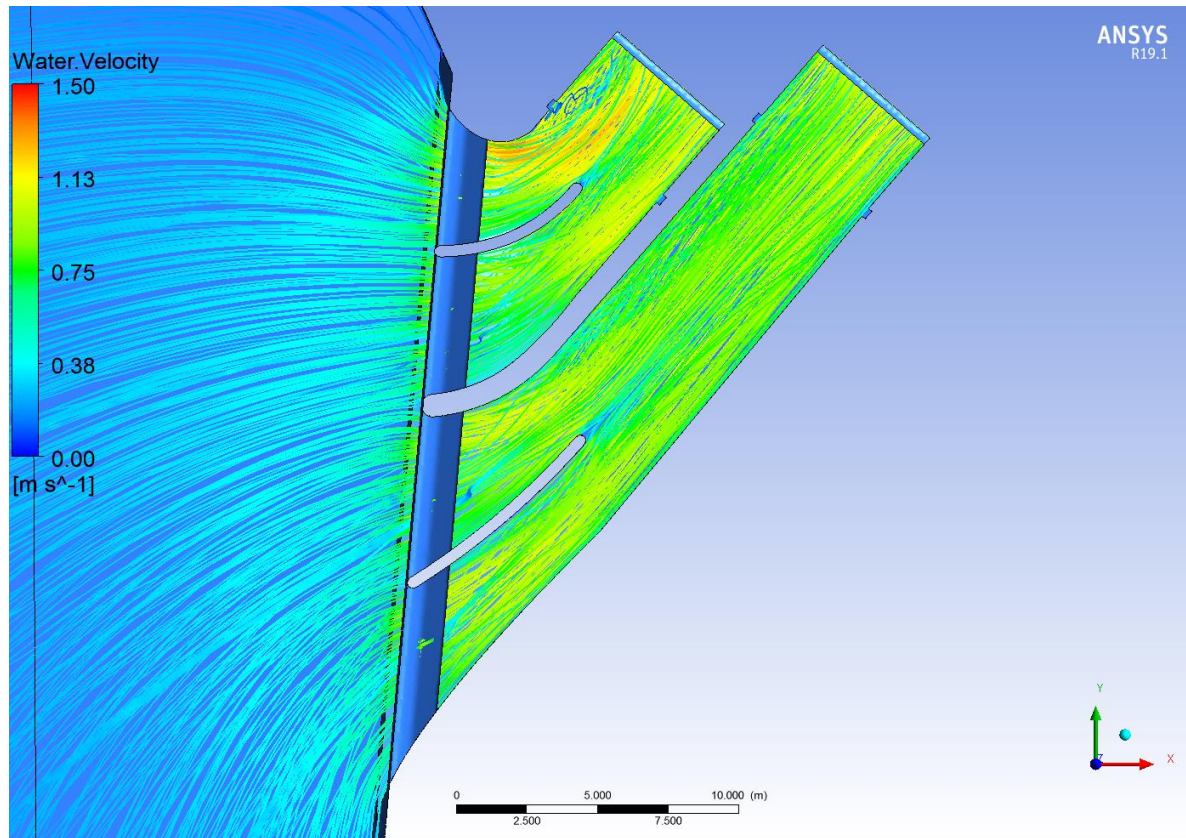


Obrázek 61 - Varianta A3 - Hladina – rychlosti

Rychlosti na hladině se dle obrázku výše (Obrázek 61) taktěž oproti předchozí tvarové variantě nezměnily.

8.1.3.1.2 Proudnice – VS1

Změna tvaru nátoku, respektive přidání usměrňovacích křídel se projeví až na vizualizaci proudnic v nátoku na elektrárnu. Díky nim je možné posoudit, zda jsou tato křídla vhodně umístěna a plní svůj účel zamezení turbulencí. Tato vizualizace je pro výpočetní stav VS1 zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 62).

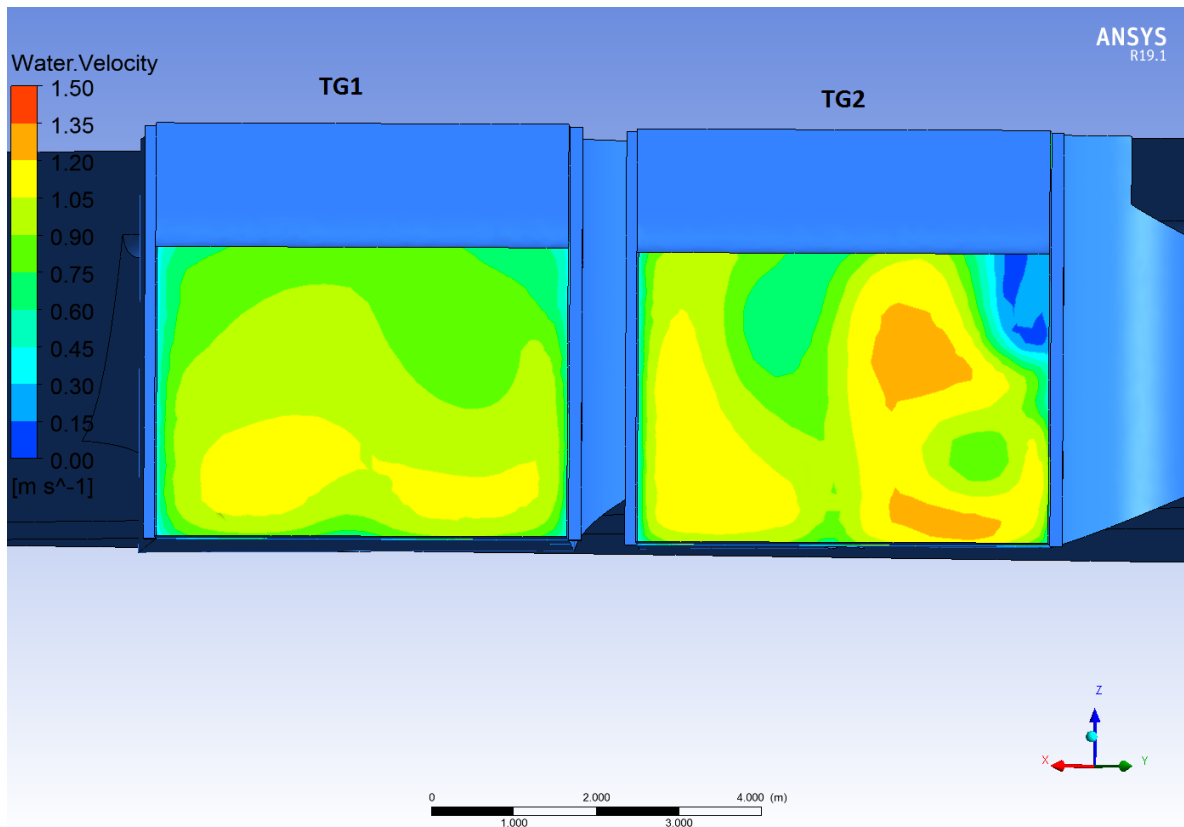


Obrázek 62 - Varianta A3 – proudnice

Na obrázku výše (Obrázek 62) můžeme pozorovat skutečnost, že byly turbulence v nátoku na elektrárnu značně eliminovány. U nátoku na TG2 se však stále objevuje drobný úplav. Jeho úplné eliminace by bylo možné dosáhnout změnou směru osy nátoku tak, aby vedla více kolmo k nábrežní stěně. Tím by se však celá stavební část MVE Terežín posunula více do břehu a stavební náklady a prostor záboru by se tím razantně zvýšily.

8.1.3.1.3 Řezy – VS1

Na následujícím obrázku (Obrázek 63) je graficky znázorněno rychlostní pole při výpočetním stavu VS1 ve vyhodnocovacích řezech stejných, jako u předchozích variant.



Obrázek 63 - Varianta A3 – rychlosti v řezech

Rychlostní pole v řezech, viz. obrázek výše (Obrázek 63), se oproti předchozí variantě příliš nezměnily. Došlo spíše k přesunu maximálních hodnot, nikoli k jejich nárůstu. Maximální hodnoty rychlosti tedy při tomto tvarovém řešení nátoku nepřesahují 1,5 m/s a nebudou mít negativní vliv na vtokové podmínky na jednotlivá soustrojí.

8.1.3.1.4 Ztráta – VS1

Stejně jako pro předchozí simulace, byla i pro variantu A3, výpočetní stav VS1, vypočtena ztráta nátokem na MVE Terežín.

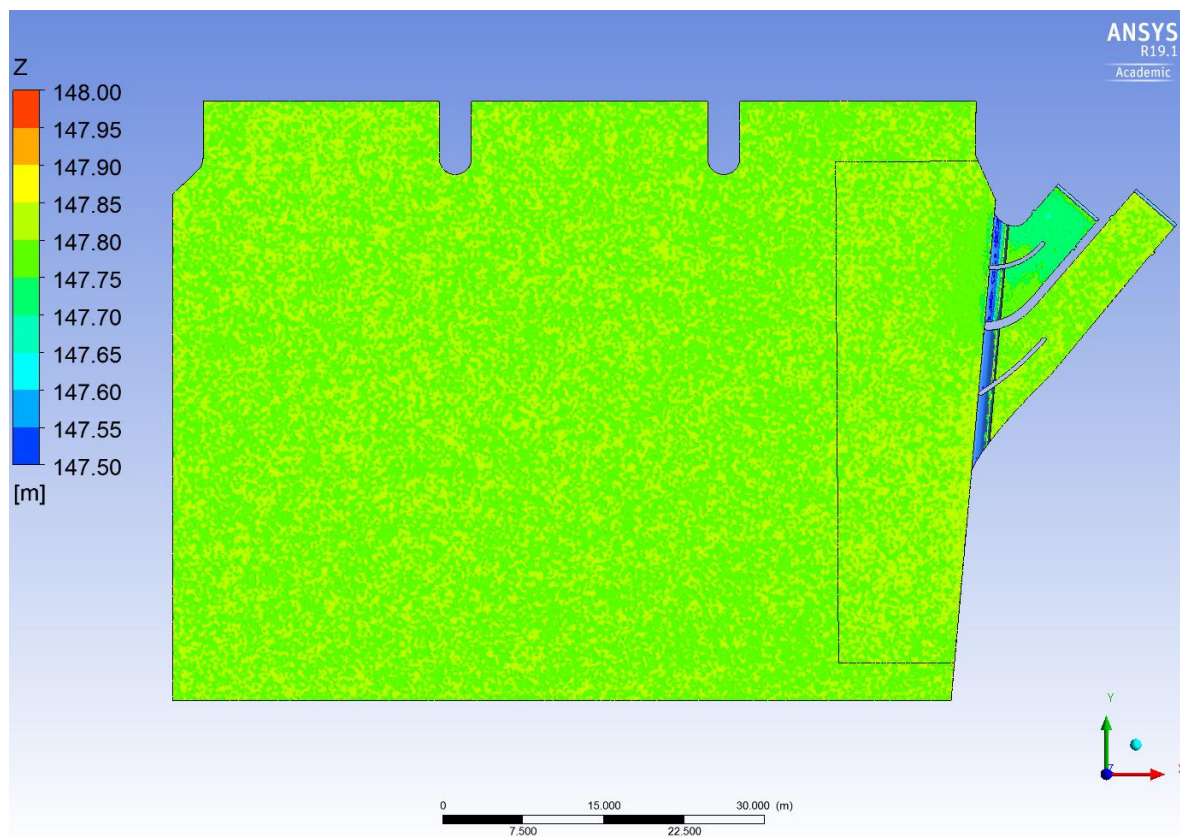
Výsledná ztráta pro tuto variantu geometrie a daný výpočetní stav činí $Z1 = 0,033$ m pro nátok na TG1 a $Z2 = 0,040$ m pro nátok na TG2.

8.1.3.2 Výpočetní stav VS2

Následně byl počítán výpočetní stav VS2, kdy je v provozu pouze soustrojí TG2. Průtok soustrojím TG1 je tedy $Q_{n,1} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ a soustrojím TG2 je $Q_{n,2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.3.2.1 Hladina – VS2

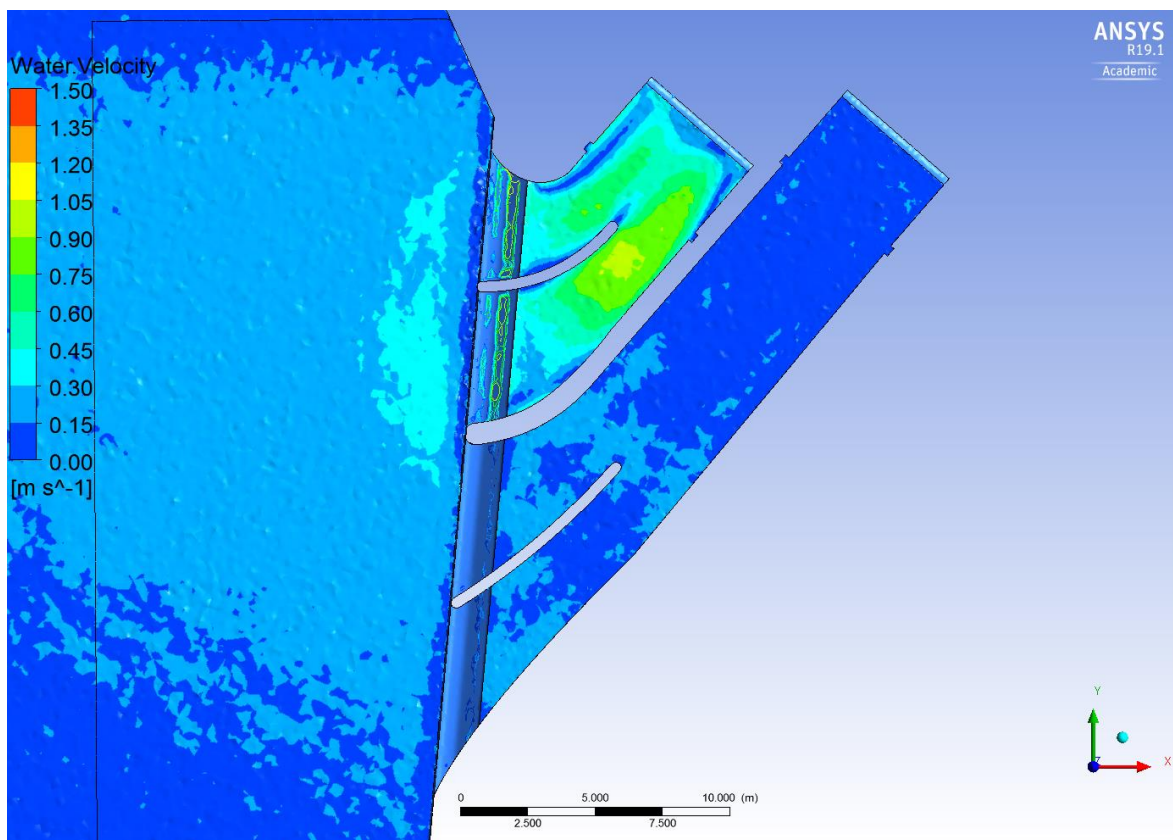
Také pro tento výpočetní stav byla vykreslena hladina s konturou nadmořských výšek (Obrázek 64).



Obrázek 64 - Varianta A3 - VS2 - Hladina - nadmořské výšky

Z obrázku výše (Obrázek 64) je zřejmé, že hladina v jezové zdrži a v nátoce na soustrojí TG1 je ve stejné výšce, a to 147,8 m n. m., což odpovídá provozní hladině. V nátoce na soustrojí TG2 je mírné snížení hladiny způsobené větší rychlostí proudu v tomto místě.

Na hladině byly pro výpočetní stav VS2 opět vykresleny kontury rychlostí (Obrázek 65).

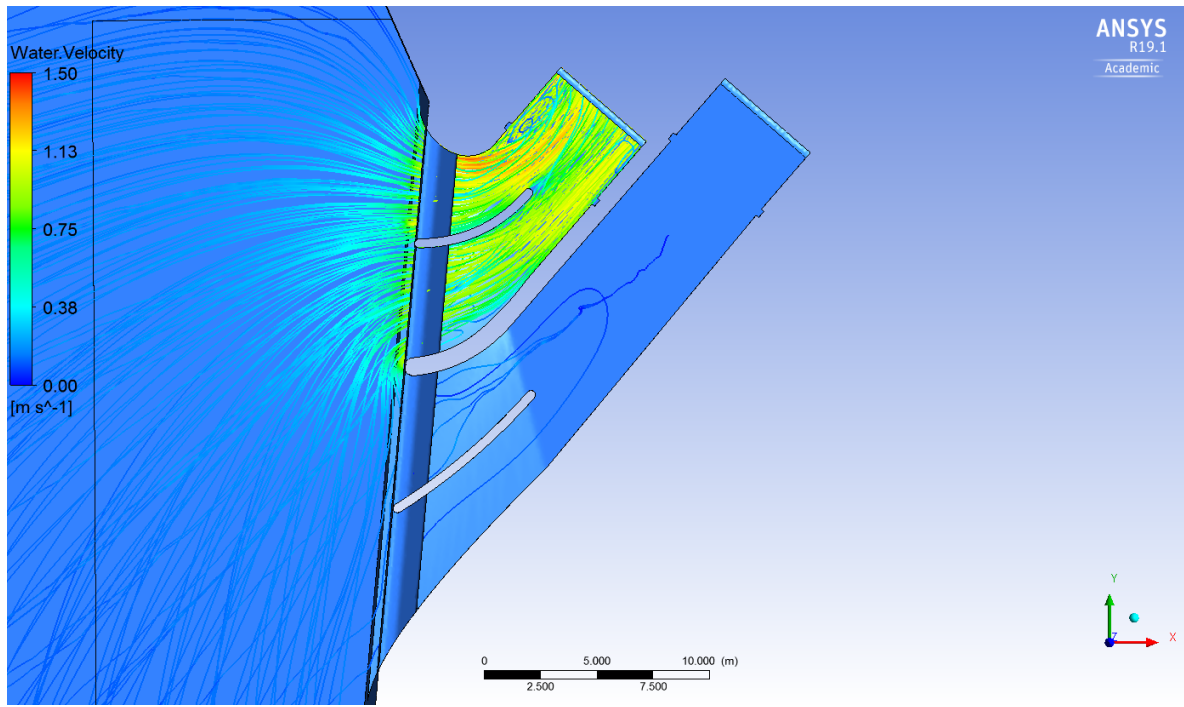


Obrázek 65 - Varianta B3 - VS2 - Hladina – rychlosti

Rychlosti na hladině v nátoku na soustrojí TG2 dle obrázku výše (Obrázek 65) nepřesahují hodnotu 1,2 m/s. V nátoku na soustrojí TG1 se hodnoty rychlostí na hladině blíží 0 m/s, což bylo možné při nulovém průtoku tímto soustrojím předpokládat.

8.1.3.2.2 Proudnice – VS2

Také pro výpočetní stav VS2 byly v rámci vizualizace vykresleny prostorové proudnice (Obrázek 66).

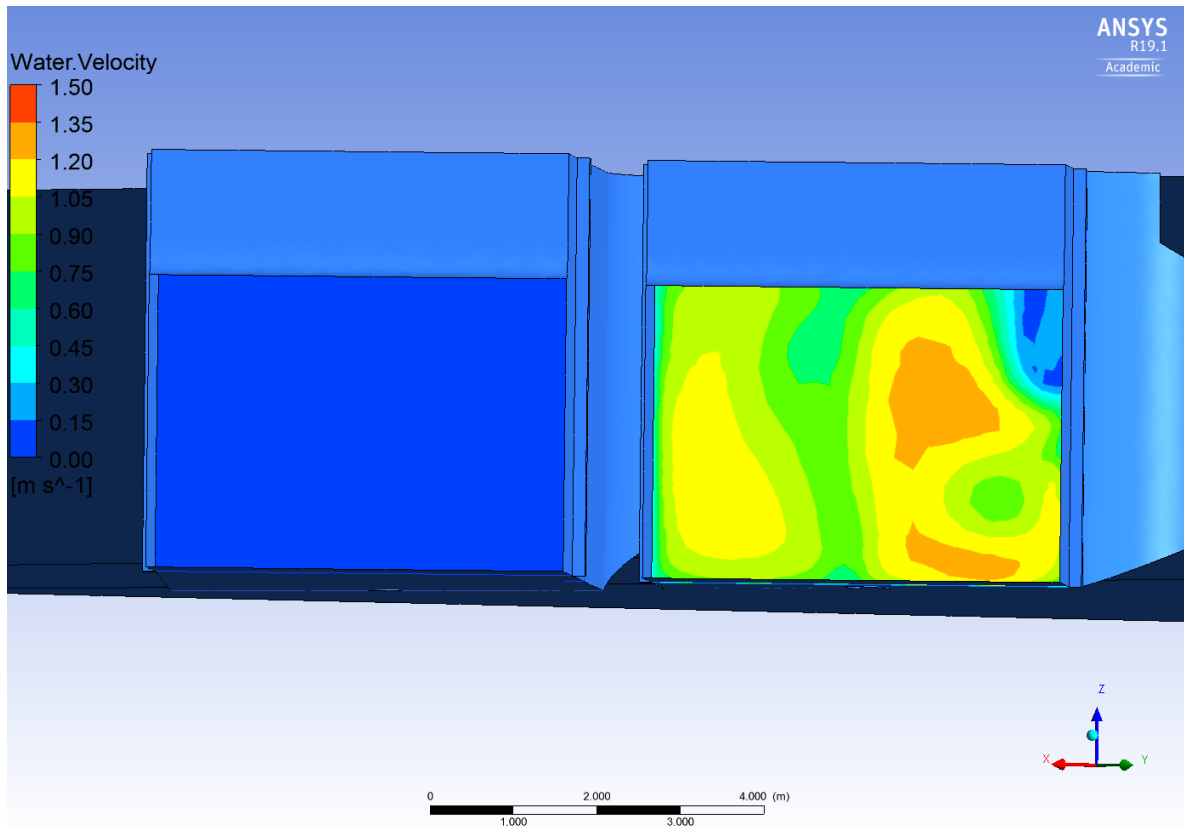


Obrázek 66 - Varianta A3 - VS2 – proudnice

Na obrázku výše (Obrázek 66) můžeme opět pozorovat drobný úplav v nátoku na TG2. Dále je zde zřejmý nevyužitý prostor u levé stěny tohoto nátoku v místě za průvlakem podpírajícím opěrnou stěnu. To je způsobeno tím, že voda z předpolí nátoku na TG1 při výpočetním stavu VS1, tedy při souběhu obou soustrojí, nyní natéká do nátoku na TG2. Při tom je nucena prudce zatočit do směru nátoku a tím vzniká v tomto místě úplav. Vliv tohoto úplavu je však zanedbatelný.

8.1.3.2.3 Řezy – VS2

Opět byly sestrojeny totožné vyhodnocovací řezy nátokem na MVE Terežín, na kterých byla vykreslena kontura rychlostí (Obrázek 67).



Obrázek 67 - Varianta A3 - VS2 - rychlosti v řezech

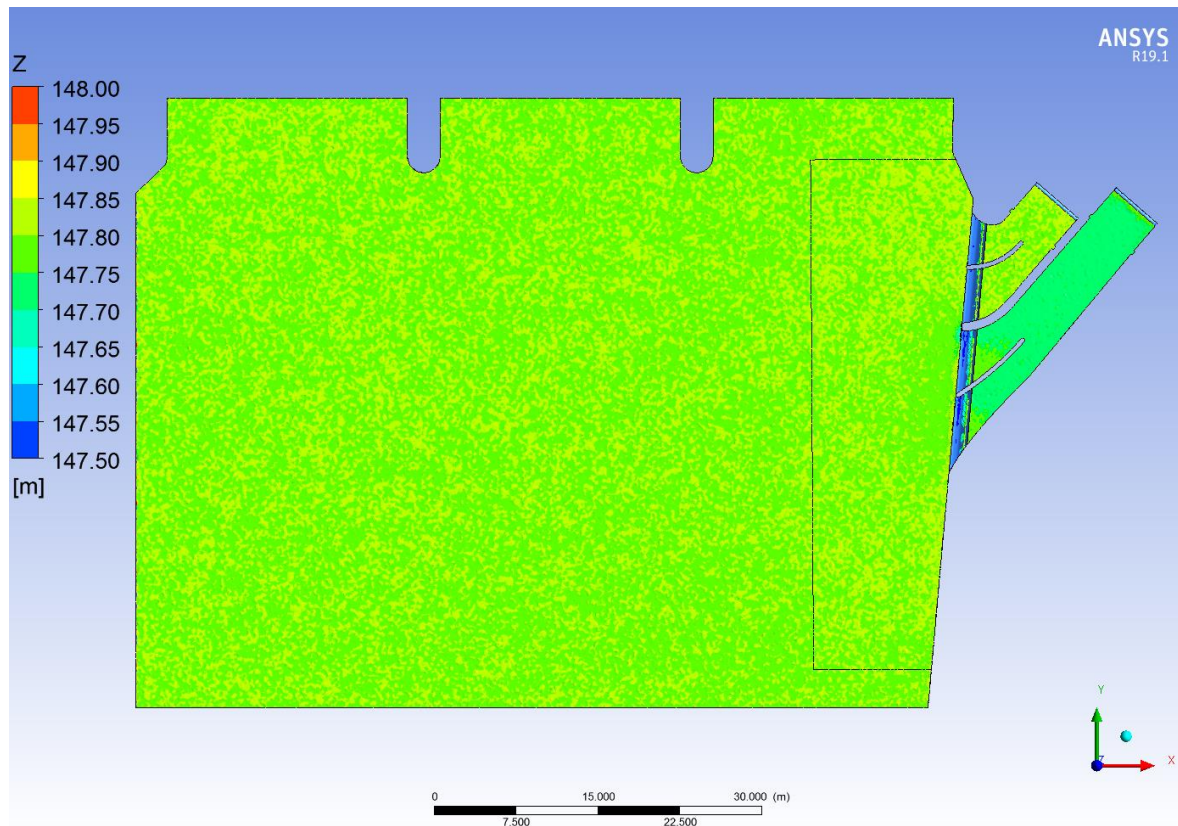
Vykreslení rychlostí v příčném řezu TG2 (Obrázek 67) zobrazuje skutečnost, že rychlosti zde nedosahují hodnot vyšších než 1,35 m/s. V pravém horním rohu z tohoto pohledu je na obrázku viditelný výše zmiňovaný úplav. Rychlost vody v řezu nátokem na TG1 je nulová.

8.1.3.3 Výpočetní stav VS3

Stejně vyhodnocení, jako u přechozího výpočetního stavu bylo provedeno také pro výpočetní stav VS3, kdy je v provozu pouze soustrojí TG1, kterým protéká průtok $Q_{n,1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Soustrojí TG2 je odstaveno a průtok tímto soustrojím je tedy nulový.

8.1.3.3.1 Hladina – VS3

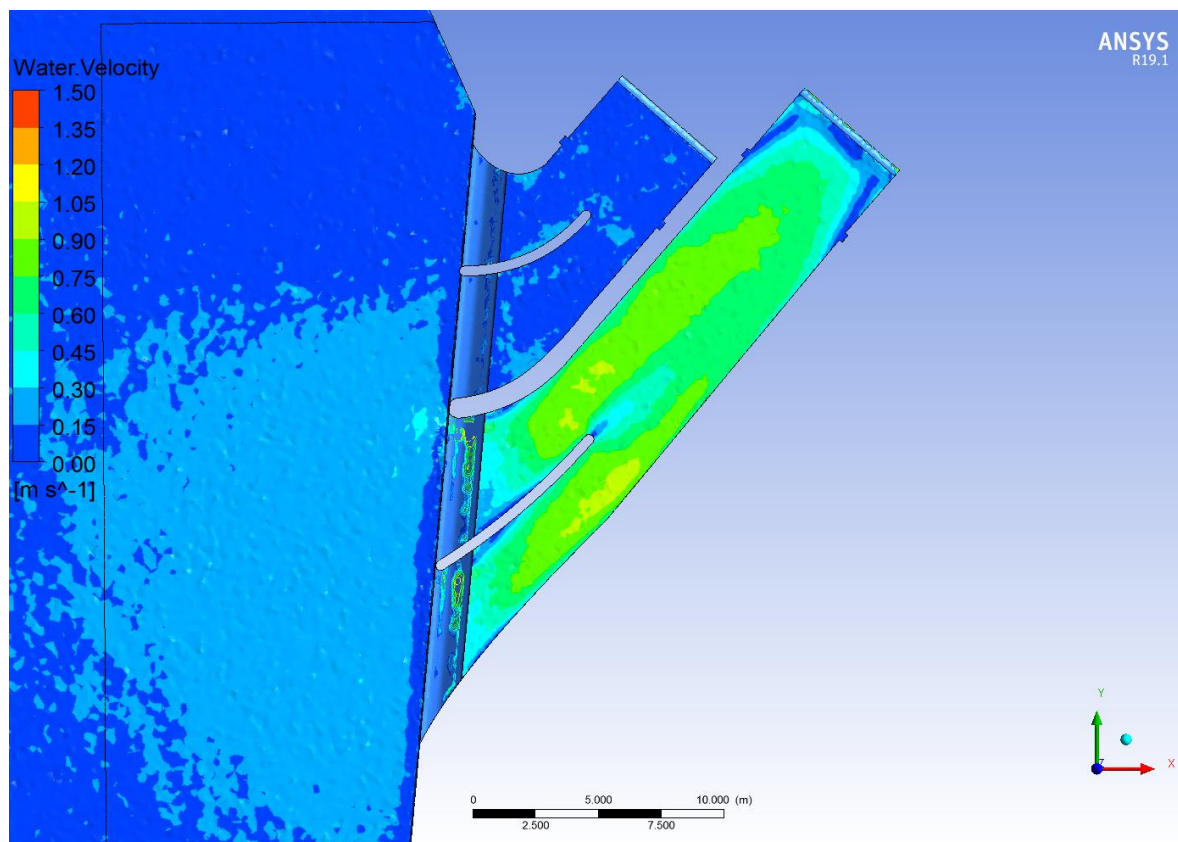
Na následujícím obrázku (Obrázek 68) je pro výpočetní stav VS3 vykreslena kontura nadmořských výšek na hladině vody.



Obrázek 68 - Varianta A3 - VS3 - Hladina - nadmořské výšky

Hladina na obrázku výše (Obrázek 68) je v jezové zdrži a nátoku na TG1 opět v úrovni 147,8 m n. m., tedy na kótě provozní hladiny. Pouze v nátoku na TG1 je hladina opět mírně snížena.

Také pro tento výpočetní stav byly zobrazeny kontury rychlostí na hladině (Obrázek 69).

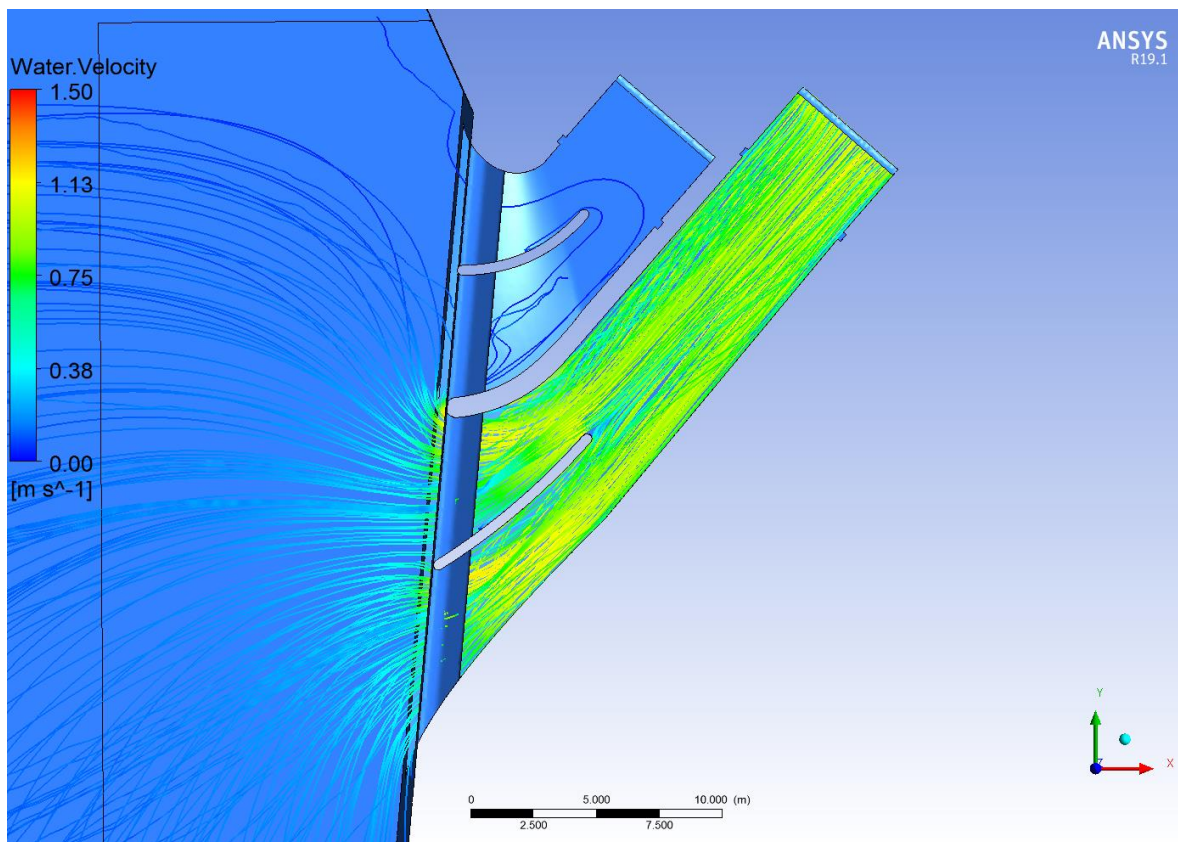


Obrázek 69 - Varianta A3 - VS3 - Hladina – rychlosti

Na obrázku výše (Obrázek 69) můžeme opět pozorovat rychlosti na hladině, které se v nátku na odstavené soustrojí TG2 blíží nule. Rychlosti v nátku na TG1 nepřesahují hodnotu 1,2 m/s.

8.1.3.3.2 Proudnice – VS3

Na následujícím obrázku (Obrázek 70) jsou vykresleny proudnice pro variantu A3 a výpočetní stav VS3.

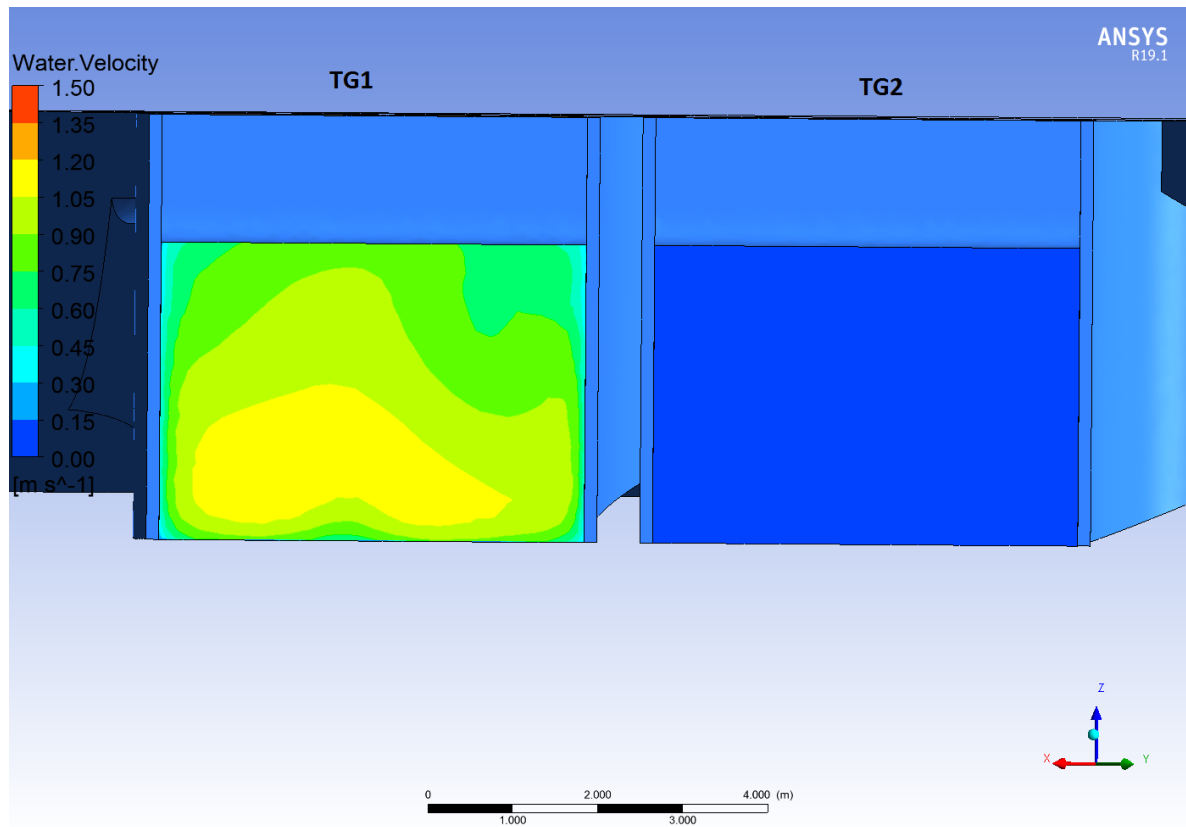


Obrázek 70 - Varianta A3 - VS3 – proudnice

Na vizualizaci proudnic (Obrázek 70) je možné pozorovat rovnoměrné natékání vody do nátoky na TG1.

8.1.3.3.3 Řezy – VS3

Ve stejných vyhodnocovacích řezech, jako u předchozích variant byly opět pro variantu A3 a výpočetní stav VS3 vykresleny kontury rychlostí (Obrázek 71).



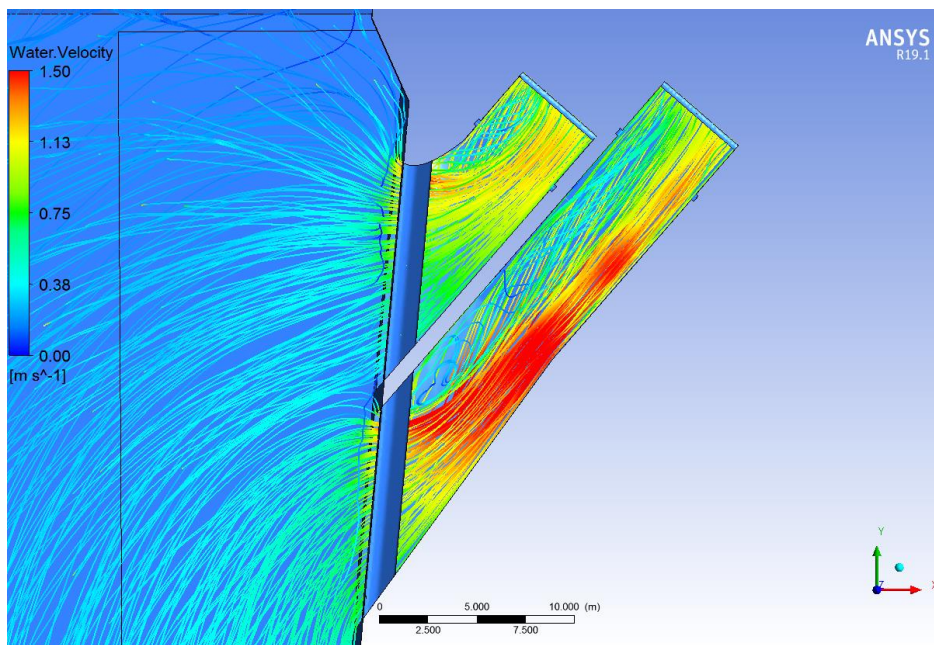
Obrázek 71 - Varianta A3 - VS3 - rychlosti v řezech

V řezu nátokem na TG1 na obrázku výše (Obrázek 71) je možné vidět vyrovnané rozložení rychlostí, které dosahují maximálních hodnot 1,2 m/s. V nátoku na TG2 jsou rychlosti nulové, což odpovídá výpočetnímu stavu, kdy je toto soustrojí odstaveno.

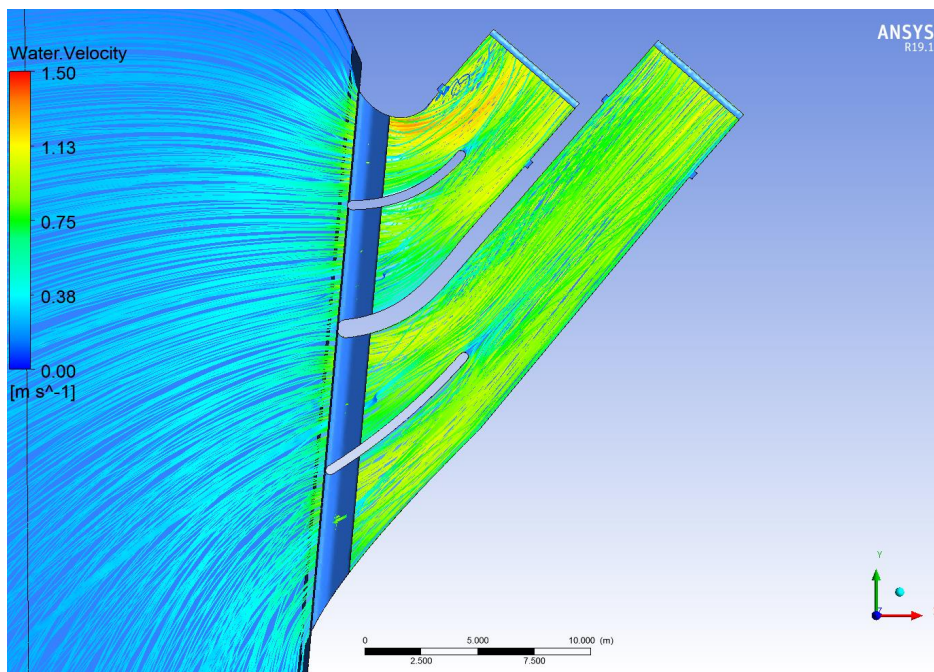
8.1.4 Porovnání

Pro posouzení výsledků úprav geometrie byly porovnány výstupy ze simulací jednotlivých variant nátokové části při výpočetním stavu VS1, tedy při stavu, kdy jsou v provozu obě soustrojí a protéká jimi návrhový průtok $Q_{n,1/2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Porovnávána byla vizualizace proudnic a kontur rychlostí v řezech nátokem, ztráty a maximální rychlost ve vyhodnocovacích řezech.

8.1.4.1 Proudnice



Obrázek 52 - Varianta A1 – proudnice

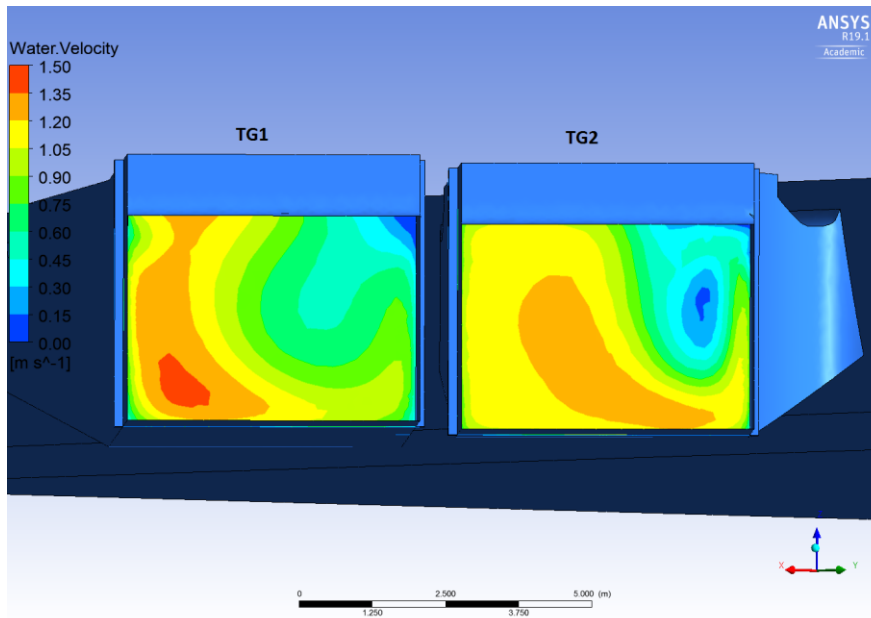


Obrázek 62 - Varianta A3 – proudnice

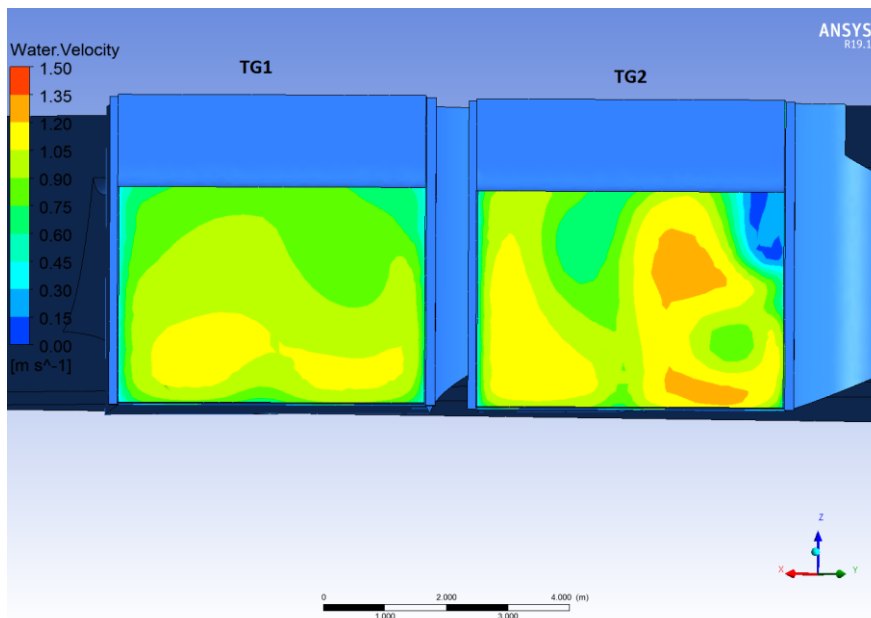
Při porovnání obrázků výše (Obrázek 52 a Obrázek 62) je zřejmé značné zlepšení průtočných podmínek v nátku na MVE Terežín. Rychlosti byly díky úpravě geometrie sníženy a nepřesahují hodnotu 1,2 m/s. Velké úplavy a turbulence, vyskytující se ve variantě A1 byly eliminovány a průtok je rovnoměrně rozložen po celé šířce nátku.

8.1.4.2 Řezy

Dále byly porovnávány rychlosti ve vyhodnocovacích řezech nátoku varianty A1 a A3.



Obrázek 53 - Varianta A1 - rychlosti v řezech



Obrázek 63 - Varianta A3 – rychlosti v řezech

Při porovnání obrázků výše (Obrázek 53 a Obrázek 63) je možné pozorovat homogenizaci rychlostního pole ve vyhodnocovacích řezech nátoku A1 a A3. Došlo také ke snížení maximálních rychlostí a ke zmenšení úplavu v nátoku na TG2.

8.1.4.3 Ztráta a maximální rychlost

V rámci posouzení výsledků byla sestavena tabulka (Tabulka 8) s porovnáním ztrát a maximálních rychlostí jednotlivých variant nátokové části MVE Terezín. Ztráty i maximální rychlosti byly měřeny ve vyhodnocovacích řezech, které jsou popsány v kapitole 8.1.1.3 Řezy na stránce 66.

Varianta	nátok na soustrojí	Nadmořská výška hladiny	rychlostní výška	energetická výška	ztráta	maximální rychlost
		H [m]	Hv [m]	He[m]	Z [m]	v [m/s]
A1	TG1	147.703	0.041	147.744	0.056	1.296
	TG2	147.712	0.041	147.753	0.047	1.382
A2	TG1	147.726	0.041	147.767	0.033	1.339
	TG2	147.716	0.041	147.757	0.043	1.121
A3	TG1	147.727	0.040	147.767	0.033	1.265
	TG2	147.719	0.041	147.760	0.040	1.097

Tabulka 8 - porovnání ztrát a maximálních rychlostí v nátokové části

V tabulce výše (Tabulka 8) je zřejmé zlepšení průtokových podmínek s každou následující variantou, tedy s každou změnou geometrie. Při porovnání varianty A3 s variantou A1 došlo ke snížení energetických ztrát v nátoku na TG1 o 0,023 m a v nátoku na TG2 o 0,07 m. Maximální rychlost v profilu vyhodnocovacího řezu se snížila v nátoku na TG1 o 0,031 m/s a u nátoku na TG2 o 0,285 m/s.

8.2 Model odtokové části

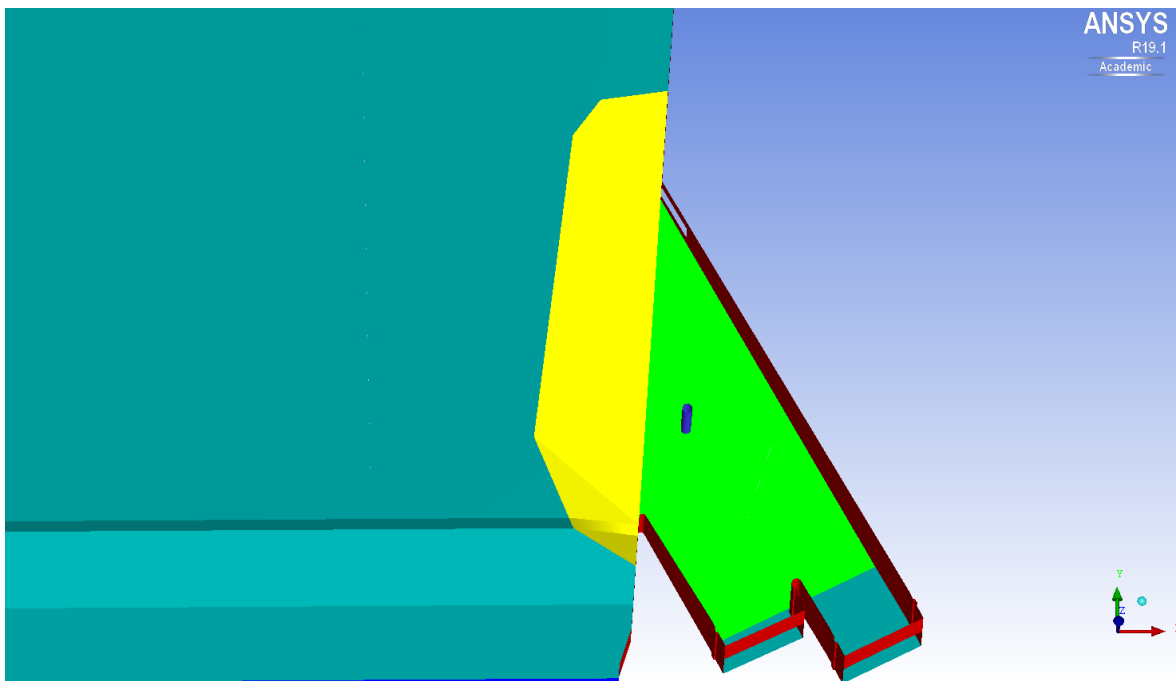
Tvarové řešení odtokové části MVE Terežín bylo voleno na základě návrhu vytvořeného výrobcem technologie „DIVE-Turbine“. Vzhledem k nařízení o neporušení opěrné stěny bude odtok procházet pod průvlakem, který bude tuto stěnu podpírat. Spodní hrana opěrné stěny se nachází nad úrovní hladiny vody v podjezí při návrhovém průtoku, takže tato stěna není do modelu zahrnuta. Šířka odtokové části v profilu průchodu opěrnou stěnou byla v závislosti na průměrné průřezové rychlosti stanovena na 20 m. Vzhledem k velké světlé šířce průvlaku, podpírajícího opěrnou stěnu bude do poloviny této vzdálenosti umístěn sloup o průměru 0,6 m, který bude tento průvlak podpírat.

V rámci optimalizace tvarového řešení odtoku z MVE Terežín byly sestaveny dva různé modely, označené B1 a B2. Pro oba modely byl počítán jeden výpočetní stav, který je popsán níže.

8.2.1 Varianta B1

První varianta odtoku byla řešena tak, že stěny odtoku pokračují od vyústění savky paralelně ve směru osy odtoku. Napojení dna odtoku na dno v podjezí je provedeno plochou, začínající 5,5 m od vyústění savky TG1. Betonové dno odtoku je ve výšce 140,9 m n. m. a pokračuje až do úrovně kóty 142,7 m n. m. V této úrovni je betonový nátok ukončen a napojení je dále provedeno pouze prohrábkou dna v podjezí. Tato prohráбка je ve variantě A1 provedena do vzdálenosti přibližně 6 m od konce betonové části dna odtoku. V polovině světlé šířky nátok je umístěn sloup o průměru 0,6 m, který podpírá opěrnou stěnu, která nesmí být v místě vyústění odtoku přerušena.

Varianta odtoku B1 je zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 72).



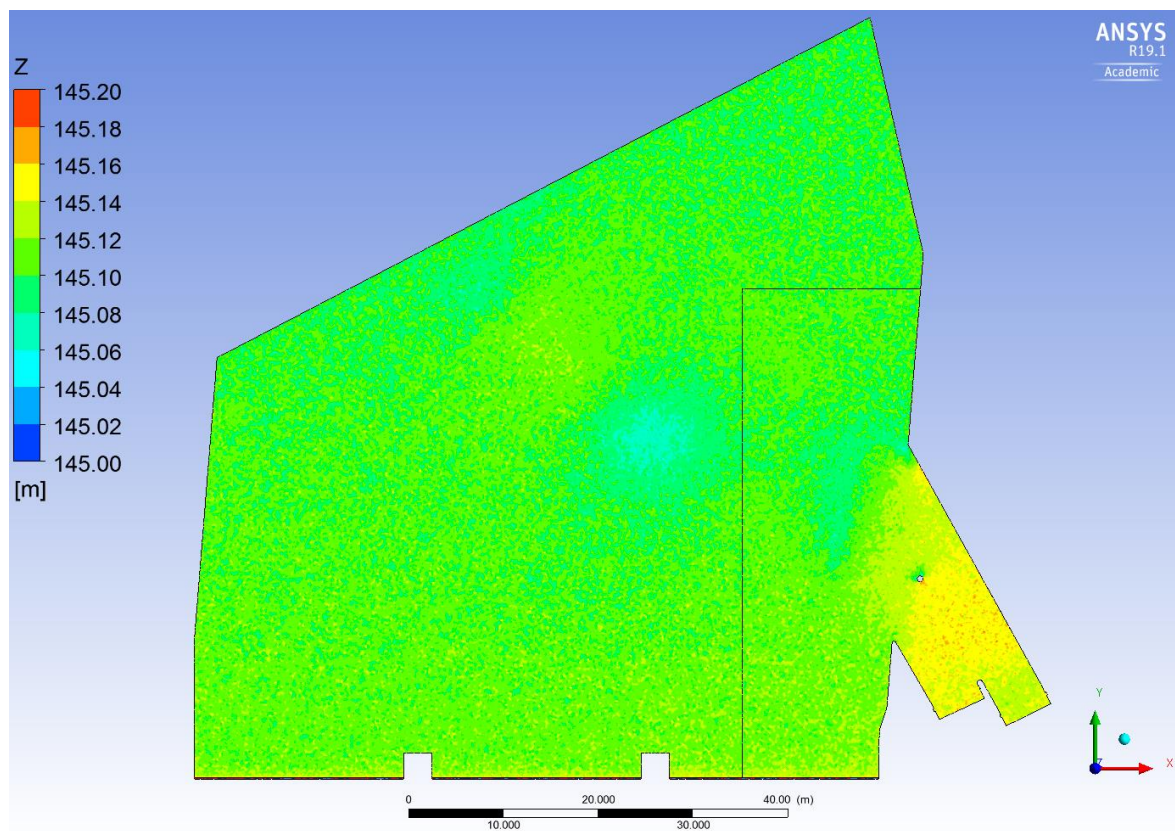
Obrázek 72 - Varianta B1 - tvarové řešení

Na obrázku výše (Obrázek 72) je zeleně znázorněna betonová část napojení odtoku na úroveň dna v podjezí, žlutě je vyznačena prohrábka a modře sloup podpírající opěrnou zeď.

Tato varianta byla vypočtena pro jeden návrhový stav, a to při souběhu obou soustrojí při návrhovém průtoku. Tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n,1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n,2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Celkový průtok elektrárnou tedy činí $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.2.1.1 Hladina

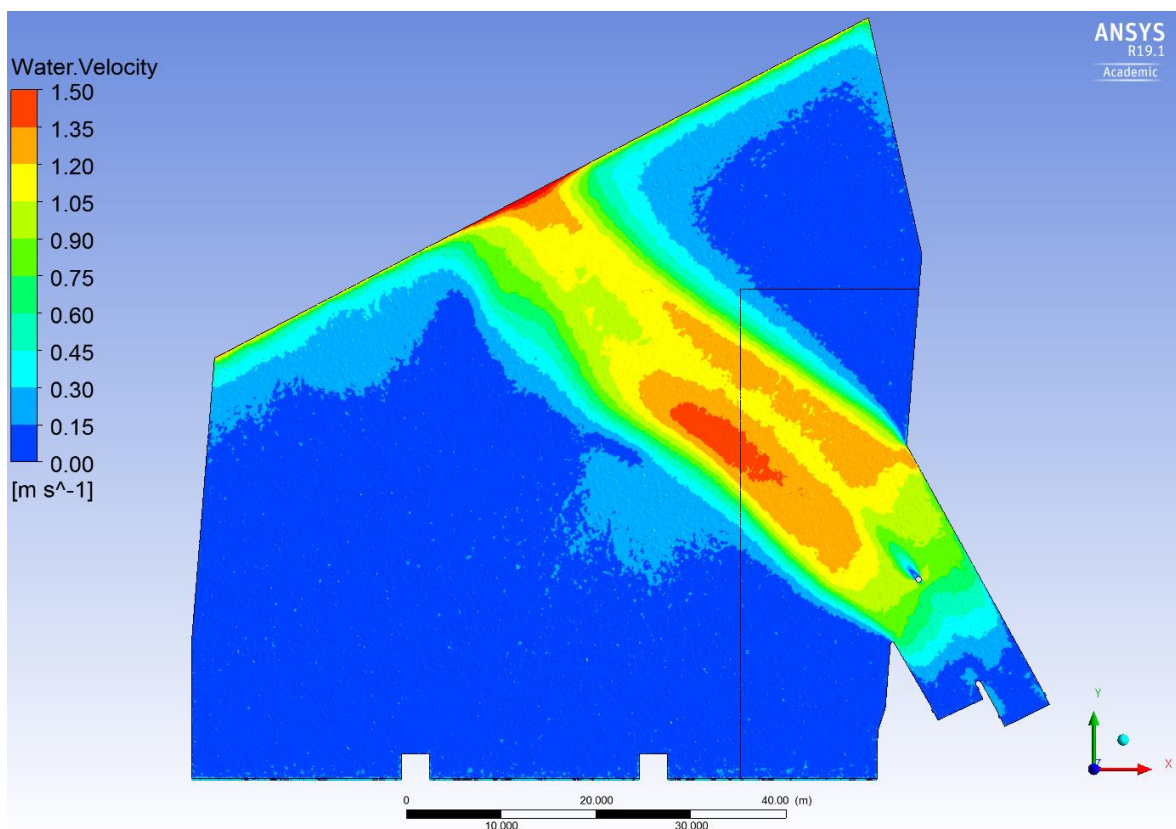
Stejně jako pro modely nátoku, byla v rámci vizualizace výsledků simulace i pro model odtokové části zobrazena hladina s vykreslením nadmořských výšek (Obrázek 73).



Obrázek 73 - Varianta B1 - Hladina - nadmořské výšky

Na obrázku výše (Obrázek 73) můžeme pozorovat kontury nadmořských výšek v podjezí. Hladina je zde na kótě 145,1 m n. m., což odpovídá známé hladině v podjezí při průtoku $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Pouze v oblasti odtoku je hladina zvýšená až o 10 cm oproti hladině v podjezí. Toto zvýšení je způsobeno zúžením průtočného profilu v napojení na jezovou zadrž.

Na následujícím obrázku (Obrázek 74) jsou zobrazeny kontury rychlostí na hladině v podjezí a odtoku od MVE Terezín.

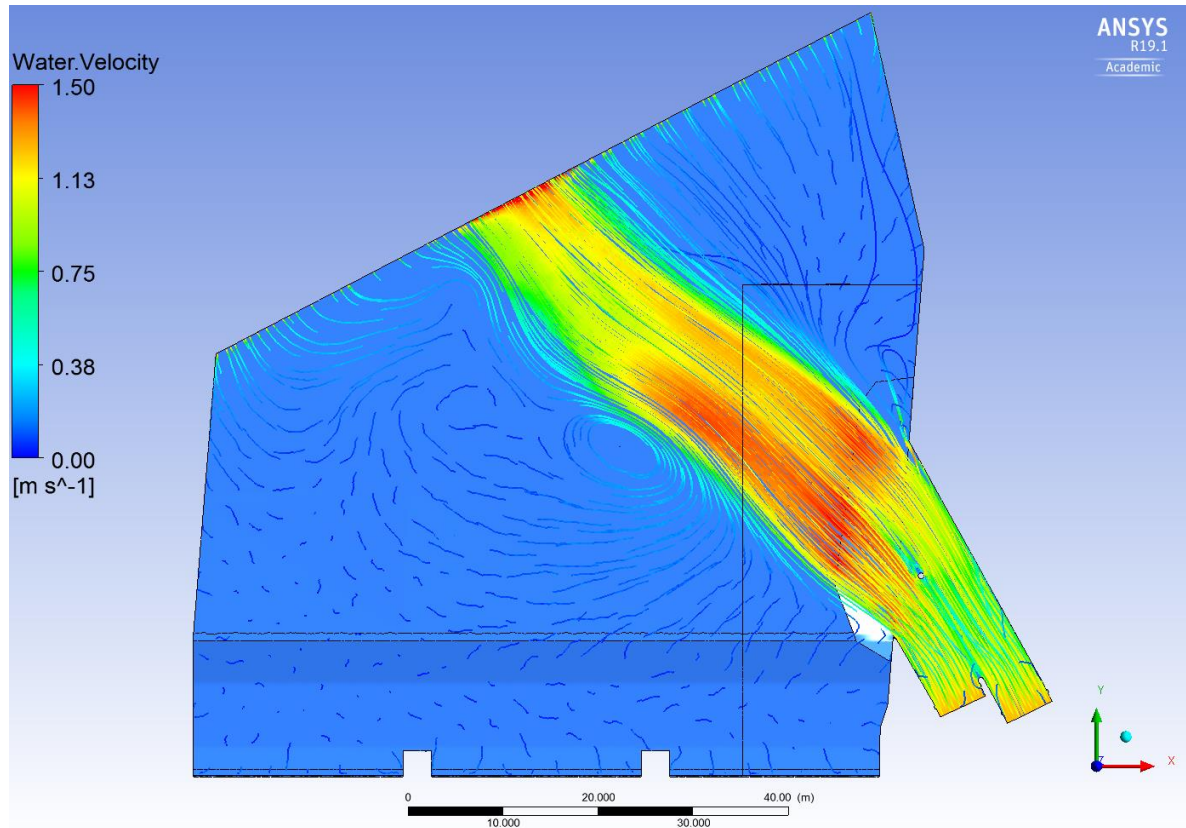


Obrázek 74 - Varianta B1 - Hladina – rychlosti

Na obrázku výše (Obrázek 74) vidíme velké zrychlení v podjezí za hranicí prohrábky. Rychlosti zde dosahují hodnot vyšších než 1,5 m/s. To je pravděpodobně způsobeno příliš strmým nárůstem nadmořské výšky dna v prohrábce. Příčina tohoto problému bude však lépe objasněna po vykreslení proudnic.

8.2.1.2 Proudnice

Na následujícím obrázku (Obrázek 75) jsou zobrazeny proudnice s barevnou konturou rychlostí. Jedná se o prostorové proudnice s počátkem ve vstupu do modelu, tedy ve vyústění savek a 2D proudnice na hladině.



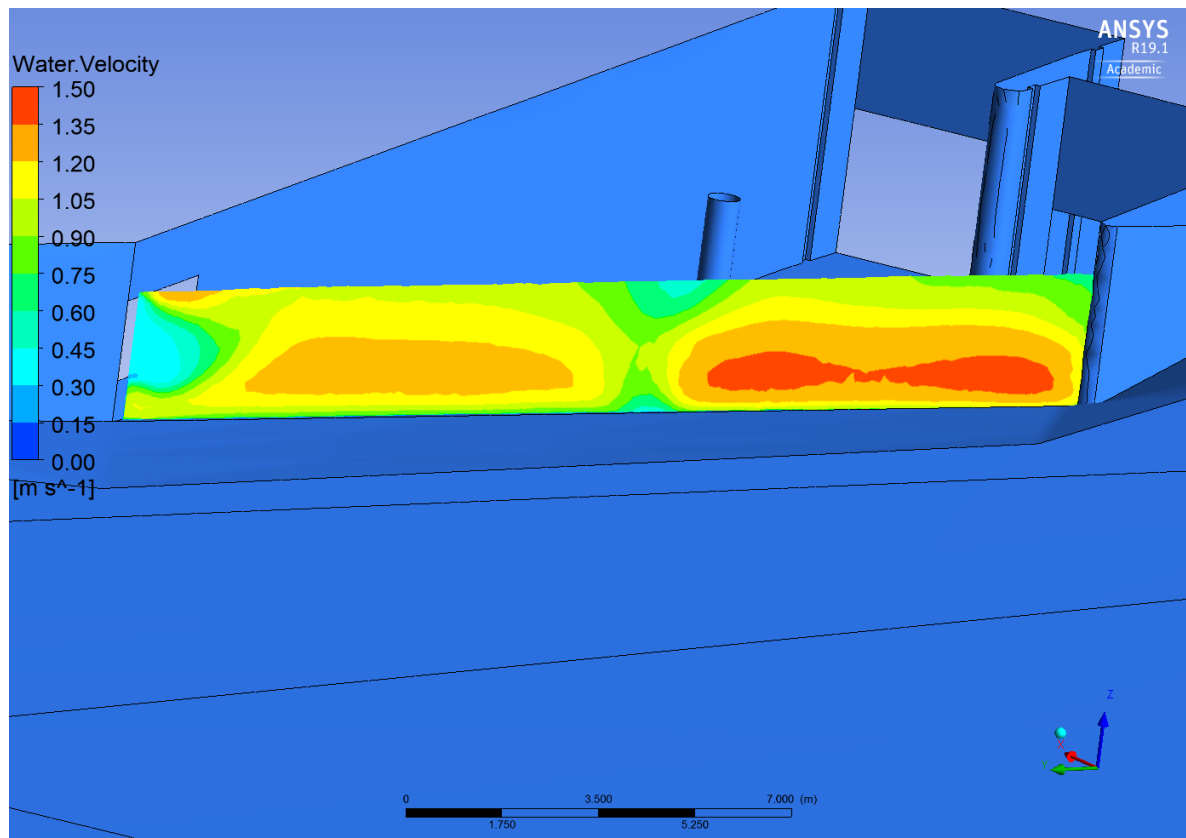
Obrázek 75 - Varianta B1 – proudnice

Na obrázku zobrazujícím proudnice (Obrázek 75) můžeme lépe pozorovat zrychlení v oblasti za prohrábkou. Z této vizualizace je patrné, že přibližně uprostřed modelu podjezí dochází k tvorbě víru, který přitlačuje proud odtékající z elektrárny a tím také přispívá ke zmenšení průtočného profilu.

8.2.1.3 Řez prohrábkou

Pro vizualizaci rozložení rychlostí v profilu prohrábkou byl sestaven řez kopírující hranu betonové části nátoky navazující na prohrábkou. V tomto řezu byly zobrazeny rychlostní kontury.

Na následujícím obrázku (Obrázek 76) je zobrazen řez prohrábkou z pohledu proti toku vody.



Obrázek 76 - Varianta B1 - rychlosti v řezu prohrábkou

Z obrázku výše (Obrázek 76) je zřejmé, že je odtok od TG2 (v tomto pohledu vpravo) problematictější z hlediska rychlostí než odtok od TG1. To proto, že konec betonové části odtoku je po celé délce hrany ve stejné nadmořské výšce a odtok od TG2 je kratší, takže stoupání je zde strmější. Bylo by tedy vhodné upravit geometrii odtoku tak, aby se zvětšil průtočný profil v místě napojení odtoku od TG2 na prohrábkou.

8.2.1.4 Ztráta

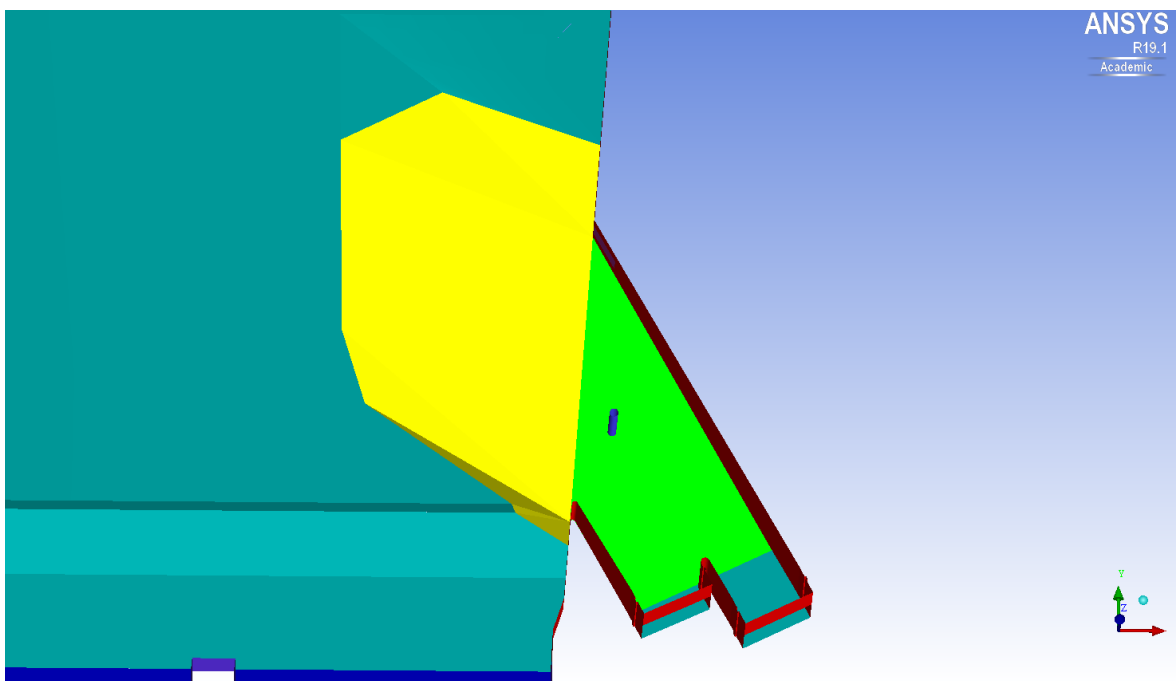
Také pro vyhodnocení simulace odtokové části MVE Terežín byla vypočtena ztráta. Tato ztráta byla vypočtena pomocí rozdílu energetických výšek v podjezí a 1 m za koncem pilíře, který dělí výtoky ze savek jednotlivých soustrojí.

Tato ztráta se při využití varianty B1 rovná $Z = 0,105$ m.

8.2.2 Varianta B2

Varianta B2 navazuje na předchozí variantu tvarového řešení odtoku od MVE Terezín. Stěny odtoku i sloup podpírající opěrnou stěnu jsou ponechány stejně, jako je tomu ve variantě B1. Hrana betonové části dna odtoku v místě napojení na prohrábkou již však není v jedné nadmořské výšce. Její levý okraj ve směru toku byl o 0,5 m snížen a hrana je tedy ve vertikálním směru zešikmena. Dále je prodloužena prohrábkou až do vzdálenosti přibližně 24 m od zakončení betonové části dna odtoku.

Varianta tvaru odtoku B2 je zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 77).



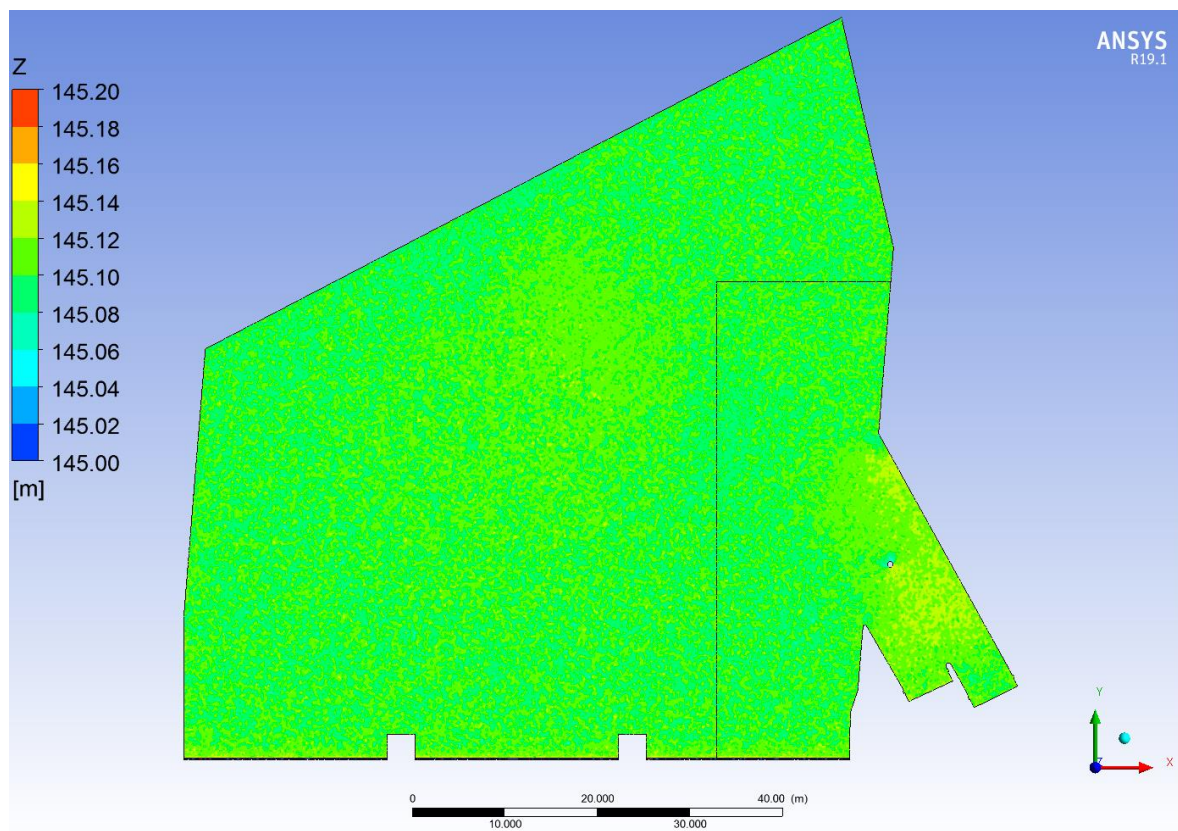
Obrázek 77 - Varianta B2 - tvarové řešení

Na obrázku výše (Obrázek 77) jsou červeně zobrazeny stěny odtoku z MVE Terezín, modře sloup podpírající opěrnou stěnu, zeleně betonová část odtoku vyrovnávající úroveň dna odtoku s úrovní dna v podjezí (prohrábkou) a žlutě je zobrazena prohrábkou.

Tato varianta byla opět počítána pouze při jednom průtokovém stavu totožném s variantou odtoku B1. Tedy průtok soustrojím TG1 $Q_{n;1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok soustrojím TG2 $Q_{n;2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.2.2.1 Hladina

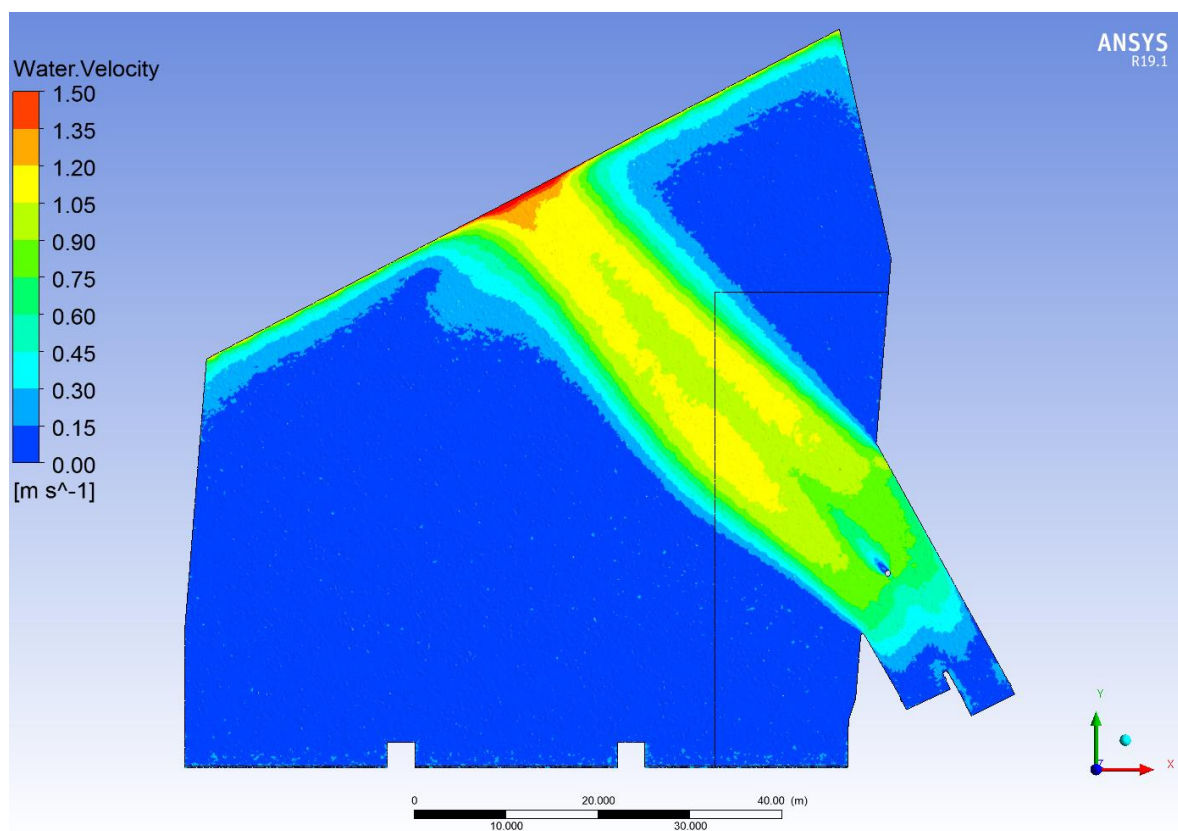
Opět byla v rámci vizualizace výstupů z modelu odtokové části varianty B2 zobrazena hladina s konturou nadmořských výšek (Obrázek 78).



Obrázek 78 - Varianta B2 - Hladina - nadmořské výšky

Z vykreslení kontury nadmořských výšek na hladině (Obrázek 78) je zřejmé, že je hladina v podjezí na úrovni kóty 145,1 m n. m., což odpovídá skutečné výšce hladiny v podjezí při průtoku $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Hladina v odtoku je stále mírně zvýšena. Toto zvýšení je však oproti předchozí variantě značně eliminováno.

Na následujícím obrázku jsou vykresleny kontury rychlostí na hladině (Obrázek 79).

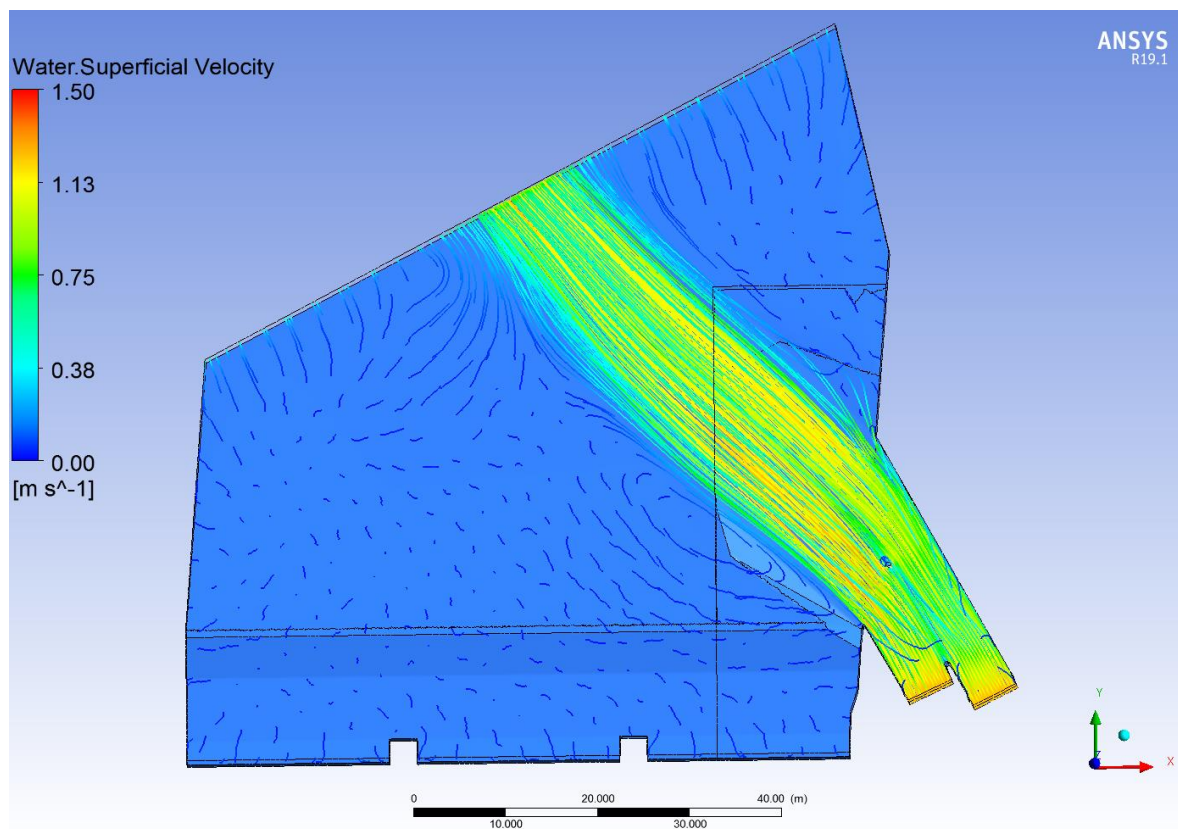


Obrázek 79 - Varianta B2 - Hladina - rychlosti

Na obrázku výše (Obrázek 79) vidíme skutečnost, že díky prohrábce byly rychlosti na hladině v místě prohrádky sníženy a dosahují maximálních hodnot 1,2 m/s.

8.2.2.2 Proudnice

Také pro variantu odtokové části B2 byly v rámci vizualizace proudění zobrazeny prostorové proudnice společně s proudnicemi na hladině (Obrázek 80).

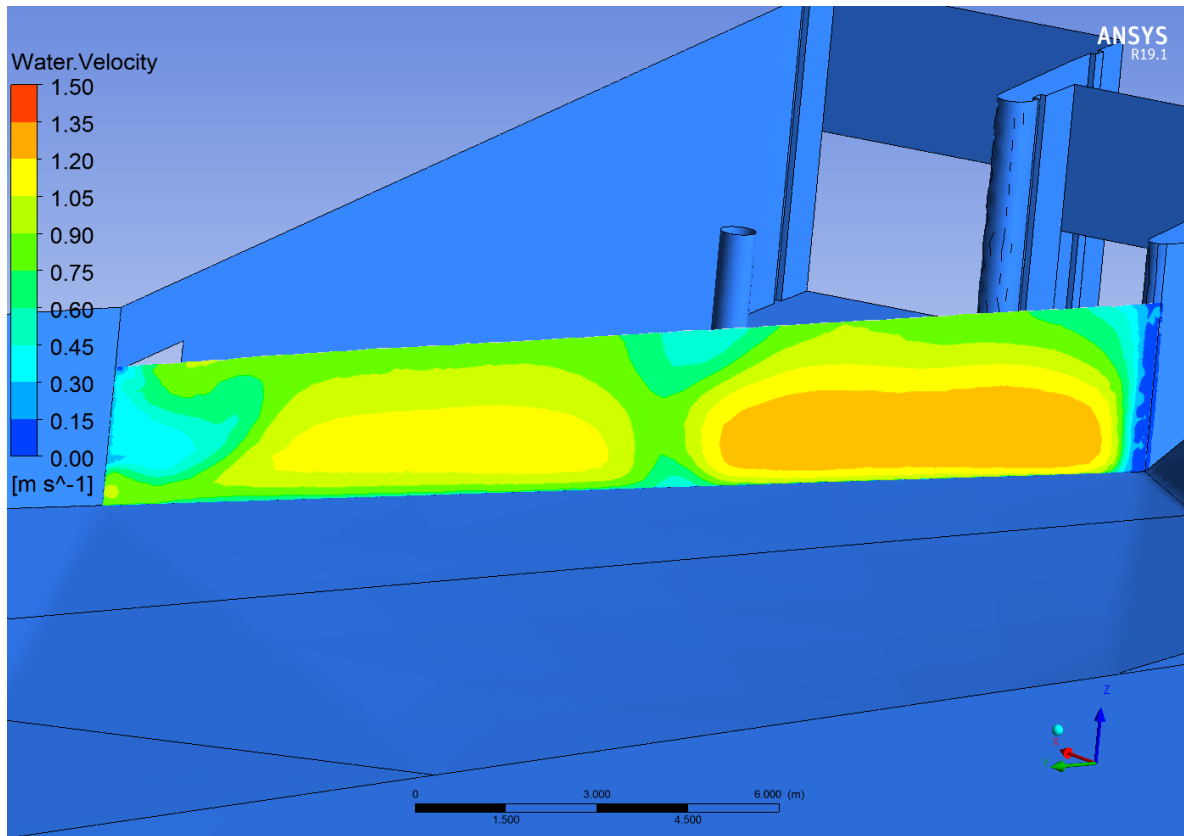


Obrázek 80 - Varianta B2 – proudnice

Také z proudnic (Obrázek 80) je patrné snížení rychlostí v podjezí díky rozšířené prohrábce dna. Rozšířením prohrábký také došlo k eliminaci víru, jež přitlačoval proud odtékající od elektrárny a zmenšoval tak průtočný profil.

8.2.2.3 Řez prohrábkou

Kontura rychlostí v řezu prohrábkou byla následně vykreslena také pro model odtoku B2 (Obrázek 81).



Obrázek 81 - Varianta B2 - rychlosti v řezu prohrábkou

Na obrázku výše (Obrázek 81) vidíme zlepšení průtočných podmínek v místě napojení betonového dna odtoku na dno v podjezí vlivem snížení dna u stěny odtoku od TG2. Rychlosti nyní dosahují maximálních hodnot 1,35 m/s.

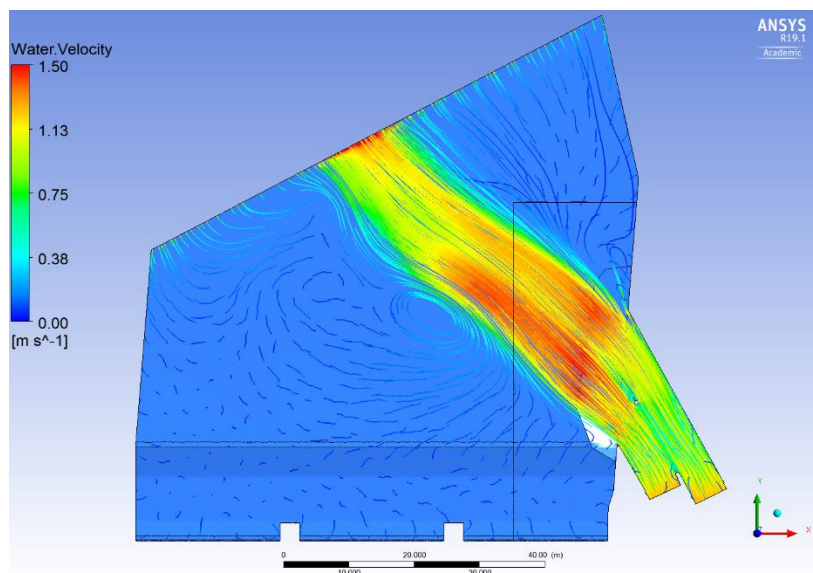
8.2.2.4 Ztráta

Také pro variantu odtoku B2 byla vypočtena ztráta stejnou metodou jako u předchozí varianty. Ztráta byla vztažena ke stejnému profilu, tedy 1 m za ukončením pilíře dělicího odtoky od jednotlivých soustrojí. Tato ztráta je rovna $Z = 0,083$ m.

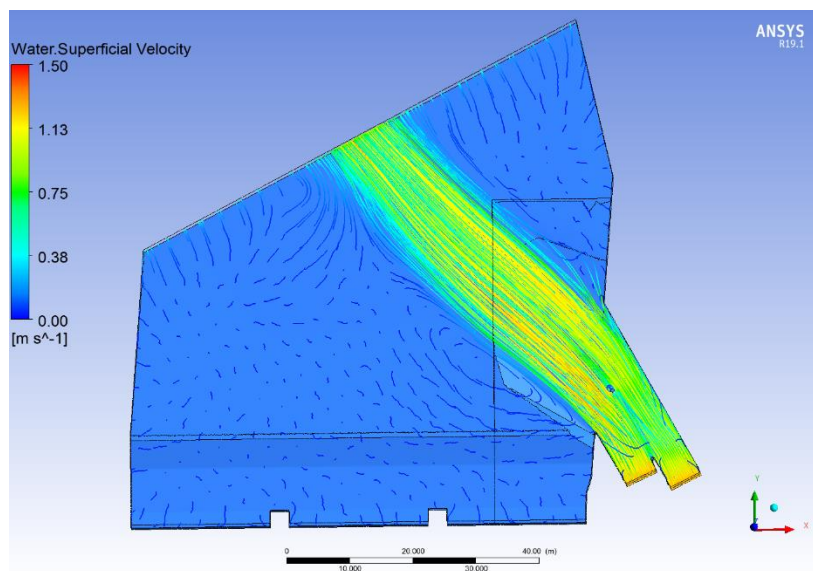
8.2.3 Porovnání

Pro posouzení vlivu úprav na průtočné poměry v odtokové části MVE Terezín byly srovnány výsledky obou simulací. Porovnávána byla vizualizace proudnic a kontury rychlostí ve vyhodnocovacím řezu, ztráty a maximální rychlost.

8.2.3.1 Proudnice



Obrázek 75 - Varianta B1 – proudnice

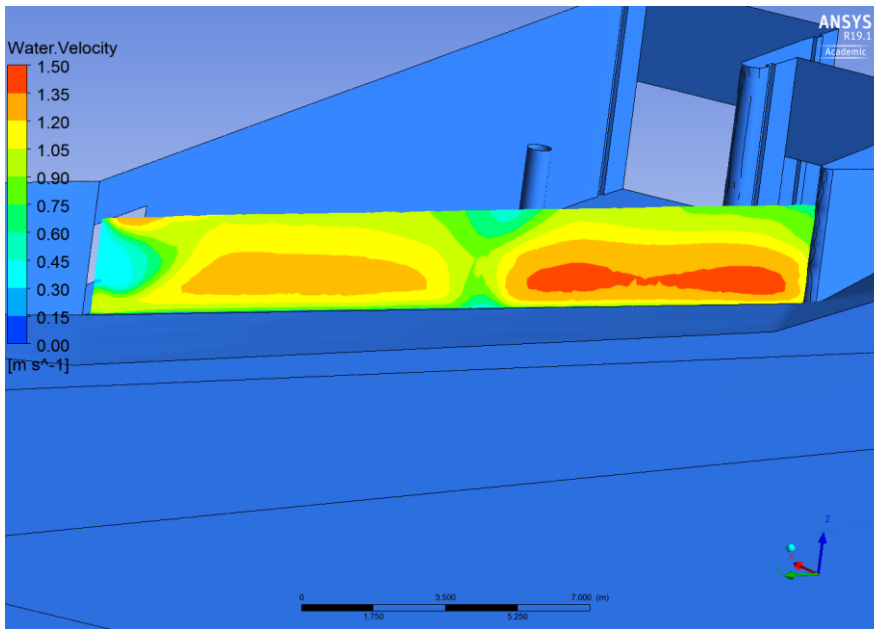


Obrázek 80 - Varianta B2 – proudnice

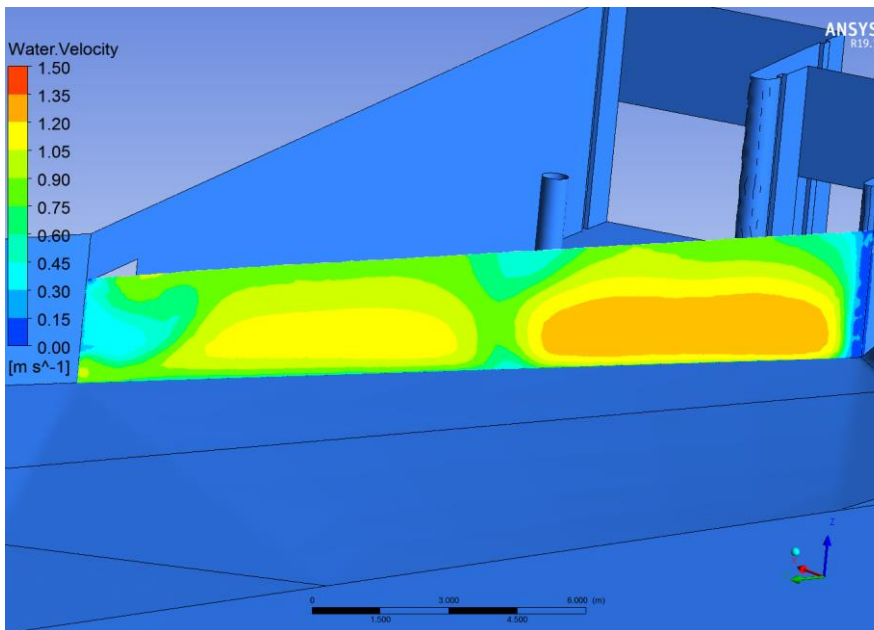
Při porovnání proudnic obou variant odtokové části elektrárny (Obrázek 75 a Obrázek 80) je zřejmé snížení rychlosti vody a eliminace víru, který přitlačoval proud odtékající vody a zmenšoval tím průtočnou plochu.

8.2.3.2 Řez prohrábkou

Následně byly porovnány rychlosti v řezech prohrábkou obou variant odtokové části MVE Terezín (Obrázek 76 a Obrázek 81).



Obrázek 76 - Varianta B1 - rychlosti v řezu prohrábkou



Obrázek 81 - Varianta B2 - rychlosti v řezu prohrábkou

Při porovnání kontur rychlostí v obou variantách modelu je zřejmé značné zlepšení průtočných podmínek vlivem snížení kóty dna hrany betonové části odtoku o 0,5 m. Rychlosti se díky této úpravě snížily a nepřesahují hodnotu 1,35 m/s.

8.2.3.3 Ztráta a maximální rychlost

Následně byla porovnána ztráta nátokem a maximální rychlost v profilu 1 m za zakončením pilíře oddělujícího výtoky ze savek jednotlivých soustrojí. Toto porovnání je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 9).

	Nadmožská výška hladiny	rychlostní výška	energetická výška	ztráta	maximální rychlost
Varianta	H [m]	Hv [m]	He[m]	Z [m]	v [m/s]
B1	145.132	0.073	145.207	0.105	1.395
B2	145.107	0.076	145.183	0.083	1.219

Tabulka 9 – Porovnání ztrát a maximálních rychlostí v odtokové části

V tabulce výše je zřejmé zlepšení průtočných podmínek odtokové části díky změně geometrie varianty B2 oproti variantě B1. Vlivem zvětšení prohrábky a snížení úrovně zakončení dna odtoku z TG2 byla snížena ztráta o 0,022 m a maximální rychlost o 0,176 m/s.

9. Závěr

Za účelem návrhu ideálního tvaru nátokové a odtokové části MVE Terežín byla provedena simulace proudění ve výpočetním programu Ansys CFD. Nejprve bylo vybráno vhodné půdorysné řešení, z něhož následně vycházely jednotlivé varianty nátokové a odtokové části. Byly vytvořeny tři geometrické varianty nátoku a dvě geometrické varianty odtoku, přičemž geometrie každé varianty vycházela z výsledků varianty předchozí. Pro každou z variant byl sestaven prostorový model, ve kterém byla vytvořena výpočetní síť s počtem elementů okolo 6 milionů. Následně byla provedena simulace výpočetního stavu, kdy jsou v provozu obě soustrojí a prochází jimi návrhový průtok $Q_{n,1/2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Po dokončení simulace byly vyhodnoceny výsledky formou vizualizace hladiny, proudnic a kontury rychlostí ve vyhodnocovacích profilech. Dále byly pro každou simulaci vyhodnoceny ztráty a maximální rychlost ve zvoleném profilu.

Jako ideální varianta nátokové části byla vyhodnocena tvarová varianta A3. Tato varianta vychází z návrhu tvaru MVE Terežín provedeného výrobcem technologie „DIVE-Turbine“. Stěny nátokové části byly v půdoryse upraveny tak, aby odpovídaly proudnicím a eliminovaly úplavy za vtokem do této části. Dno bylo upraveno tak, aby zajišťovalo dostatečné průtočné plochy a nedocházelo v žádném úseku nátoku k přílišnému nárůstu rychlostí. Následně byly do nátoku na obě soustrojí přidány usměrňovací křídla, která redukují turbulence v nátocích a zároveň slouží k podpoře průvlaku, který podpírá opěrnou stěnu, která nesmí být nad hladinou vody v jezové zdrži přerušena.

Pro ověření vhodnosti varianty B3 byly vypočteny další dva průtokové stavy. Jedná se o výpočetní stav VS2, kdy je odstaveno soustrojí TG1 a soustrojím TG2 prochází návrhový průtok $Q_{n,2} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a výpočetní stav VS3, kdy je odstaveno soustrojí TG2 a návrhový průtok $Q_{n,1} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ protéká soustrojím TG1.

Změnou geometrie z varianty A1 na variantu A3 došlo ke snížení energetických ztrát o 0,023 m v nátoku na TG1 a o 0,007 m v nátoku na TG2.

Model odtokové části taktéž vychází z návrhu výrobce technologie „DIVE-Turbine“. Jako ideální řešení byla vyhodnocena varianta B2, která se oproti předchozí variantě B1 liší prodloužením prohrábký dna a snížením levé části hrany, která zakončuje betonové dno odtoku, o 0,5 m. Tím byla zvětšena průtočná plocha a rychlosti se tak snížily. Došlo taktéž k eliminaci víru, který ve variantě B1 přitlačoval proud odtékající od MVE Terežín a zmenšoval tak průtočnou plochu.

Změnou geometrie z varianty B1 na variantu B2 došlo ke snížení ztrát o hodnotu 0,022 m.

10. Použitá literatura

- [1] Association, E. S. (2004). *Guide on how to develop a small hydropower plant*. Brusel: ESHA.
- [2] Boor, B., Kunštátský, J., & Patočka, C. (1968). *hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.
- [3] DIVE Turbinen, G. (23.. 10. 2018). *DIVE Turbinen*. Načteno z dive-turbine: <https://www.dive-turbine.de/de>
- [4] Dušička, P. (2003). *Malé vodní elektrárny*. Bratislava: Jaga group.
- [5] Giesecke, J., & Mosonyi, E. (2005). *Wasserkraftanlagen*. Berlin: Springer.
- [6] Kolář, V., Patočka, C., & Bém, J. (1983). *Hydraulika*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury.
- [7] Mattas, D. (2014). *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Praha: VÚV T. G. M.
- [8] Melichar, J. (2013). *Hydraulické a pneumatické stroje, Část vodní turbíny*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT.
- [9] Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. (2010). *Hydraulic modelling - an introduction*. CRC Press.
- [10] Novak, P., Mofat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures*. Tylor & Francis.
- [11] Štoll, Č., Kratochvíl, S., & Holata, M. (1977). *Využití vodní energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.

11. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pohled na jez - proti proudu.....	5
Obrázek 2 - Pohled na lokalitu kolmo na tok	5
Obrázek 3 - Pohled na velín jezu - umístění MVE Terezín.....	6
Obrázek 4 - Sjezd k vodě na pravém břehu pod jezem	6
Obrázek 5 - Umístění MVE Terezín.....	7
Obrázek 6 - Řez MVE Terezín navržený výrobcem.....	8
Obrázek 7 - Koncept „Dive-Turbine“	9
Obrázek 8 - Graf využitelnosti konceptu „Dive-Turbine“	10
Obrázek 9 - Jednotná regulace.....	12
Obrázek 10 - Dvojitá regulace	13
Obrázek 11 - Hybridní regulace.....	14
Obrázek 12 - Varianty půdorysného uspořádání	29
Obrázek 13- Půdorysné uspořádání	30
Obrázek 14 – Nátok - „TOP_COARSE“	36
Obrázek 15 – Nátok - „TOP_SMOOTH“	37
Obrázek 16 – Nátok - „NATOK_TOP“	37
Obrázek 17 – Nátok - „INLET“	38
Obrázek 18 – Nátok - „OUTLET1“	39
Obrázek 19 – Nátok - „OUTLET2“	40
Obrázek 20 – Nátok - „RP_LEVY“	41
Obrázek 21 – Nátok - „RP_PRAVY“	41
Obrázek 22 – Nátok - „DNO_COARSE“	43
Obrázek 23 – Nátok - „DNO_SMOOTH“	43
Obrázek 24 – Nátok - „ZIDKA_LEVA“	44
Obrázek 25 – Nátok - „ZIDKA_PRAVA“	44
Obrázek 26 – Nátok - „JEZ“	45
Obrázek 27 - Odtok - „PILIR“	45
Obrázek 28 – Nátok - „KLAPKA“	46
Obrázek 29 - „NATOK_DNO“	46

Obrázek 30 - „NATOK_PRUVLAK"	47
Obrázek 31 - „NATOK_WALL"	47
Obrázek 32 - „NATOK_TLAK"	48
Obrázek 33 – Odtok - „TOP_COARSE"	50
Obrázek 34 – Odtok - „TOP_SMOOTH"	51
Obrázek 35 – Odtok - „INLET1"	52
Obrázek 36 - Odtok - „INLET2"	52
Obrázek 37 - Odtok - „RP"	53
Obrázek 38 – Odtok - „OUTLET"	54
Obrázek 39 – Odtok - „DNO_COARSE"	55
Obrázek 40 – Odtok - „DNO_SMOOTH"	55
Obrázek 41 – Odtok - „ZIDKA_LEVA"	56
Obrázek 42 – Odtok - „ZIDKA_PRAVA"	56
Obrázek 43 – Odtok - „JEZ"	57
Obrázek 44 – Odtok - „PODJEZI"	57
Obrázek 45 – Odtok - „ODTOK_DNO"	58
Obrázek 46 – Odtok - „ODTOK_WALL"	58
Obrázek 47 – Odtok - „SLOUP"	59
Obrázek 48 - Odtok - „ODTOK_NAPOJENI"	59
Obrázek 49 – Varianta A1 - tvarové řešení	62
Obrázek 50 - A1 - Hladina - nadmořské výšky	63
Obrázek 51 - A1 - Hladina – rychlosti.....	64
Obrázek 52 - Varianta A1 – proudnice	65
Obrázek 53 - Varianta A1 - rychlosti v řezech	66
Obrázek 54 - Varianta A2 – tvarové řešení	67
Obrázek 55 - Varianta A2 – Hladina – nadmořské výšky	68
Obrázek 56 - Varianta A2 – Hladina - rychlosti	69
Obrázek 57 - Varianta A2 – proudnice	70
Obrázek 58 - Varianta A2 – rychlosti v řezech	71
Obrázek 59 - Varianta A3 - tvarové řešení	72
Obrázek 60 - Varianta A3 - Hladina - nadmořské výšky	73

Obrázek 61 - Varianta A3 - Hladina – rychlosti	74
Obrázek 62 - Varianta A3 – proudnice	75
Obrázek 63 - Varianta A3 – rychlosti v řezech	76
Obrázek 64 - Varianta A3 - VS2 - Hladina - nadmořské výšky	77
Obrázek 65 - Varianta B3 - VS2 - Hladina – rychlosti.....	78
Obrázek 66 - Varianta A3 - VS2 – proudnice	79
Obrázek 67 - Varianta A3 - VS2 - rychlosti v řezech.....	80
Obrázek 68 - Varianta A3 - VS3 - Hladina - nadmořské výšky	81
Obrázek 69 - Varianta A3 - VS3 - Hladina – rychlosti	82
Obrázek 70 - Varianta A3 - VS3 – proudnice	83
Obrázek 71 - Varianta A3 - VS3 - rychlosti v řezech.....	84
Obrázek 72 - Varianta B1 - tvarové řešení	89
Obrázek 73 - Varianta B1 - Hladina - nadmořské výšky.....	90
Obrázek 74 - Varianta B1 - Hladina – rychlosti	91
Obrázek 75 - Varianta B1 – proudnice	92
Obrázek 76 - Varianta B1 - rychlosti v řezu prohrábkou	93
Obrázek 77 - Varianta B2 - tvarové řešení	94
Obrázek 78 - Varianta B2 - Hladina - nadmořské výšky.....	95
Obrázek 79 - Varianta B2 - Hladina - rychlosti.....	96
Obrázek 80 - Varianta B2 – proudnice	97
Obrázek 81 - Varianta B2 - rychlosti v řezu prohrábkou	98

12. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Dvojitá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku	15
Tabulka 2 - Jednoduchá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku	16
Tabulka 3 - Celá MVE - závislost účinnosti a výkonu na průtoku.....	17
Tabulka 4 - Průtočné profily – rychlosti	31
Tabulka 5 - Nátok - rozdělení maximální velikosti elementů pro jednotlivé části výpočetní sítě.....	34
Tabulka 6 - Nátok - rozdělení maximální velikosti elementů pro jednotlivé části výpočetní sítě.....	49
Tabulka 7 - Přehled variant vtokové části	61
Tabulka 8 - porovnání ztrát a maximálních rychlostí v nátokové části	87
Tabulka 9 – Porovnání ztrát a maximálních rychlostí v odtokové části	101

13. Seznam grafů

Graf 1 - Dvojitá regulace - Závislost účinností a výkonu na průtoku.....	15
Graf 2 - Jednoduchá regulace - závislost účinností a výkonu na průtoku	16
Graf 3 - Celá MVE - závislost účinnosti a výkonu na průtoku.....	18
Graf 4 - Průměrné denní průtoky v letech 1994 – 2017	19
Graf 5 - Čára trvání průměrných denních průtoků	20
Graf 6 - Čára trvání průtoku elektrárnou	21
Graf 7 - Měrná křivka dolní vody	22
Graf 8 - Čára trvání hrubého spádu	23
Graf 9 - Čára trvání korigovaného průtoku elektrárnou	24
Graf 10 - Čára trvání hrubého a čistého spádu	25
Graf 11 - Průběh celkové účinnosti MVE	26
Graf 12 - Čára trvání výkonu MVE	27